Recy & DepoTech 2026

VORTRÄGE-Konferenzband

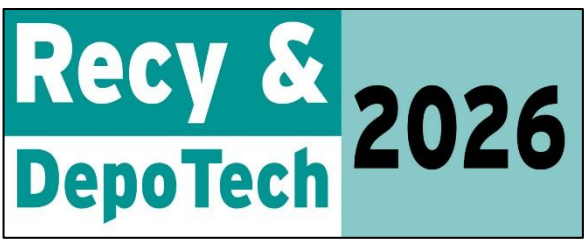
zur 18. Recy & DepoTech-Konferenz

18. - 20. November 2026
Montanuniversität Leoben, Österreich

Herausgeber: Roland Pomberger, Julian Aberger, Josef Adam, Shirin Askari, Ferozan Azizi, Therese Bouvier-Schwarz, Paul Demschar, Alexander Egarter, Florian Feucht, Martin Findl, Kseniia Grai, Andreas Klöckl, Gerald Koinig, Karl E. Lorber, Namrata Mhaddolkar, Thomas Nigl, Richard Nti, Renato Sarc, Verena Schmid, Klaus Philipp Sedlazeck, Alexia Tischberger-Aldrian, Alena Vydrenkova und Hannah Weber

VORTRÄGE-Konferenzband
zur 18. Recy & DepoTech-Konferenz

18. - 20. November 2026
Montanuniversität Leoben, Österreich



Herausgeber
Roland Pomberger, Julian Aberger, Josef Adam, Shirin Askari, Ferozan Azizi, Therese Bouvier-Schwarz, Paul Demschar, Alexander Egarter, Florian Feucht, Martin Findl, Kseniia Grai, Andreas Klöckl, Gerald Koinig, Karl E. Lorber, Namrata Mhaddolkar, Thomas Nigl, Richard Nti, Renato Sarc, Verena Schmid, Klaus Philipp Sedlazeck, Alexia Tischberger-Aldrian, Alena Vydrenkova und Hannah Weber

AVW
Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft
Eigenverlag

Erfassung, Satz und Seitenlayout der einzelnen Manuskripte dieses Konferenzbandes lagen in der Verantwortung der jeweiligen Autoren.

Vervielfältigung und Verwendung der Texte und Bilder, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben gestattet.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im gesamten Konferenzband alle Namen ohne akademische Grade angegeben.

© Copyright 2026

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW)
Franz Josef-Straße 18, 8700 Leoben, Österreich
Telefon: +43 (0) 3842 / 402-5101
E-Mail: avaw@unileoben.ac.at, Internet: https://www.unileoben.ac.at/avaw/

AVAW
Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft
Eigenverlag

Gedruckt in Österreich

DGS - Druck u. Graphikservice GmbH
Hardeggasse 69, 1220 Wien, Österreich
Oktober 2026

FSC www.fsc.org FSC® A000507
The mark of responsible forestry

ISBN: 978-3-9506289-0-6

Inhalt

Vorwort Bundesminister Norbert Totschnig 5
Vorwort Landeshauptmann Mario Kunasek 6
Vorwort Landesrätin Simone Schmiedtbauer 7
Vorwort Sektionschef Christian Holzer 8
Vorwort Bürgermeister Kurt Wallner 9
Vorwort Magnifizenz Peter Moser 10
Vorwort Ingrid Winter 11
Vorwort VOEB-Präsidentin Gabriele Jüly 12
Vorwort GTV-Geschäftsführer Bernhard Puttinger 13
Vorwort ISWA-Präsident Arne Ragossnig 14

Editorial Roland Pomberger 16

Organisation & Redaktion 19
Kooperationspartner 19
Wissenschaftliches Komitee 20
Ehrungen 22
Ehrenschutz 23

Förderungen & Firmenpartnerschaften 24

Inhaltsverzeichnis Festvortrag & Plenarvorträge 27
Inhaltsverzeichnis Vorträge 28

Index English abstracts of keynote & plenary lectures 43
Index English abstracts of lectures 44

Festvortrag & Plenarvorträge 59
Vorträge 87
English abstracts 885

Autorenverzeichnis 1.033

Sachregister 1.043



Vorwort

Mag. Norbert Totschnig, MSc

Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft

Die Welt befindet sich in einer Zeit großer Veränderungen. Geopolitische Konflikte, wirtschaftliche Unsicherheiten, steigende Kosten und die Herausforderungen der ökologischen Transformation stellen Staaten, Unternehmen sowie unsere Gesellschaft vor große Aufgaben. Gleichzeitig zeigen diese Entwicklungen, wie wichtig resiliente Strukturen, eine sichere Versorgung mit Rohstoffen und ein verantwortungsvoller Umgang mit Ressourcen sind.

Gerade in diesem Umfeld gewinnt die Abfallwirtschaft zunehmend an Bedeutung. Sie verbindet ökologische Verantwortung mit wirtschaftlicher Stärke und leistet einen wichtigen Beitrag dazu, Abhängigkeiten von internationalen Rohstoffmärkten zu reduzieren. Wertstoffe, die früher lediglich als Abfall betrachtet wurden, werden immer stärker zu wichtigen Ressourcen für die Zukunft. Die Nutzung von Sekundärrohstoffen stärkt nicht nur den Klimaschutz, sondern auch die Versorgungssicherheit und Wettbewerbsfähigkeit unseres Wirtschaftsstandortes Österreich.

Die Recy & DepoTech hat sich als bedeutende Plattform für den Austausch zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Verwaltung und Praxis etabliert. Sie bringt Expertinnen und Experten zusammen, die mit ihrem Wissen und ihren Innovationen die Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft aktiv vorantreiben. Gerade in wirtschaftlich herausfordernden Zeiten sind Zusammenarbeit, Forschung und Innovation entscheidend, um neue Potenziale zu erschließen.

Ich bin überzeugt, dass die aktuellen Herausforderungen zugleich eine Chance bieten: die Chance, unsere Wirtschaft widerstandsfähiger zu machen, Rohstoffkreisläufe zu schließen und die Innovationskraft unseres Landes weiter zu stärken. Die Abfallwirtschaft kann dabei ein wesentlicher Schlüssel für mehr Versorgungssicherheit, nachhaltige Wertschöpfung und eine erfolgreiche Zukunft sein.

In diesem Sinne wünsche ich der Recy & DepoTech 2026 einen erfolgreichen Verlauf und allen Beteiligten ein kräftiges Glück Auf!




© Andreas Hofer

Vorwort

Mario Kunasek

Landeshauptmann der Steiermark

Geschätzte Damen und Herren!

Die Recy & DepoTech 2026 zeigt, wie entscheidend Innovation und Zusammenarbeit für eine funktionierende Abfallwirtschaft sind. Die Konferenz bringt Wissenschaft, Wirtschaft und Praxis zusammen – genau dort entstehen die Lösungen, die wir für eine effiziente Nutzung unserer Ressourcen brauchen.

Als größte Fachkonferenz für Abfallwirtschaft und Recycling in Österreich vernetzt die Recy & DepoTech regelmäßig rund 750 Teilnehmer aus Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung. Sie bietet eine wichtige Plattform für den Austausch von Wissen, Erfahrungen und neuen Ideen. Die 18. Auflage dieser Konferenz unterstreicht ihre große Bedeutung und internationale Strahlkraft.

Mit der Montanuniversität Leoben verfügt die Steiermark über einen international anerkannten Standort für Umwelttechnik und Recycling. Dieses Know-how ist ein zentraler Faktor für Wertschöpfung und Beschäftigung in unseren Regionen.

Deshalb setzen wir im steirischen Regierungsprogramm gezielt auf die stärkere Vernetzung von Forschung, Wissenschaft und Wirtschaft. Gerade in der Kreislaufwirtschaft eröffnen neue Technologien und digitale Lösungen große Chancen – sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich.

Mein Dank gilt allen Beteiligten, die mit ihrem Engagement dazu beitragen, die Steiermark als Innovationsstandort weiter zu stärken.

Allen Teilnehmern der Recy & DepoTech 2026 wünsche ich inspirierende Gespräche und wertvolle neue Impulse für die Zukunft der Abfallwirtschaft.

Ein steirisches „Glück auf!“
Ihr Landeshauptmann
Mario Kunasek



Imagefotografie©MichaelaLorber

Vorwort

Landesrätin Simone Schmiedtbauer

Steiermärkische Landesregierung

Die Herausforderungen unserer Zeit verlangen nach nachhaltigen Lösungen – im Umgang mit Ressourcen ebenso wie bei der Gestaltung einer zukunftsfähigen Wirtschaft. Die Kreislaufwirtschaft spielt dabei eine Schlüsselrolle. Sie verbindet Umwelt- und Klimaschutz mit Innovation, Wertschöpfung und Versorgungssicherheit und leistet einen entscheidenden Beitrag für eine nachhaltige Entwicklung unseres Landes.

Die Recy & DepoTech hat sich in den vergangenen Jahren zu einer der bedeutendsten Fachkonferenzen für Abfallwirtschaft und Recycling im deutschsprachigen Raum entwickelt. Dass sich bereits zum 18. Mal Expertinnen und Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft, Verwaltung und Praxis an der Montanuniversität Leoben treffen, unterstreicht die hohe Bedeutung dieses Austauschs. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse, innovative Technologien und praxistaugliche Lösungen entstehen dort, wo Wissen geteilt und gemeinsam weiterentwickelt wird.

Gerade die Steiermark steht für Innovation, technische Exzellenz und verantwortungsvollen Umgang mit unseren natürlichen Lebensgrundlagen. Mit der Montanuniversität Leoben verfügt unser Bundesland über einen international anerkannten Forschungsstandort, der wesentliche Impulse für die Weiterentwicklung moderner Recyclingtechnologien und einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft setzt.

Ich danke allen Organisatorinnen und Organisatoren sowie den zahlreichen Vortragenden und Teilnehmenden für ihren wertvollen Beitrag. Ich wünsche der Recy & DepoTech 2026 einen erfolgreichen Verlauf, spannende Diskussionen und viele neue Impulse, die den Weg zu einer nachhaltigen und ressourceneffizienten Zukunft weiter ebnen.





Vorwort

Sektionschef Dipl.-Ing. Christian Holzer

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft

Mit der Recy & DepoTech 2026 steht erneut eine Konferenz bevor, die Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung zusammenführt und damit den fachlichen Austausch zu den Zukunftsfragen der Kreislaufwirtschaft auf höchstem Niveau ermöglicht. Die Montanuniversität Leoben wird einmal mehr zum Kompass der heimischen und internationalen Fachwelt – einem Ort, an dem wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Lösungen zusammenfinden und richtungsweisende Impulse für die Weiterentwicklung einer zukunftsfähigen Wirtschaft entstehen.

Die Sicherung wertvoller Rohstoffe sowie der verantwortungsvolle Umgang mit neuen persistenten Schadstoffen verlangen nach innovativen Technologien, wissenschaftlich fundierten Entscheidungen und einer engen Zusammenarbeit aller Beteiligten. Auch wenn die derzeitigen budgetären und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Umsetzung notwendiger Innovationen und die Geschwindigkeit des Fortschritts vom Idealzustand abweichen, darf dies den eingeschlagenen Weg nicht bremsen.

Die Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft bleibt ein entscheidender Schlüssel, um Ressourcen effizienter zu nutzen und die Resilienz unseres Wirtschaftsstandortes langfristig zu stärken. Moderne Verfahren zur Rückgewinnung hochwertiger Sekundärrohstoffe und der nachhaltige bzw. schonende Umgang mit unseren natürlichen Ressourcen leisten dazu einen wesentlichen Beitrag.

Die Recy & DepoTech 2026 bietet dafür den idealen Rahmen. Sie schafft Raum für den offenen Dialog, den Austausch neuer Erkenntnisse und die gemeinsame Entwicklung praxistauglicher Lösungen für die Herausforderungen von heute und morgen.

Ich wünsche allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern eine erfolgreiche Konferenz, anregende Diskussionen und einen fruchtbaren Wissensaustausch.

Ein kräftiges Glück Auf!





Vorwort

Kurt Wallner

Stadtgemeinde Leoben

Die Abfallwirtschaft und das Recycling zählen zu den zentralen Zukunftsthemen unserer Zeit. Angesichts wachsender Ressourcenknappheit, steigender Umweltanforderungen und globaler Herausforderungen kommt innovativen Lösungen und einem verantwortungsvollen Umgang mit Wertstoffen eine entscheidende Bedeutung zu. Die 18. Abfallwirtschafts- und Recyclingkonferenz Recy & DepoTech 2026 bietet hierfür erneut eine wichtige Plattform für den Austausch zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Praxis.

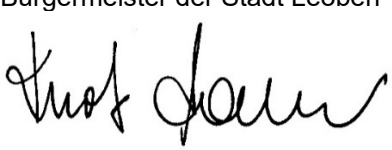
Es freut mich besonders, dass diese renommierte Fachveranstaltung in unserer Stadt Leoben stattfindet und durch die Stadtgemeinde unterstützt wird. Leoben steht seit jeher für Innovation, Forschung und eine enge Verbindung zwischen Universität und industrieller Praxis. Die Montanuniversität Leoben und ihre Expertise im Bereich der Abfallwirtschaft leisten einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Technologien und Lösungen.

Die Recy & DepoTech hat sich über viele Jahre hinweg als bedeutendes Forum etabliert, das aktuelle Entwicklungen aufgreift, neue Impulse setzt und den Dialog zwischen Expertinnen und Experten fördert. Gerade in Zeiten des Wandels ist dieser Austausch unerlässlich, um gemeinsam tragfähige Konzepte für eine ressourcenschonende und klimafreundliche Zukunft zu entwickeln.

Mein besonderer Dank gilt den Organisatorinnen und Organisatoren sowie allen Mitwirkenden, die mit ihrem Engagement zum Gelingen dieser Konferenz beitragen. Den Teilnehmerinnen und Teilnehmern wünsche ich einen erfolgreichen und inspirierenden Verlauf der Veranstaltung sowie wertvolle Erkenntnisse für ihre weitere Arbeit.

Mit freundlichen Grüßen

Kurt Wallner
Bürgermeister der Stadt Leoben





Vorwort

Magnifizenz Univ.-Prof. DI Dr.mont. Dr.-Ing.E.h. Peter Moser

Rektor der Montanuniversität Leoben

Sehr geehrte Damen und Herren,
werte Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Recy & DepoTech 2026,

es ist mir eine große Freude, Sie zur Recy & DepoTech 2026 an der Montanuniversität Leoben willkommen zu heißen. Die Konferenz zählt zu den wichtigsten europäischen Plattformen für den wissenschaftlichen Austausch in den Bereichen Kreislaufwirtschaft, Recycling, Abfallwirtschaft und Deponietechnik. Sie verbindet Wissenschaft, Industrie und Praxis und fördert Innovationen für eine nachhaltige Entwicklung.
Die Transformation hin zu einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft gehört zu den großen Herausforderungen unserer Zeit. Der verantwortungsvolle Umgang mit Ressourcen, die Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe und innovative Recyclingtechnologien sind entscheidende Voraussetzungen für Klimaschutz, Versorgungssicherheit und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit.
Die Montanuniversität Leoben hat ihre Kompetenzen im Bereich Kreislaufwirtschaft und Recycling konsequent ausgebaut und sich international als Recyclinguniversität etabliert. Im Exzellenzcluster Recycling arbeiten rund 100 Forschungsprojekte an der Rückgewinnung kritischer Rohstoffe, innovativen Recyclingverfahren und der Digitalisierung von Recyclingprozessen. Gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie entwickeln wir Technologien, die Stoffkreisläufe schließen und die nachhaltige Transformation der Industrie vorantreiben.
Ein zentrales Anliegen ist uns auch die Ausbildung jener Fachkräfte, die diesen Wandel künftig gestalten werden. Mit Studienangeboten wie Umwelt- und Klimaschutztechnik, Recyclingtechnik und Circular Engineering bereiten wir unsere Studierenden auf die Entwicklung nachhaltiger Technologien und einer ressourceneffizienten Industrie vor. Ich wünsche mir, dass sie die Recy & DepoTech in 10 bis 20 Jahren selbst gestalten werden.
Die Recy & DepoTech steht für die enge Verbindung von Forschung und Praxis. Sie bietet eine Plattform für den Austausch wissenschaftlicher Erkenntnisse, neue Kooperationen und gemeinsame Lösungen für eine zirkuläre Wirtschaft.
Mein herzlicher Dank gilt dem Organisationsteam, den Mitgliedern des wissenschaftlichen Komitees sowie allen Autorinnen und Autoren dieses Konferenzbandes. Ich wünsche Ihnen eine inspirierende Konferenz, anregende Diskussionen und viele neue Impulse für Forschung, Innovation und internationale Zusammenarbeit.

Glückauf!



Vorwort

Mag.rer.nat. Dr.techn. Ingrid Winter

Leiterin des Referates Abfall- und Ressourcenwirtschaft, Abteilung 14, Amt der Steiermärkischen Landesregierung

Die Notwendigkeit zur verstärkten Umsetzung von Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft ist unbestritten. Dass dies kein einfaches Vorhaben ist, zeigt sich an vielfältigen Herausforderungen: neue Hochleistungswerkstoffe, die mit herkömmlichen Verfahren noch nicht recycelt werden können, Schadstoffe, deren Gefahrenpotenzial neu erkannt wird und die aus den Stoffkreisläufen daher auszuschleusen sind, Marktgegebenheiten, die keine ausreichende Nachfrage nach Sekundärrohstoffen generieren, ein verstärkter Trend zu Massenprodukten aus minderwertigen Materialien mit mangelnder Recyclingfähigkeit – diese Liste ließe sich weiter fortsetzen und scheint in den letzten Jahren eher länger als kürzer geworden zu sein.

All das zeigt den großen Bedarf an neuen Zugängen und innovativen abfallwirtschaftlichen Lösungen zur optimalen Nutzung unserer Ressourcen, und zwar in allen Bereichen, von der Abfallsammlung, -aufbereitung und -behandlung über die entsprechenden Rahmenbedingungen bis hin zur Einbeziehung der relevanten Stakeholder.

Genau hier sind der Erfolg und die Bedeutung der Recy & DepoTech als Wissensdrehscheibe zu verorten. Topaktuelle Themen über alle Stufen der Abfallhierarchie werden auch heuer wieder aus den Blickwinkeln der Forschung, Technologieentwicklung und der operativen Anwendung beleuchtet und greifbar gemacht. Aus Sicht der öffentlichen Verwaltung ist dabei der breite Raum, der darüber hinaus regulatorischen Aspekten und innovativen strategischen Ansätzen eingeräumt wird, besonders wertvoll.

Herrn Professor Pomberger und seinem Team ist für das jahrelange Engagement, das der herausragenden Stellung der Recy & DepoTech zugrunde liegt, herzlichst zu danken. Allen Beteiligten an der heurigen Konferenz wünsche ich wertvolle Informationen und spannende Fachgespräche.

I. Winter



Fotos © Monihart

Vorwort

Präsidentin Gabriele Jüly

VOEB - Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe

Die Abfall- und Ressourcenwirtschaft hat sich von der klassischen Entsorgungsbranche zu einer tragenden Säule der Kreislaufwirtschaft entwickelt. Sie liefert Sekundärrohstoffe, schließt Stoffkreisläufe und leistet einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit und Resilienz des Wirtschaftsstandortes. Mit rund 31.500 Beschäftigten, knapp 3.000 Unternehmen und einer gesamtwirtschaftlichen Wertschöpfung von über 6,6 Milliarden Euro ist sie nicht nur systemrelevante Infrastruktur, sondern zugleich bedeutender Wirtschaftsfaktor in Österreich.

Als Taktgeber der grünen Transformation verbindet die Branche ökologische Verantwortung mit wirtschaftlicher Leistungsfähigkeit. Recycling, Energiegewinnung und die Rückführung wertvoller Rohstoffe in den Wirtschaftskreislauf reduzieren Abhängigkeiten von Primärrohstoffen, entlasten Energie- und Rohstoffmärkte und sind unverzichtbar für das Erreichen der Klima- und Ressourcenziele.

Gleichzeitig steht die Abfallwirtschaft vor großen Herausforderungen. Besonders deutlich zeigt sich dies bei Lithiumbatterien: Laut einer Studie der Montanuniversität Leoben befinden sich mittlerweile mehr als acht Lithiumbatterien pro Tonne Restmüll – rund 70 potenzielle Brandherde pro Sammelfahrzeug. Diese Entwicklung führt zu einer steigenden Zahl von Bränden, erheblichen volkswirtschaftlichen Schäden und verdeutlicht die Bedeutung wissenschaftlich fundierter Erkenntnisse für wirksame Gegenmaßnahmen.

Gerade hier leisten die Montanuniversität Leoben sowie die Recy- und Depotech-Konferenz einen unverzichtbaren Beitrag. Sie fördern den Austausch zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik und tragen dazu bei, Herausforderungen evidenzbasiert zu analysieren und praxisnahe Lösungen zu entwickeln.

Langfristige Lösungen erfordern das koordinierte Zusammenwirken aller Akteure. Gleichzeitig braucht es geeignete Anreizsysteme, um die Rückgabe und Verwertung von Lithiumbatterien zu fördern und wertvolle Rohstoffe im Kreislauf zu halten.

Die Recy- und Depotech-Konferenz 2026 bietet erneut eine zentrale Plattform, um Lösungen zu diskutieren und Innovationen voranzutreiben. Nur durch Zusammenarbeit wird es gelingen, die Kreislaufwirtschaft gemeinsam weiterzuentwickeln und die Zukunft verantwortungsvoll zu gestalten.





© Foto Fischer

Vorwort

Geschäftsführer Bernhard Puttinger

Green Tech Valley Cluster GmbH

Die Umwelttechnik-Branche befindet sich in einer Phase tiefgreifender Veränderungen. Geopolitische Unsicherheiten, volatile Märkte, steigende Anforderungen an die Wettbewerbsfähigkeit und der Fachkräftemangel stellen Unternehmen vor große Herausforderungen. Gleichzeitig eröffnen die Transformation hin zu einer kreislauforientierten Wirtschaft, neue regulatorische Rahmenbedingungen und der steigende Bedarf an hochwertigen Sekundärrohstoffen erhebliche Wachstumspotenziale.

Die Antwort der Branche ist Innovation. Digitale Technologien, künstliche Intelligenz und datengetriebene Lösungen werden zu zentralen Treibern einer effizienten Kreislaufwirtschaft. Sie ermöglichen präzisere Materialflussanalysen, intelligentere Recyclingprozesse und eine engere Vernetzung aller Akteur:innen der Kreislaufwirtschaft.

Im Green Tech Valley bündeln mehr als 300 Unternehmen und Forschungseinrichtungen ihre Kompetenzen, um diese Transformation aktiv mitzugestalten. Gemeinsam entwickeln sie innovative Lösungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, von der Sammlung und Logistik über moderne Sortier- und Aufbereitungstechnologien bis hin zur Rückgewinnung hochwertiger Sekundärrohstoffe und neuen zirkulären Geschäftsmodellen.

Die Recy & DepoTech ist dabei ein zentraler Ankerpunkt für den Wissensaustausch und die Vernetzung der Branche. Sie bringt führende Forschungseinrichtungen, Technologieanbieter:innen, Industrieunternehmen und Entscheidungsträger:innen zusammen, fördert den interdisziplinären Austausch und schafft den Rahmen für neue Kooperationen sowie innovative Lösungsansätze. Dem Organisationsteam rund um Roland Pomberger gebührt großer Dank dafür, dass die Recy & DepoTech sich als bedeutende Plattform für Wissensaustausch, Inspiration und erfolgreiche Zusammenarbeit etabliert hat.

Nutzen wir diese Gelegenheit, um gemeinsam Innovationen voranzutreiben und die Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft aktiv zu gestalten. Gemeinsam schaffen wir die nachhaltigen und kreislauffähigen Lösungen von morgen.





Vorwort

Präsident Hon.-Prof. (FH) DI Dr. Arne M. Ragossnig, MSc. (OU)

ISWA Austria

Mit dem Thema Kreislaufwirtschaft und der neuen Dynamik, die sich hier ergibt, gewinnen Plattformen des Austausches zwischen unterschiedlichen Stakeholdern in der Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft zunehmend an Bedeutung.
Kreislaufwirtschaft braucht den Austausch zwischen Akteuren des produzierenden Sektors, der Legistik und des Vollzugs sowie von Akteuren der Abfall- und Ressourcenwirtschaft um technisch mögliche, wirtschaftlich machbare und rechtskonforme Kreislaufwirtschaftslösungen unter Berücksichtigung internationaler völkerrechtlicher Verpflichtungen auf den Weg zu bringen.
Eine wesentliche Herausforderung in diesem Zusammenhang besteht unter anderem auch im Finetuning unterschiedlicher Rechtsmaterien, die teilweise isoliert voneinander in den letzten Jahrzehnten entstanden sind, und sich heute teilweise widersprechen und somit einer sinnvollen und für die beteiligten Akteure rechtskonformen Umsetzung der Kreislaufwirtschaft entgegenstehen. Verbesserungen und Weiterentwicklungen des wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmens für derartige Lösungen erfordern zu allererst die Bereitschaft sich auf die teils schwierigen Details einzulassen und den übrigen Stakeholdern zuzuzuhören um gemeinsam Ansätze für eine praktikable Umsetzung der Kreislaufwirtschaft zu erarbeiten.
Sowohl ISWA Austria als auch die Recy&DepoTech haben sich in den letzten Jahrzehnten bereits als effektive Plattformen für den diesbezüglichen Austausch etabliert und insofern freut es uns in diesem Jahr besonders, dass wir als ISWA bzw. ISWA Austria auf der Recy&DepoTech im Rahmen zweier Sessions Möglichkeiten und Herausforderungen für ein kreislaufwirtschaftlich sinnvolles Management des Stoffstroms der Textilien/Textilabfälle ausrichten dürfen.

Wir gratulieren den Veranstaltern der Recy&DepoTech schon jetzt zum äusserst interessanten Programm und wünschen allen Teilnehmern interessante und informative Tage in Leoben.





Editorial

Professor Roland Pomberger

Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben

Ein herzliches Leobener Glückauf zur Recy & DepoTech 2026!

Zum achtzehnten Mal trifft sich im November 2026 die abfallwirtschaftliche Community in Leoben. Die Recy & DepoTech ist einer der Leuchttürme der wissenschaftlichen Konferenzen zu den Themen der Kreislauf- und Abfallwirtschaft.

Rückblick auf 2024:
Vor 2 Jahren war die Recy & DepoTech eine der Konferenzen mit dem breitesten und dichtesten Programm zu Abfalltechnik und Kreislaufwirtschaft. Über 700 Teilnehmer:innen besuchten die Vorträge und Veranstaltungen. Die Evaluation war ausgezeichnet und bestärkt uns bei der Weiterentwicklung der Konferenz.

Ausblick:
168 Vorträge und 60 Poster stehen auf dem Programm. Firmen werden sich wieder an Messeständen präsentieren. Und wir wissen aus vielen Gesprächen: Der persönliche Kontakt und Austausch der Teilnehmer:innen ist einer der wichtigsten Gründe für die Teilnahme.

Zum Inhalt:
Neue technologische Ansätze, neue Geschäftsmodelle, neue Stoffströme, neue Verfahren, Best Practice und neue Anlagen sind die Themen dieser Recy & DepoTech.

Unser Programm:
Unsere vortragenden Expert:innen beleuchten auch heuer wieder das breite Spektrum der Abfalltechnik, Abfallwirtschaft und Kreislaufwirtschaft. Dabei liegen die Schwerpunkte sowohl auf stoffstrom-spezifischen Lösungen als auch auf aktuellen technologischen Entwicklungen.
Ein besonderer Fokus liegt auf den Themen Digitalisierung und Künstliche Intelligenz (KI), die in mehreren Sessions aufgegriffen werden. Beispiele dafür sind Sensor-based Sorting & Control sowie Deep-Learning-Ansätze in der Sortiertechnik.
Auf der Ebene der einzelnen Stoffströme widmen sich eigene Sessions den Dauerbrennern Kunststoffe und Batterien, aber auch den zunehmend relevanten Themen Textilien und spezielle industrielle Reststoffe.
Auch aus den Bereichen Deponietechnik und Altlastensanierung gibt es interessante Entwicklungen, innovative Ansätze und praxisnahe Fallbeispiele zu berichten.
Sie sehen: Die Recy & DepoTech 2026 bietet eine große thematische Bandbreite – von neuen Technologien und Methoden über innovative Lösungsansätze bis hin zu konkreten Praxis- und Fallbeispielen. Freuen Sie sich auf vielfältige Impulse und aktuelle Einblicke aus der Welt der Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Ihr Beitrag:
Die Recy & DepoTech lebt von den Menschen, die sie aktiv mitgestalten. Ihr Erfolg entsteht durch das Engagement der Programmgestalter:innen, Referent:innen, Chairpersons, Diskutant:innen und Teilnehmer:innen.
Im Mittelpunkt stehen dabei die wesentlichen Elemente eines lebendigen fachlichen Austauschs: vortragen, zuhören, diskutieren, Erfahrungen teilen und sich vernetzen. Die Recy & DepoTech schafft dafür die passende Plattform und steht auch 2026 wieder für einen offenen, wertschätzenden Austausch auf hohem fachlichem Niveau.
Ich danke Ihnen herzlich für Ihre Teilnahme und Ihr Engagement als Expert:innen aus Forschung, Wirtschaft und Verwaltung. Denn wir gestalten mit unserer Arbeit die Abfallwirtschaft und die Kreislaufwirtschaft aktiv mit.

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen und uns allen eine erfolgreiche, inspirierende und erkenntnisreiche Recy & DepoTech 2026.

Mit herzlichem Glückauf!



Organisation

Organisationsteam

Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW)
der Montanuniversität Leoben

Franz Josef-Straße 18 (Umweltschutz-Gebäude), 8700 Leoben, Österreich
Telefon: +43 (0) 3842 / 402-5103
E-Mail: rdt@unileoben.ac.at

Roland Pomberger
Tanja Trieb

Redaktion

Tanja Trieb

Kooperationspartner

Cleantech-Cluster (CTC)
Green Tech Valley Cluster GmbH
ISWA Austria – International Solid Waste Association Austria
Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes (der Montanuniversität Leoben)
MSV Mediaservice & Verlag GmbH (EU-Recycling Magazin)
Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV)
RWTH Aachen - ANTS
Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH
Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe (VOEB)
Verein zur Verleihung des Zertifikates eines Entsorgungsfachbetriebes (V.EFB)
Wirtschaftskammer Österreich (WKO) - Fachverband Entsorgungs- und Ressourcenmanagement
WtERT Germany GmbH

Wissenschaftliches Komitee

A
Helmut Antrekowitsch, Montanuniversität Leoben, Österreich

B
Rupert Baumgartner, Universität Graz, Österreich
Anke Bockreis, Universität Innsbruck, Österreich

D
Christina Dornack, Technische Universität Dresden, Deutschland

E
Martin Eisenberger, Eisenberger & Offenbeck Rechtsanwalts GmbH, Österreich

F
Martin Faulstich, Technische Universität Dortmund, Deutschland
Johann Fellner, VIRWa GmbH, Österreich
Helmut Flachberger, Montanuniversität Leoben, Österreich
Sabine Flamme, Fachhochschule Münster, Deutschland

G
Stefan Gäth, Justus-Liebig-Universität Gießen, Deutschland
Evangelos Gidarakos, Technical University of Crete, Griechenland
Kathrin Greiff, RWTH Aachen, Deutschland

H
Soraya Heuss-Aßbichler, Ludwig-Maximilians-Universität München, Deutschland
Peter Hodecek, Scholz Austria GmbH, Österreich
Christian Holzer, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft, Österreich
Clemens Holzer, Montanuniversität Leoben, Österreich
Marion Huber-Humer, Universität für Bodenkultur Wien, Österreich

K
Gernot Kreindl, Stadtgemeinde Leoben, Österreich
Rainer Kronberger, Magistrat der Stadt Wien, Österreich

L
David Laner, Universität Kassel, Deutschland
Markus Lehner, Montanuniversität Leoben, Österreich

M
Mario Mocker, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Deutschland

N
Michael Nelles, Universität Rostock // DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Deutschland

Q
Peter Quicker, RWTH Aachen, Deutschland

R
Arne Ragossnig, RM Umweltkonsulenten ZT GmbH // ISWA Austria, Österreich
Harald Raupenstrauch, Montanuniversität Leoben, Österreich
Helmut Rechberger, Technische Universität Wien, Österreich
Karl Reiselhuber, Magistrat der Stadt Wien, Österreich
Daniel Resch, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Österreich
Gerhard Rettenberger, Hochschule Trier, Deutschland
Marco Ritzkowski, HiiCCE - Hamburg Institute for Innovation, Climate Protection and Circular Economy GmbH, Deutschland

T
Stephanie Thiel, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Deutschland

U
Olga Ulanova, Technische Universität Irkutsk, Russland

V
Daniel Vollprecht, Universität Augsburg, Deutschland

W
Ingrid Winter, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Österreich
Werner Wruss, ESW Consulting Wruss ZT GmbH, Österreich

Ehrungen

Aufgrund ihrer Verdienste um die Umwelttechnik / Abfallwirtschaft in Wissenschaft und Praxis und ihrer langjährigen aktiven Mitarbeit an der Recy & DepoTech ehren und danken wir:

Mag. Elisabeth Giehser (Jahrgang 1963) ist eine österreichische Juristin und anerkannte Expertin für Abfall- und Kreislaufwirtschaft. Nach ihrer Matura studierte sie Rechtswissenschaften an der Universität Wien und schloss das Studium 1986 als Magistra der Rechtswissenschaften ab. Zu Beginn ihrer Laufbahn arbeitete sie in einer Wiener Rechtsanwaltskanzlei, bevor sie sich auf Umweltrecht und Abfallwirtschaft spezialisierte. Seit 1993 war sie in der österreichischen Abfallwirtschaft tätig und wirkte am Aufbau moderner Sammel- und Verwertungssysteme mit. 2005 übernahm sie die Geschäftsführung der Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria (EAK). Unter ihrer Leitung entwickelte sich die EAK zu einer zentralen Koordinierungsstelle für die Sammlung und das Recycling von Elektroaltgeräten und Altbatterien in Österreich. Sie setzte sich für nachhaltige Kreislaufwirtschaft, verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen und hohe Umweltstandards ein. Durch ihre Erfahrung und ihr Engagement prägte sie die österreichische Abfallwirtschaft wesentlich mit. Nach mehr als zwei Jahrzehnten als Geschäftsführerin trat sie 2026 in den Ruhestand und übergab die Leitung der EAK an ihre Nachfolge. Ihr beruflicher Werdegang steht für Fachkompetenz, Verantwortungsbewusstsein und nachhaltiges Handeln im Umweltbereich.

Prof. Dr. Stefan Gäth (geboren 1959) ist ein deutscher Agrarwissenschaftler und renommierter Experte im Bereich Abfall- und Ressourcenmanagement. Er studierte von 1979 bis 1984 Agrarwissenschaften und Geologie an der Universität Göttingen, wo er promovierte und habilitierte. 1989 wechselte er an die Justus-Liebig-Universität Gießen, an der er seit 1995 die Professur für Abfall- und Ressourcenmanagement innehat. Seine wissenschaftliche Arbeit konzentriert sich auf nachhaltige Ressourcennutzung, Stoffstrommanagement sowie innovative Verfahren zur Verwertung von Abfällen. Unter dem Motto „Einfälle für Abfälle“ setzt er sich für die Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe und eine funktionierende Kreislaufwirtschaft ein. Darüber hinaus gründete er mehrere Unternehmen und Netzwerke im Bereich Umwelttechnologie, darunter die Ecowin GmbH, die Algenland GmbH und das KompetenzNetz UmweltTechnologie (KNUT). Seit 2005 ist er Sprecher des Technologiebeirats des Landes Hessen und engagiert sich in zahlreichen wissenschaftlichen Gremien. Seine Forschungsarbeiten und sein langjähriger Einsatz haben wesentlich zur Weiterentwicklung der modernen Abfall- und Ressourcenwirtschaft beigetragen.

SC DI Christian Holzer ist ein österreichischer Umwelt- und Kreislaufwirtschaftsexperte sowie Sektionschef im Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft. Er leitet die Sektion V „Kreislaufwirtschaft, Chemie und Strahlenschutz“ und verantwortet zentrale Aufgabenbereiche der österreichischen Umweltpolitik. Nach seinem Studium an der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) absolvierte er die Ausbildung zum Diplom-Ingenieur und spezialisierte sich auf Umwelt, Ressourcenmanagement und nachhaltige Entwicklung. Im Laufe seiner Karriere sammelte er umfangreiche Erfahrungen in der öffentlichen Verwaltung und Gestaltung umweltpolitischer Maßnahmen. Seine Schwerpunkte liegen insbesondere in Abfallwirtschaft, Kreislaufwirtschaft, Ressourcenschonung und nachhaltigem Umgang mit Rohstoffen. Als Sektionschef arbeitet er an der Weiterentwicklung gesetzlicher Rahmenbedingungen und Strategien zur Förderung einer modernen Kreislaufwirtschaft in Österreich. Dabei verbindet er wissenschaftliche Grundlagen mit praktischer Umsetzung in Verwaltung und Politik. Durch seine langjährige Tätigkeit trägt er wesentlich zur Weiterentwicklung des österreichischen Umwelt- und Abfallwirtschaftssystems bei. Sein berufliches Engagement steht für die Verbindung von Fachwissen, Nachhaltigkeit und verantwortungsvoller Umweltpolitik.

Ehrenschutz

Norbert TOTSCHNIG
Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft

Mario KUNASEK
Landeshauptmann der Steiermark

Simone SCHMIEDTBAUER
Landesrätin für Land- und Forstwirtschaft, Jagd und Fischerei, Land- und forstwirtschaftliche Schulen, Wohnbau und Energie, Wasser- und Ressourcenwirtschaft, Veterinärwesen

Christian HOLZER
Sektionschef des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Kurt WALLNER
Bürgermeister der Stadt Leoben

Peter MOSER
Magnifizenz der Montanuniversität Leoben

Ingrid WINTER
Amt der Steiermärkischen Landesregierung

Daniel RESCH
Geschäftsführer des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes

Gabriele JÜLY
Präsidentin des Verbandes Österreichischer Entsorgungsbetriebe

Bernhard PUTTINGER
Geschäftsführer der Green Tech Valley Cluster GmbH

Arne RAGOSSNIG
Präsident der International Solid Waste Association

Förderungen & Firmenpartnerschaften

Förderstellen

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft
Stadtgemeinde Leoben
Steiermärkischen Landesregierung - Abteilung 14 - Referat Abfall- und Ressourcenwirtschaft

Gold-Firmenpartner

GWU Geologie-Wasser-Umwelt GmbH
HUESKER Synthetic GmbH
Lindner-Recyclingtech GmbH
RM Umweltkonsulenten ZT GmbH
Siemens AG Österreich

Silber-Firmenpartner

Altstoff Recycling Austria AG
Breitenfeld Edelstahl AG
Saubermacher Dienstleistungs AG
Scholz Austria GmbH
Stadler Anlagenbau GmbH

Bronze-Firmenpartner

Alpacem Zement Austria GmbH
BALSA GmbH
EWP Recycling Pfand Österreich gGmbH
Holding Graz
RHI Magnesita GmbH

Messestände
2nd Cycle FlexCo & Circulyzer GmbH
AGROTEL GmbH
axtesys GmbH
ELCEE GmbH
Entsorgungstechnik BAVARIA GmbH
Kammer der Ziviltechniker:innen für Steiermark und Kärnten
Komptech GmbH
LAMBDA Gesellschaft für Klimaschutz und regenerative Energien mbH
Montanuniversität Leoben - Projekt KIRAMET
Next Generation Elements GmbH
Ovive GmbH
PORR Umwelttechnik GmbH
SAMsoric GmbH

(Stand 21. September 2026)



SIEMENS

SICHER MIT SIEMENS

Mit Sicherheit **Wertstoffe zurückgewinnen**

Unsere digitalen Lösungen für die Recyclingindustrie machen Anlagen effizienter, sicherer und unterstützen den Aufbau einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft. Wir bieten Ihnen maßgeschneiderte Technologien für alle Herausforderungen des Recyclings. Mit Sicherheit Siemens.
#TransformTheEveryday

siemens.at

Inhaltsverzeichnis Festvortrag & Plenarvorträge

Wie bewältigen Mega-Citys ihre Abfallprobleme?
Kerstin Kuchta *61*

Verhalten von PFAS in der Siedlungsabfallverbrennung – Ergebnisse einer großtechnischen Messkampagne
Daniel Wohter, Anna Holfelder, Ragnar Warnecke, Hans-Joachim Gehrmann, Dieter Stapf & Peter Quicker..... *67*

Asbest! Was verträgt die Kreislaufwirtschaft?
Roland Pomberger, Frank Melcher & Klaus Philipp Sedlazeck *81*

Inhaltsverzeichnis Vorträge

Rechtliche Aspekte

Kreislaufwirtschaft im Umbruch – administrative Hürde oder gerechtfertigtes Mittel?
Tatjana Katalan *89*

Kreislaufwirtschaft – aber wie?
Wolfgang Klett *95*

Zurück in die Zukunft – Reverse-Logistik als zentrales Instrument der Kreislaufwirtschaft
Thomas Enderlein *103*

Circular Economy braucht ein Deponieverbot
Werner Bauer *111*

Im Namen des Naturschutzes
Martin Eisenberger *117*

Die Herausforderungen der neuen EU-Altfahrzeugeverordnung an die Recyclingindustrie
Peter Hodecek *123*

Aktuelles zur UVP in der Abfallwirtschaft
Christoph Cudlik & Patrick Petschinka *129*

Auswirkungen der Novellierung der Grenzwerteverordnung für den Verwertungsorientierten Rückbau
Uliana Moroz, Arne M. Ragossnig & Simon Muralt *135*

Pfand & Ökomodulation

Ökomodulation und Recyclingfähigkeit im österreichischen Einwegpfandsystem – Kreislaufwirtschaft von der Theorie in die Praxis
Monika Fiala, Katharina Reuck & Stephan Kern *141*

Modulation der Teilnahmegebühren an Sammel- und Verwertungssystemen auf Basis des Produktpasses
Walter Hauer *147*

Abfall- & kreislaufwirtschaftliche Perspektiven

Einfach nur „abfall-artig“
Torben Kraffczyk *151*

Kreislaufwirtschaftsrechte für Sekundärrohstoffe!
Christine Bertl *155*

Abfallwirtschaft als Treiber der Kreislaufwirtschaft – Drei sokratische Lehrgespräche über Deutungshoheit
Ulrike Gelbmann, Martina Zimek & Josef-Peter Schöggl *161*

Siedlungsabfälle

Littering in Österreich 2025 – Aufkommen gelitterter und über öffentliche Abfallbehälter erfasster Abfälle
Peter Beigl, Benedikt Vay, Gudrun Obersteiner, Victoria Menedetter, Christian Pladerer & Gerhard Fritz *167*

Innovative Strategien zur Steigerung der stofflichen Verwertungsquoten von Sperrmüll
Robert-Balthasar Wudtke, Simon Ballüer, Yuwei Chang, Sreekar Babu Malli, Sangit Kadu & Jantje Samtleben *173*

Biobased Processes

Turning organic urban waste into bioplastics and single-cell protein by gas fermentation
Maximilian Lackner, Charles Moritz, Philipp Zanaschka, Michael Stadlbauer & David Drew *181*

Composting trials of certified degradable plastics - Comparison of rotting conditions in mesh bags compared to open windrow composting
Christian Zafiu, Benedikt Vay, Maximilian Straka & Erwin Binner *187*

Textiles

Tsunami oder perfekte Welle? Wie die EU-Textilgesetzgebung neue Spielräume für Nachhaltigkeit und Innovation eröffnet
Andreas Bartl *195*

Josef Ressel Centre ReSTex – an interim report
Christian B. Schimper, Birgit Herbinger, Judith Rudolf-Scholik, Agnes Grünfelder, David Lilek, Felice Quartinello, Jeannie Egan, Georg M Gübitz, Eva Sykacek, Andreas Mautner, Thomas Rosenau, Nika Depope & Andreas Bartl *201*

Sammel- und Sortierkonzepte für recycelbare elastische Textilien mit thermoplastischen Copolyester-Elastomeren
Ricarda Wissel, Jasmin Roos & Thomas Gries *207*

Warum Textilsortierung so kompliziert ist?
Annika Ludes, Elias Pfund, Tobias Dietl & Bastian Küppers *213*

Textilrecycling als Pionierfeld der Kreislaufwirtschaft: Marktkomplexität und Umsetzung in der Praxis
Eva-Maria Wurzer & Herwig Pfeiffer *219*

Strukturen und Strategien zur Einrichtung eines nachhaltigen EPR-Systems für Textilien in Österreich
Peter Beigl, Astrid Allesch, Elisabeth Schmied, Andreas Bartl, Sebastian Rosenbusch & Marion Huber-Humer *225*

Bewertungsaspekte

Ressourceneffizienz – Ein Ansatz zu deren Bemessung
Stefan Gäth *229*

Methodenkonzept zur Durchführung gebündelter Abfallanalysen zur Überprüfung der Diskrepanzen zwischen in Verkehr gebrachten Stoffstrommengen und davon ordnungsgemäß zurückgeführten Abfallmengen
Bertram Zwisele & Leonie Theresia Wachtler *233*

Systematische Auswahl sozialer Aspekte zur Nachhaltigkeitsbewertung technischer Prozesse mittels social Life Cycle Assessment
Theresa Angerler, Klaus Doschek-Held & Julia Graf *237*

Vom Alltag zur CO_2-Bilanz: Digitales Tool und erste Haushaltserhebungen für klimafreundlichen Konsum
Elisabeth Schmied, Silvia Schütz & Gudrun Obersteiner *243*

Internationale Abfallwirtschaft

Beprobung der Textildeponien in der Atacama Wüste
Sebastian Rosenbusch, Andreas Bartl & Gabriela Veronica Aguirre Martinez *247*

Setting Recycling Rates: Gut Feeling versus Scientific Rationale
Helmut Rechberger & Stefani Rivić *251*

Abfallanalysen als Beitrag für kreislaufwirtschaftliche Strategien
Victoria Menedetter & Christian Pladerer *255*

CO_2-Abscheidung

Österreichische Carbon Management Strategie
Markus Lehner *259*

Erschließung neuer Verwertungspfade für mineralische Reststoffe als CO_2-Senke durch wässrige Karbonatisierung
Sarah Reiter, Sophie Zotter, Leo Buchegger & Markus Lehner *263*

Recycling mineralischer Feinfraktionen für die Verwendung in Betonen
Lina Baacke, Niklas Kappelt & Björn Siebert *267*

Elektroaltgeräte

Materialtrends in Leiterplatten von Mobiltelefonen: Industriemetalle statt Edelmetalle auf kleinerer Fläche (1998–2021)
Aleksander Jandric, Lukas Ginzinger & Stefan Salhofer *273*

Zerstörungsfreie Bestimmung versorgungskritischer Rohstoffe und Sortierung mittels PGNAA am Beispiel von Elektroaltgeräten und Metalllegierungen
Helmut Spoo *277*

KiRAMET: Leitprojekt zum Schrottrecycling

Schraubenzieher sucht Standard-Schnittstelle – Demontage eines E-Fahrzeugs im Praxis- und Realitätscheck
Alexia Tischberger-Aldrian, Felix Scheidl, Walter Martinelli, Yves Radmann, Klemens Winkler, Felix Strohmeier & Gerald Koinig *283*

Smart Waste – Process Assessment Supported by Digital Product Passes
Klemens Winkler, Felix Strohmeier & Alexia Tischberger-Aldrian *289*

Sortierung E40-Schrott
Gerald Koinig & Alexia Tischberger-Aldrian *295*

KI-Monitoring

From Truck Bed to Chemistry: Benchmarking Segmentation Algorithms for Accurate Scrap Characterization in Sustainable Steelmaking
Florian Egger, Klemens Winkler, Bernard Ennis & Frank Schrama *301*

Applying Statistical Process Control (SPC) to Sensor-Based Monitoring of Mobile Construction Demolition Waste (CDW) Streams
Luz Alejo, Lieve Göbbels, Alexander Feil, Karoline Raulf & Kathrin Greiff *307*

Smartphone-Based Deep Learning for Real-Time Quality Assessment in Glass Recycling
Cornelia Adami *313*

Digitalisierungsplattformen

recAIcle – Praxis statt Vision: KI-Assistenz für die manuelle Abfallsortierung
Julian Aberger, Barbara Mayer & Renato Sarc *317*

DiGiDO vernetzt: VEBS, DIWASS, WasteX und eFTI als digitale Infrastruktur für eine resiliente Kreislaufwirtschaft
Constantin Gessner *323*

Der Weg zum digitalen Begleitschein 2027: Eine flexible Open-Source ERP-Lösung für die Abfallwirtschaft am Praxisbeispiel der R&K GmbH
Rainer Saga & Wolfgang Ammerer *327*

Kunststoffrecycling

Quantifizierung von Recyclingpotenzialen für Post-Consumer Polypropylen mittels Abfallcharakterisierung und Materialflussanalyse
Sarah Schmidt, Mohammed Hafis Veralikkattil Assainar, Chaimae Chettouh, Victoria Goetjes, Hans-Peter Heim & David Laner *333*

Dekontamination und Entfärbung im lösemittelbasierten Recycling von Polyethylen aus flexiblen Verpackungsabfällen
Johannes Schneider & Petra Schmid *337*

Einfluss unterschiedlicher Prozessstufen des mechanischen Recyclings auf die Eigenschaften von Polypropylen-Rezyklaten
Hannah Zeilinger, Franz Rittmannsberger & Jörg Fischer *343*

Transformation der Kunststoff-Wertschöpfungskette durch Überwindung technologischer Reinheitsbarrieren bei PC-PO als Lösung zur Erfüllung der für 2040 geforderten PPWR-Quote
Johanna Langwieser, Verena Pardametz & Franz Rittmannsberger *349*

Der Beitrag von rPS4FoodPackaging zur erfolgreichen Lebensmittelzulassung recycelter Polymerisate
David Mittermayr, Sandra Czaker, Alexander Felgel-Farnholz & Joerg Fischer *355*

Nutzung von Eigenschaftsprofilen bei der sensorbasierten Sortierung von Kunststoffen
Nikolai Kuhn, Moritz Mager, Gerald Koinig, Jörg Fischer & Alexia Tischberger-Aldrian *359*

Entwicklung einer Methodik zur Erhebung des Kunststoffanteils in EAG hinsichtlich der Ermittlung des Kunststoffrecyclingpotenzials
Ralf Brüning, Florian Witt & Christian Kitazume *365*

Charakterisierung der Heterogenität von PP post-consumer Verpackungsabfällen: Implikationen für Objekt- und eigenschafts-basierte Flakesortierung
Moritz Mager, Nikolai Kuhn, Alexander Felgel-Farnholz & Jörg Fischer *371*

Im Kreis, aber unter Beobachtung: Zyklische Degradation von Kunststoffrezyklaten
Matthias Frühwirth & Nina Krempl *375*

Future Waste

Future Waste – Ein Begriff zwischen inflationärer Verwendung und realer wissenschaftlicher Bedeutung
Thomas Nigl *381*

Optimierung der mechanischen Eigenschaften recycelter Kurzglasfaser aus geschredderten Windradflügeln und Post-Industrial Abfall in Epoxidharz Platten
Bianca Purgleitner & Christoph Burgstaller *387*

A green alternative to aqua regia for platinum recovery from PEM electrolyser stacks
Richard Yaw Nti, Veronika Kanzler, Lea A. Brandner & Thomas Nigl *393*

Kunststoffkomponenten aus Elektrofahrzeugen: Materialzusammensetzung und Verwertungspotenziale
Philipp Schetter & Sabine Flamme *399*

Machine Learning & Computer Vision

Sensorik, Daten, Algorithmik: Vision-Pipelines für KI im Recycling
Alexander Eckert, Laurin Ginner, Nicole Brosch, Filip Hendrichovsky & Rita Ebner *405*

Digitaler Zwilling für modulare Sortieranlagen: Partikelbasierte Optimierung für die Verwertung von Elektro(nik)-Altgeräten
Malte Vogelgesang, Alice do Carmo Precci Lopes, Emanuel Ionescu & Liselotte Schebek *411*

Objektbasierte Sortierung von Alttextilien nach Produktkategorien mittels KI-gestützter Modelle im Technikumsmaßstab
Hannah Weber, Gerald Koinig, Verena Schmid, Felix Scheidl, Thomas Fink & Alexia Tischberger-Aldrian *417*

Lithium-Ionen-Batterien: Vom Problemstoff zum Wertstoff

KI-basiertes Röntgensortiersystem zur Detektion von Lithium-Ionen-Akkus im LVP-Abfallstrom – Aktuelle Erkenntnisse aus dem Testbetrieb
Johannes Leisner, Michael Kalb, Alexander Ennnen, Lara Jürgens & Jochen Ebbbing *423*

Kick it, pick it: KI-gestützte Batterieausschleusung aus gemischten Siedlungsabfällen mit Kickereinheit und Robotik
Nina Nowak, Michael Autischer & Thomas Nigl *427*

Ohne Kontext wert- und sinnbefreit – Recyclingeffizienzkennzahlen im Batterierecycling zwischen Messung, Annahmen und Realität
Bettina Rutrecht & Thomas Nigl *435*

Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

Optimierung der Separator Abtrennung im Lithium-Ionen-Batterie Recycling – überarbeiteter TUBAF-Prozess
Simon Franz Bendl, Alexandra Kaas, Thomas Mütze & Urs Alexander Peuker *439*

Einbindung biohydrometallurgischer Strategien in das hydro-metallurgische Recycling von Lithium-Ionen-Batterien
Reinhard Lerchbammer, Matthias Mandl, Luca Kolonovits & Eva Gerold *445*

Chemical characterisation of black mass resulted from crushing lithium-ion-batteries – Interlaboratory comparison study of the characterisation of black mass
Cornelia Rutkowski & Thomas Nigl..... *451*

Verbrennungsanlagen & Rückständen

Developing TEO – advanced waste incineration and residual management for the municipality of Ljubljana
Nora Fricko, Dominik Gappmaier, Bernhard Kronberger, Franz Peter Walder & Gregor Golja *455*

Kupferspeziierung in Rostaschen aus der Verbrennung von Siedlungsabfällen
Philipp Hänggi, Gisela Weibel, Mirjam Wolffers, Alexander Weh, Rainer Dähn & Sergey Churakov *461*

Metallrecycling

Rohstoffsicherung durch Zirkularität: Potenziale und Grenzen pulver-metallurgischer Recyclingrouten für Schnellarbeitsstahl und NdFeB-Magnete
Kathrin Greiff, Jacqueline Rosefort, Wiebke Hagedorn & Anna-Caroline Assmann *465*

Vom Aufbereitungsrückstand zum Wertstoff: Scherensand als Baustein einer zirkulären Stahlindustrie
Paul Demschar, Thomas Kremlicka & Klaus Philipp Sedlazeck *471*

Innovative Prozesskonzepte zur Metallrückgewinnung und Recycling von gebrauchten Feuerfestmaterialien aus der Nichteisenmetallurgie
Simone Sedlazeck, Wolfgang Premm, Stefan Steinlechner, Alexander Leitner, Dean Gregurek & Andreas Köck..... *477*

Rückgewinnung wertvoller Ressourcen aus sekundären Rohstoffen mittels Bioleaching im Pilotmaßstab
Clemens Habermaier, Sabine Spiess, Erik Viertauer, Christoph Thaler, Ludwig Birklbauer, Nina Neuwirth & Marianne Haberbauer *483*

Aufbereitung sekundärer, feindisperser Hüttenzwischenprodukte – Von der Machbarkeit zum Anlagenkonzept zur Inbetriebnahme
Stefan Jäckel & Justus Ihle..... *489*

Zinc flexible RecoDust process
Wolfgang Reiter, Klaus Doschek-Held & Christoph Thaler *491*

Photovoltaik: ReUse, Recycling & Nutzung

WattsOK? Reuse und Recycling von PV-Modulen – technologische und ökologische Entscheidungsgrundlagen
Simon Prüller, Therese Bouvier-Schwarz & Thomas Nigl *495*

Bewertung innovativer Recyclingtechnologien für Photovoltaikmodule im Vergleich zum Stand der Technik – Entwicklung einer Bewertungsmethodik im Forschungsprojekt PVReValue
Ferozan Azizi, Sonja Feldbacher & Thomas Nigl *503*

Sondierung einer PV-Anlage auf einer in der Nachsorge befindlichen städtischen Deponie
Gernot Kreindl, Arne M. Ragossnig, Alois Kraußler, Marlies Hrad & Michael Obriejetan *511*

Nassaufbereitung

Die Circulyzer-Technologie – Der Weg vom Universitätslabor in die Fabrikhalle
Daniel Schwabl & Markus Bauer *517*

Friktionswäsche von PP-Flakes: Optimierung von Wasserverbrauch, Temperatur und Waschwasserreuse im Pilotmaßstab
Theresa Plesch, Mauricio Pane, Vipul Verma, Stefani Ozi, Moritz Mager, Jörg Fischer & Bettina Muster-Slawitsch *523*

Technologieoptimierte Nassaufbereitung im Kunststoffrecycling: Membranverfahren zur Kreislaufführung von Waschwasser
Eva Moritz, Jürgen Müller, Jasmin Schluz & Alexander Rinderhofer *531*

Aufbereitung – Use Cases

Innovationen in der Praxis: Intelligente Anlagen und neue Stoffströme
Sabine Schlögl, Wolfgang Köser, Tom Schmitt, Bastian Küppers, Xiaozheng Chen & Nils Kroell *537*

Rückgewinnung von Glas aus Restmüllverbrennungsaschen für die Verpackungsglasindustrie
Christoph Schipfer, Gerhard Stockinger & Benedikt Sonnweber *543*

From Pilot-Scale Insights to Plant-Level Validation: Factors Influencing Ballistic Separator Performance
Alena Maria Spies, Annika Datko, Peter Bardenheuer, Abtin Maghmoumi, Karoline Raulf & Kathrin Greiff *547*

Sensorbasierte Technologien

Optimizing Preprocessing Pipelines for Near-infrared Hyperspectral Images to Enhance Classification Accuracy in Post Consumer Light-weight Plastic Packaging Waste Stream
Abtin Maghmoumi, Luz Alejo Alvarez, Alexander Feil & Kathrin Greiff *553*

Quality monitoring of recycled plastics – automatic inline prediction of plastics composition using Near-infrared spectroscopy
Jutta Geier, Katarina Marković, Márton Bredács, Mithun Goswami, Elisabeth Dippold, Juan Torres, Michael Jerabek & Gernot Oreski *561*

Fast on-site asbestos detection for construction and demolition waste using a miniaturized handheld near-infrared sensor
Felix Kronenwett, Georg Maier, Thomas Längle, Norbert Leiss & Volker Thome *565*

Detection and Sensor-Based Sorting of Tar containing Road Debris using Mid-Wave-Infrared Hyperspectral Imaging
Paul Bäcker, Georg Maier & Thomas Längle *571*

Detektion von Holzschutzmitteln mit XRF-Sensorzeile - Implikation für die Inline-Sortierung von Altholzstoffströmen
Moritz Ottenweller *577*

Alignment von Sensordaten für die Sensorfusion in der Echtzeit-Abfallanalytik und sensorgestützten Sortierung
Karim Khodier, Martin Leitgeb & Rainer Saga *583*

Geförderte Altlastenforschung

PFAS-Eliminierung durch kombinierte Prozesstechnologie von Flotation und elektrochemischer Oxidation im Feldmaßstab
Josefine Pfeiffer, Peter Müller, Robert Mischitz, Florian Klapal & Mark Hlawitschka *587*

Mikrobielle Sanierung von mit LCKW belastetem Grundwasser mit lebensmitteltauglichen Biotensiden
Roman Prantl, Daniel Ruech & Thomas Reichenauer *593*

Deponietechnik

PFAS – Entfernung im Sickerwasser – Erfahrungen aus der Praxis
Frank Natau & Matthias Berg *599*

Umwelttechnische und ökobilanzielle Bewertung des Rückbaus von DK0-Deponien
Lea Hoffmann, Daniel Vollprecht & Jan Paul Lindner *605*

Deponieraumschonung und Emissionsreduktion durch optimierte Ablagerung von Verbrennungsrückständen
Alexander Weh, Gisela Weibel, Philipp Hänggi & Patrick Kämpfer *611*

Deponie auf Deponie: Planung, Bau und Betrieb eines DKI-Standortes auf einer stillgelegten DKII-Deponie
Detlef Löwe & Roland Haubrichs *617*

Altlastensanierung

Forschungsvorhaben RE-LAND: Altlastenstandorte und kontaminierte Flächen als Ressource
Daniela Sager, Christian Blothe & Soraya Heuss-Aßbichler *623*

In-situ Sanierung eines Chromatschadens auf dem ehem. Schoch-Areal in Stuttgart mittels innovativer Injektionstechnik
Daniel Ruech, Kristina Schenk & Thomas Ertel *629*

Enabling the purification of PFAS-contaminated fine fractions: Lab scale experiments on soil washing
Samuel Griza, Benjamin Faigle, Jamie Afghani, Nico Mumm, Clarissa Kellner, Martin Draws, Marcellus Birkenmeier, Jan Paul Lindner, Ferhat Kaya, Claudia Traidl-Hoffmann & Daniel Vollprecht *637*

Deponienachsorge

Langzeitauswirkungen der in-situ-Belüftung in der Deponienachsorge: Eine österreichische Fallstudie
Marlies Hrad & Marion Huber-Humer *641*

Aktueller Stand zur Ermittlung von Deponiegaspotenzialen und der praktischen Bestimmung der Deponiegaserfassung – ein Nachfolgebeitrag
Jürgen Forsting, Melina Simon & Konstantin Meier *647*

Ermittlung der Gasbildungsrate an Deponien zur Bestimmung des Erfassungsgrades
Gerhard Rettenberger *657*

Spezielle Aufbereitung

Sleeves - Einblicke über das Trennverhalten von Konsument*innen bei gesleevten Verpackungen
Naruporn Wootthikanokkhan, Manuel Pfitzner, Martin Novak, Alexia Tischberger-Aldrian, Vasiliki-Maria Archodoulaki, Norbert Fenkart, Julia Lettner, Manuel Seifert & Viktoria Helene Gabriel *661*

Untersuchungen zur sortenreinen Trennung von Schleifkörnern aus kunstharzgebundenen Schleifwerkzeugen
Claudia Maurer, Samuel Griza & Daniel Vollprecht *667*

Kreislaufwirtschaft in der Praxis am Beispiel des Lösemittelrecyclings in der Halbleiterindustrie
Roman Pöltner & Jonathan Welte *671*

Alternative Baustoffe

Der Weg zu einer CO_2-neutralen Zementklinkerproduktion: Vom Laborversuch bis hin zur industriellen Umsetzung
Wolfram Waldl, Cornelia Bauer, Florian Gomernik & Helmut Flachberger *675*

Verwertung von MVA-Rostasche in Betonanwendungen
Gisela Weibel, Alexander Weh, Philipp Hänggi & Patrick Kämpfer *679*

Innovative Bindemittelkomponenten in Beton – Auswirkungen von thermochemisch aufbereiteten Mineralwolleabfällen auf Festigkeiten und Dauerhaftigkeiten
Sarah Steiner, Anna Krammer, Gerold Schnedl, Klaus Doschek-Held, Martin Billes & Theresa Sattler *685*

Innovative Baustoffe - Geopolymere

Nachhaltiges Bauen durch den systematischen Einsatz von recycelten Baumaterialien am Beispiel des Abfallwirtschaftszentrums Harrislee
Peter Riegl & Holger Bratz *691*

Untersuchung der thermischen Stabilität von reststoffbasierten Geopolymeren für Anwendungen im Hochtemperaturbereich
Klaus Doschek-Held, Anna Krammer, Christina Atzenhofer & Cyrill Grengg *697*

Kreislaufwirtschaftliche Herstellung löslicher Alkalisilikate aus SiO_2-reichen Abfällen
Cyrill Grengg, Florian R. Steindl, Sara Raič & Martin Dietzel *703*

Schlacke

Neue Verfahrensansätze zur Verwertung von Stahlwerksschlacken
Sebastian Keber *709*

CreeS – Chromreiche Schlacke für die Zementindustrie nutzbar machen!
Florian Feucht, Anna Krammer, Alexander Halwax, Klaus Doschek-Held & Philipp Sedlazeck *713*

Phosphorrückgewinnung von thermisch vorbehandeltem Klärschlamm in einem induktiv beheiztem Schüttschichtreaktor
Christoph Gatschlhofer, Zlatko Raonic, Florian Steindl, Michael Meyer, Anna Christine Krammer, Harald Raupenstrauch & Klaus Doschek-Held *719*

PFAS

Erste Erkenntnisse bei der Umsetzung der „PFAS-Strategie Altlasten“
Gernot Döberl, Hanna Kobald, Birgit Moser, Markus Ausserleitner, Melanie Maltschnig & Martin Weisgram *725*

Entwicklung einer vollautomatisierten Online-SPE-LC-MS/MS Methode zur Bestimmung von PFAS in wässrigen Proben: Herausforderungen und methodische Fallstricke
Oliver Mann, Lilit Ispyrian, Daniel Tomsik, Oskar Schlesinger & Werner Wruss *729*

PFAS als Pfadfinder – der lange Weg von der Schadenserkundung zur Sanierung
Kai-Uwe Ulrich & Dieter Poetke *735*

Permeable reaktive Schadstoffbarriere für die Sicherung PFAS-belasteter Böden in der Deponie oder im Feld
Christoph Schmüdderich, Herbert Lassnig & Stefan Niewerth *743*

Behandlung PFAS-belasteter Grund-, Deponie- und Bodenwaschwässer mithilfe einer innovativen Verfahrenskombination
Robert Mischitz, Peter Müller, Martin Nagy, Josefine Pfeiffer, Lukas Sitz & Florian Sommerauer *749*

In situ Sanierung eines PFAS-Schadens durch Biopolymerelution
Anja Wilken & Miriam Kunz *757*

Sanierungsmaßnahmen PFAS-Altlast am Flughafen Salzburg
Hartwig Kraiger & Hans Christian Haslauer *761*

PFAS-Verunreinigung der Altlast ST37 Feuerwehrschule Lebring – ein Fallbeispiel
Elisabeth Winkler, Jürgen Maier & Sara Lang *767*

Vermeidung & ReUse

Das transparente Krankenhaus: Abfallwirtschaftliche Untersuchungen im Gesundheitswesen
Jörg Woidasky, Anton Vielsack, Franziska Zecha, Tobias Viere & Anne-Kathrin Cassier-Woidasky *775*

Ein neues Bauteil aus alten Rotorblättern - Geht das? Bauteilrecycling von Windkraftrotorblättern
Ina-Marie Orawiec, Lina-Sophie Achilles, Matthias Oppe & Andreas Büter *781*

Zehn Jahre Social Urban Mining mit BauKarussell – reale Wirkungen, Schlussfolgerungen und Learnings
Markus Meissner, Thomas Romm, Sonja Zumpfe, Andreea Crudici & Jasmin Bermadinger *787*

Baustoffrecycling

Umsetzung und Betriebserfahrung der ersten österreichischen Gipsrecyclinganlage
Monika Döll *793*

Beurteilung von Gipskartonabfällen im Zusammenhang mit dem Deponierungsverbot – ein erster Erfahrungsbericht
Arne M. Ragossnig & Uliana Moroz *795*

Smarte Ressourcennutzung

KI-basierte Erkennung des Zusammenhangs zwischen Chemismus und Auslaugbarkeit mineralischer Nebenprodukte und Abfälle (KIA)
Kai Ernst & Daniel Vollprecht *803*

Zirkulär bauen: Bestand erhalten, Kreisläufe schließen
Christina Dornack, Claudia Kemfert, Mechthild Baron, Leonie Dahlmann, Hermann Keßler, Julia Michaelis, Eva-Maria Schatz, Ina Sieber & Bendix Vogel *809*

From Mineral Signals to automated Rock Classification: Circular Use of excavated Materials using multimodal Raman Spectroscopy
Martin J. Findl, Sai P.R. Gottam, Daniel Schneider, Daniel E. Sandu, Elmar Rueckert, Robert Galler, Roland Pomberger & Klaus P. Sedlazeck *815*

Biogene Abfälle

Analyse der Wiener Bioabfallwirtschaft unter Berücksichtigung der soziologischen, rechtlichen, ökonomischen und technischen Faktoren
Wojciech Rogalski *819*

Lebensmittelabfallvermeidung in der Schulverpflegung
Gudrun Obersteiner, Katharina Hofer, Sandra Luck, Reinhold Ottner & Elisabeth Schmied ... *825*

Neue technische und psychologische Methoden bei der Abfallsammlung und ihre Wirkung auf die Trennung
Martin Wellacher ... *833*

EU Biochar LIFE „Siebüberläufe als Kohlenstoffspeicher im Kompostzyklus"
Daniela Meitner, Gerald Dunst, Thorsten Groeneveld & Patrick Stumm ... *839*

Plastic-Free-Compost: Eine kreislauforientierte Betrachtung zur Verbesserung der Kompostqualität
Josef Adam, Martin Wellacher, Gernot Kreindl, Andreas Kunter, Alexandra Loidl, Franz Poschacher, Georg Weingrill & Andreas Zöscher ... *843*

Vererdungsanlagen in Österreich
Antonia Bernhardt, Christian Neubauer, Maria Tesar & Vincent Wörndl ... *849*

Klärschlamm & Phosphor

Zwischen Nährstoffrückgewinnung und Schadstoffrisiken: Bioabfall und Klärschlamm im Fokus
Anke Bockreis & Lívia Hökl ... *853*

Ressourcen-Klassifikation UNFC als Bewertungsrahmen für Phosphorrückgewinnungsprojekte aus Klärschlamm
Soraya Heuss-Aßbichler, Ludwig Hermann & Juan Antonio Munizaga-Plaza ... *859*

Machbarkeitsanalyse zur Nachrüstung eines thermochemischen Phosphorrecyclingverfahrens für bestehende Mono-Klärschlammverbrennungsanlagen
Jakob Hirsch ... *865*

Circular Business

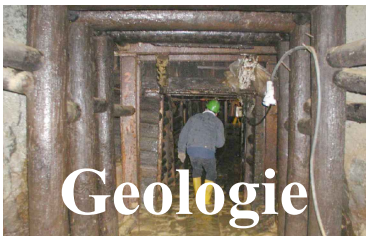
Innovating Circular Business Models through Collaboration and Digital Technologies to extend Product Life Cycles
Romana Rauter & Anika Schmitt ... *869*

Innovative und nachhaltige Geschäftsmodelle für Maschinen der Abfallwirtschaftsbranche am Beispiel von Komptech
Jochen Mandl, Ewald Konrad & Bernd Walter ... *875*

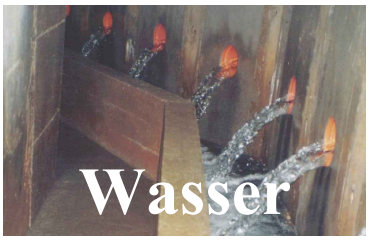
Circular Industries

Der Circular Economy Act der EU – überfälliger Neustart für Europas Ressourcenpolitik
Gregor Biley ... *879*

Kompetenz in ...



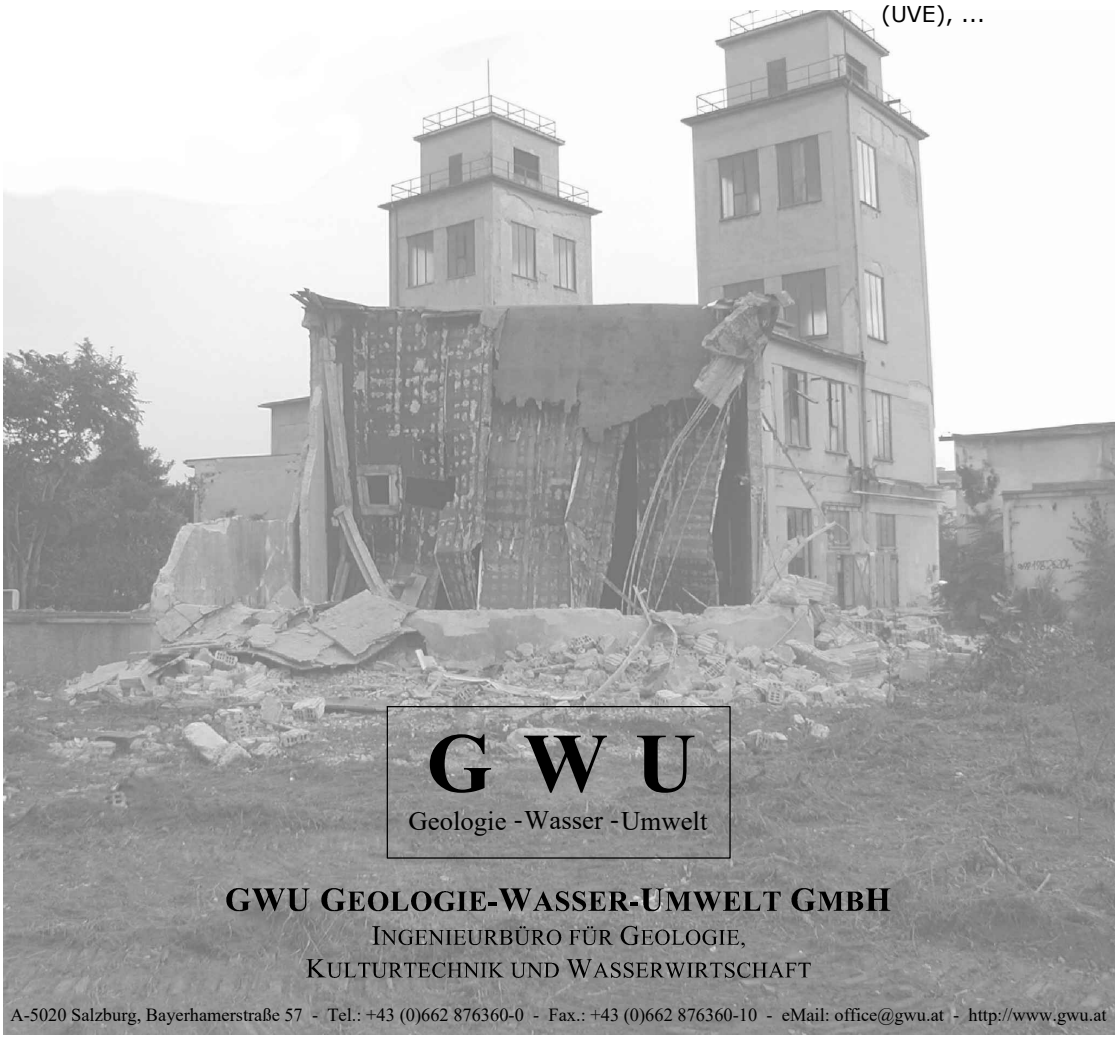
Geologische Dokumentation
und Beratung,
Kartierung,
Baugrunderkundung,
Bohrbetreuung,
Geologische Gutachten für
alle Planungsphasen,
Steinschlagsimulation (2D+3D),
Naturgefahrenbewertung, ...



Wasserwirtschaftliche
Beweissicherung,
Hydrogeologische Gutachten,
Planungen für Trinkwasserver-
und Abwasserentsorgung,
wasserrechtliche Bauaufsicht,
Baustellenkoordination,
Erdwärmenutzung, ...



Abfall- und Aushubbeurteilung,
Schad- und Störstofferkundung,
Erkundung / Sanierung
PFAS-Kontamination,
Verdachtsflächenerkundung,
Altlastensanierung,
Grundstücksbewertung,
Deponieplanung und -aufsicht,
Ausgangszustandsbericht gem.
Industrieemissionsrichtlinie,
Umweltverträglichkeitserklärung
(UVE), ...



G W U
Geologie -Wasser -Umwelt

GWU GEOLOGIE-WASSER-UMWELT GMBH
INGENIEURBÜRO FÜR GEOLOGIE,
KULTURTECHNIK UND WASSERWIRTSCHAFT

A-5020 Salzburg, Bayerhamerstraße 57 - Tel.: +43 (0)662 876360-0 - Fax.: +43 (0)662 876360-10 - eMail: office@gwu.at - http://www.gwu.at

Index English abstracts of keynote & plenary lectures

How do megacities tackle their waste problems?
Kerstin Kuchta *887*

Behaviour of PFAS in municipal waste incineration – results of a large-scale measurement campaign
Daniel Wohter, Anna Holfelder, Ragnar Warnecke, Hans-Joachim Gehrmann, Dieter Stapf & Peter Quicker..... *888*

Asbestos! Testing the Limits of the Circular Economy
Roland Pomberger, Frank Melcher & Klaus Philipp Sedlazeck *889*

Index English abstracts of lectures

Legal Issues

Circular Economy in Transition – Administrative Burden or Justified Instrument?
Tatjana Katalan *890*

Back to the Future – Reverse Logistics as a Key Instrument of the Circular Economy
Thomas Enderlein *891*

Circular economy – but how?
Wolfgang Klett *892*

The Circular Economy Needs a Landfill Ban
Werner Bauer *893*

In the Name of Nature Conservation
Martin Eisenberger *894*

The challenges of the new EU End-of-Life Vehicles Regulation for the recycling industry
Peter Hodecek *895*

Recent Developments in Environmental Impact Assessment for the Waste Management Sector
Christoph Cudlik & Patrick Petschinka 896

Impacts of the amendment to the Austrian Ordinance on Occupational Exposure Limits (GKV) on recovery-oriented building deconstruction
Uliana Moroz, Arne M. Ragossnig & Simon Muralt *897*

Deposit & Environmental Modulation

Eco-Modulation and Recyclability in the Austrian Single-Use Deposit Return System – Circular Economy from Theory into Practice
Monika Fiala, Katharina Reuck & Stephan Kern *898*

Adjustment of participation fees for collection and recycling systems based on the product passport
Walter Hauer *899*

Perspectives on Waste Management & Circular Economy

Simply wasted
Torben Kraffczyk *900*

Circular Economy Rights for Secondary Raw Materials!
Christine Bertl *901*

Waste Management as a Driver of the Circular Economy Three Socratic Dialogues on Interpretive Authority
Ulrike Gelbmann, Martina Zimek & Josef-Peter Schöggl *902*

Municipal Solid Waste

Littering in Austria 2025: Nationwide Waste Quantities and Composition
Peter Beigl, Benedikt Vay, Gudrun Obersteiner, Victoria Menedetter, Christian Pladerer & Gerhard Fritz *903*

Innovative strategies for increasing the recycling rates of bulky waste
Robert-Balthasar Wudtke, Simon Ballüer, Yuwei Chang, Sreekar Babu Malli, Sangit Kadu & Jantje Samtleben *904*

Biobased Processes

Turning organic urban waste into bioplastics and single-cell protein by gas fermentation
Maximilian Lackner, Charles Moritz, Philipp Zanaschka, Michael Stadlbauer & David Drew *905*

Composting trials of certified degradable plastics - Comparison of rotting conditions in mesh bags compared to open windrow composting
Christian Zafiu, Benedikt Vay, Maximilian Straka & Erwin Binner *906*

Textiles

Tsunami or the Perfect Wave? How EU Textile Legislation Creates New Opportunities for Sustainability and Innovation
Andreas Bartl *907*

Josef Ressel Centre ReSTex – an interim report
Christian B. Schimper, Birgit Herbinger, Judith Rudolf-Scholik, Agnes Grünfelder, David Lilek, Felice Quartinello, Jeannie Egan, Georg M Gübitz, Eva Sykacek, Andreas Mautner, Thomas Rosenau, Nika Depope & Andreas Bartl *908*

Collection and sorting concepts for recyclable elastic textiles containing thermoplastic copolyester elastomers
Ricarda Wissel, Jasmin Roos & Thomas Gries *909*

Why Is Textile Sorting So Complex?
Annika Ludes, Elias Pfund & Marvin Emmerich *910*

Textile Recycling as a Pioneer Field of the Circular Economy: Market Complexity and Practical Implementation
Eva-Maria Wurzer & Herwig Pfeiffer *911*

Designing an EPR System for Textiles in Austria: Interim Results
Peter Beigl, Astrid Allesch, Elisabeth Schmied, Andreas Bartl, Sebastian Rosenbusch & Marion Huber-Humer *912*

Evaluation Criteria

Resource Efficiency – An Approach to Measuring
Stefan Gäth *913*

Methodological framework for conducting consolidated waste analyses to verify discrepancies between the quantities of material flows placed on the market and the quantities of waste properly recovered from them
Bertram Zwisele & Leonie Theresia Wachtler *914*

Systematic selection of social aspects for the sustainability assessment of technical processes using social life cycle assessment
Theresa Angerler, Klaus Doschek-Held & Julia Graf *915*

From Everyday Life to the Carbon Footprint: A Digital Tool and Initial Household Surveys for Climate-Friendly Consumption
Elisabeth Schmied, Silvia Schütz & Gudrun Obersteiner *916*

Internationale Waste Management

Field Sampling of Textile Waste Sites in the Atacama Desert
Sebastian Rosenbusch, Andreas Bartl & Gabriela Veronica Aguirre Martinez *917*

Setting Recycling Rates: Gut Feeling versus Scientific Rationale
Helmut Rechberger & Stefani Rivic *918*

Solid Waste Analyses as a Contribution to Circular Economy
Victoria Menedetter & Christian Pladerer *919*

CO_2-Capture

Austrian Carbon Management Strategy
Markus Lehner *920*

Evaluation of Aqueous Carbonation as a Valorisation Pathway of Mineral Residues for CO_2 Sequestration
Sarah Reiter, Sophie Zotter, Leo Buchegger & Markus Lehner *921*

Recycling of fine mineral fractions for use in concrete
Lina Baacke, Niklas Kappelt & Björn Siebert *922*

Electrical Equipment Waste

Material Trends in Mobile Phone Printed Circuit Boards: Industrial Metals Instead of Precious Metals on a Smaller Surface Area (1998–2021)
Aleksander Jandric, Lukas Ginzinger & Stefan Salhofer *923*

Non-destructive determination and sorting of supply-critical raw materials using PGNAA: A case study on waste electrical and electronic equipment (WEEE) and metal alloys
Helmut Spoo *924*

KiRAMET: Flagship Project on Scrap Recycling

Screwdriver seeks standard interface – Dismantling an electric vehicle in practice and reality check
Alexia Tischberger-Aldrian, Felix Scheidl, Walter Martinelli, Yves Radmann, Klemens Winkler, Felix Strohmeier & Gerald Koinig *925*

Smart Waste – Process Assessment Supported by Digital Product Passes
Klemens Winkler, Felix Strohmeier & Alexia Tischberger-Aldrian *926*

Sorting of E40 Scrap
Gerald Koinig & Alexia Tischberger-Aldrian *927*

AI Monitoring

From Truck Bed to Chemistry: Benchmarking Segmentation Algorithms for Accurate Scrap Characterization in Sustainable Steelmaking
Florian Egger, Klemens Winkler, Bernard Ennis & Frank Schrama *928*

Applying Statistical Process Control (SPC) to Sensor-Based Monitoring of Mobile Construction Demolition Waste (CDW) Streams
Luz Alejo, Lieve Göbbels, Alexander Feil, Karoline Raulf & Kathrin Greiff *929*

Smartphone-Based Deep Learning for Real-Time Quality Assessment in Glass Recycling
Cornelia Adami *930*

Digitization Platforms

recAIcle – Reality instead of theory: AI assistance for manual waste sorting
Julian Aberger, Barbara Mayer & Renato Sarc *931*

DiGiDO connects: VEBS, DIWASS, WasteX and eFTI as digital infrastructure for a resilient circular economy
Constantin Gessner *932*

The Path to the Digital Consignment Note 2027: A Flexible Open-Source ERP Solution for Waste Management Using the Practical Example of R&K GmbH
Rainer Saga & Wolfgang Ammerer *933*

Plastics Recycling

Quantifying Recycling Potentials for Post-Consumer Polypropylene Using Waste Characterization and Material Flow Analysis
Sarah Schmidt, Mohammed Hafis Veralikkattil Assainar, Chaimae Chettouh, Victoria Goetjes, Hans-Peter Heim & David Laner *934*

Decontamination and Decolorization in Dissolution Recycling of Polyethylene from Flexible Packaging Waste
Johannes Schneider *935*

Influence of different process steps in mechanical recycling on the properties of polypropylene recyclates
Hannah Zeilinger, Franz Rittmannsberger & Jörg Fischer *936*

Transformation of the plastic value chain by overcoming technological purity barriers in PC-PO as a solution to meet the PPWR quota required for 2040
Johanna Langwieser, Verena Pardametz & Franz Rittmannsberger *937*

The Role of rPS4FoodPackaging in Achieving Food-Contact Approval for Recycled Polymers
David Mittermayr, Sandra Czaker, Alexander Felgel-Farnholz & Joerg Fischer *938*

Utilizing Property Profiles in Sensor-Based Sorting of Plastics
Nikolai Kuhn, Moritz Mager, Gerald Koinig, Jörg Fischer & Alexia Tischberger-Aldrian *939*

Development of a methodology for determining the proportion of plastic in WEEE with a view to assessing the potential for plastic recycling
Ralf Brüning, Florian Witt & Christian Kitazume *940*

Characterizing Heterogeneity in Post-Consumer Rigid PP Packaging Waste: Implications for Object and Property-Based Flake Sorting
Moritz Mager, Nikolai Kuhn, Alexander Felgel-Farnholz & Jörg Fischer *941*

In the Loop, Under Observation: Cyclic Degradation of Plastic Recyclates and Inline Raman Quality Control
Matthias Frühwirth & Nina Krempl *942*

Future Waste

Future Waste – A Term Between Buzzword Inflation and Real Scientific Meaning
Thomas Nigl *943*

Optimization of the Mechanical Properties of Recycled Short Glass Fibers from Shredded Wind Turbine Blades and Post-Industrial Waste in Epoxy Resin Plates
Bianca Purgleitner & Christoph Burgstaller *944*

A green alternative to aqua regia for platinum recovery from PEM electrolyser stacks
Richard Yaw Nti, Veronika Kanzler, Lea A. Brandner & Thomas Nigl *945*

Plastic components from electric vehicles: material composition and recycling options
Philipp Schetter & Sabine Flamme *946*

Machine Learning & Computer Vision

Sensors, Data, Algorithms: Vision Pipelines for AI in Recycling
Alexander Eckert, Laurin Ginner, Nicole Brosch, Filip Hendrichovsky & Rita Ebner *947*

Digital Twin for Modular Sorting Plants: Particle-level Optimization for the Treatment of Waste Electrical and Electronic Equipment
Malte Vogelgesang, Alice do Carmo Precci Lopes, Emanuel Ionescu & Liselotte Schebek *948*

Object-Based Sorting of Post-Consumer-Textiles into Garment Categories Using AI-Based Models at Pilot Scale
Hannah Weber, Gerald Koinig, Verena Schmid, Felix Scheidl, Thomas Fink & Alexia Tischberger-Aldrian *949*

Lithium-Ion-Batteries: From Hazardous Waste to Recyclable Material

AI-Based X-Ray Sorting System for the Detection of Lithium-Ion Batteries in Lightweight Packaging Waste Streams – Recent Findings from Field Trials
Johannes Leisner, Michael Kalb, Alexander Ennnen, Lara Jürgens & Jochen Ebbbing *950*

Kick it, pick it: AI-based battery sorting in mixed municipal waste with finger ejection unit and robotics
Nina Nowak, Michael Autischer & Thomas Nigl *951*

Devoid of value and meaning without context—battery recycling efficiency metrics: the gap between measurements, assumptions, and reality
Bettina Rutrecht & Thomas Nigl *952*

Recycling of Lithium-Ion-Batteries

Optimized separation of separator foil in lithium-ion battery recycling – Revised TUBAF process
Simon Franz Bendl, Alexandra Kaas, Thomas Mütze & Urs Alexander Peuker *953*

Integration of Biohydrometallurgical Strategies into Hydrometallurgical Lithium-Ion Battery Recycling
Reinhard Lerchbammer, Matthias Mandl, Luca Kolonovits & Eva Gerold *954*

Chemical characterisation of black mass resulted from crushing lithium-ion-batteries
Cornelia Rutkowski & Thomas Nigl *955*

Incineration Plants & Residues

Developing TEO – advanced waste incineration and residual management for the municipality of Ljubljana
Nora Fricko, Dominik Gappmaier, Bernhard Kronberger, Franz Peter Walder & Gregor Golja *956*

Copper Speciation in Bottom Ash from Municipal Solid Waste Incineration
Philipp Hänggi, Gisela Weibel, Mirjam Wolffers, Alexander Weh, Rainer Dähn & Sergey Churakov *957*

Metal Recycling

Securing raw materials through circularity: the potential and limitations of powder metallurgy recycling routes for high-speed steel and NdFeB magnets
Kathrin Greiff, Jacqueline Rosefort, Wiebke Hagedorn & Anna-Caroline Assmann *958*

From Residue to Resource: Shear Sands as a Strategic Secondary Raw Material for Circular Steel Industry
Paul Demschar, Thomas Kremlicka & Klaus Philipp Sedlazeck *959*

Innovative Process Concepts for Metal Recovery and Recycling of Spent Refractory Materials from Non-Ferrous Metallurgy
Simone Sedlazeck, Wolfgang Premm, Stefan Steinlechner, Alexander Leitner, Dean Gregurek & Andreas Köck *960*

Recovery of Valuable Resources from Secondary Raw Materials via Bioleaching at Pilot Scale
Clemens Habermaier, Sabine Spiess, Erik Viertauer, Christoph Thaler, Ludwig Birklbauer, Nina Neuwirth & Marianne Haberbauer *961*

Preparation of Secondary Fine-Grained Metallurgical Intermediate Products – From Feasibility Study to Plant Concept and Commissioning
Stefan Jäckel & Justus Ihle *962*

Zinc flexible RecoDust process
Wolfgang Reiter, Klaus Doschek-Held & Christoph Thaler *963*

Photovoltaics: Reuse, Recycling & Utilization

WattsOK? Reuse and Recycling of PV Modules – A Technological and Environmental Basis for Decision-Making
Simon Prüller, Therese Bouvier-Schwarz & Thomas Nigl *964*

Holistic Assessment of Innovative Recycling Technologies for Photovoltaic Modules Compared to the State of the Art – Development of an Integrated Assessment Methodology within the PVReValue Research Project
Ferozan Azizi, Sonja Feldbacher & Thomas Nigl *965*

Feasibility Study for a Photovoltaic Installation on a Closed Municipal Landfill under Aftercare
Gernot Kreindl, Arne Ragossnig, Alois Kraußler, Marlies Hrad & Michael Obriejetan *966*

Wet Processing

Circulyzer Technology – The Journey from University Lab to Factory Floor
Daniel Schwabl & Markus Bauer *967*

Friction Washing of PP Flakes: Optimization of Water Consumption, Temperature, and Wash Water Reuse in Pilot Scale
Theresa Plesch, Mauricio Pane, Vipul Verma, Stefani Ozi, Moritz Mager, Jörg Fischer & Bettina Muster-Slawitsch *968*

Technology-Optimized Wet Processing in Plastic Recycling: Membrane Processes for Closed-Loop Wash Water Management
Eva Moritz, Jürgen Müller, Jasmin Schluz & Alexander Rinderhofer *969*

Data Processing – Use Cases

Shaping the Future of Recycling: Innovations in Smart Plants and Emerging Material Streams
Sabine Schlögl, Wolfgang Köser, Tom Schmitt, Bastian Küppers, Xiaozheng Chen & Nils Kroell *970*

Recovery of Glass from Municipal Solid Waste Incineration Ash for the Container Glass Industry
Christoph Schipfer, Gerhard Stockinger & Benedikt Sonnweber *971*

From Pilot-Scale Insights to Plant-Level Validation: Factors Influencing Ballistic Separator Performance
Alena Maria Spies, Annika Datko, Peter Bardenheuer, Abtin Maghmoumi, Karoline Raulf & Kathrin Greiff *972*

Sensor-Based Technologies

Optimizing Preprocessing Pipelines for Near-infrared Hyperspectral Images to Enhance Classification Accuracy in Post Consumer Lightweight Plastic Packaging Waste Stream
Abtin Maghmoumi, Luz Alejo Alvarez, Alexander Feil & Kathrin Greiff *973*

Quality monitoring of recycled plastics – automatic inline prediction of plastics composition using Near-infrared spectroscopy
Jutta Geier, Katarina Marković, Márton Bredács, Mithun Goswami, Elisabeth Dippold, Juan Torres, Michael Jerabek & Gernot Oreski *974*

Fast on-site asbestos detection for construction and demolition waste using a miniaturized handheld near-infrared sensor
Felix Kronenwett, Georg Maier, Thomas Längle, Norbert Leiss & Volker Thome *975*

Detection and Sensor-Based Sorting of Tar containing Road Debris using Mid-Wave-Infrared Hyperspectral Imaging
Paul Bäcker, Georg Maier & Thomas Längle *976*

Detection of Wood Preservatives Using XRF Sensor Line – Implication for Inline Sorting of Waste Wood Streams
Moritz Ottenweller *977*

Sensor data alignment for sensor fusion in real-time waste analytics and sensor-based sorting
Karim Khodier & Martin Leitgeb *978*

Funded Research on Contaminated Site Remediation

Field-Scale PFAS Elimination Using a Combined process of Flotation and Electrochemical Oxidation
Josefine Pfeiffer, Peter Müller, Robert Mischitz, Florian Klapal & Mark Hlawitschka *979*

Microbial remediation of groundwater contaminated with volatile organic compounds using food-grade biosurfactants
Roman Prantl, Daniel Ruech & Thomas Reichenauer *980*

Landfill Technology

PFAS – removal in landfill leachate – experience from the field
Frank Natau & Matthias Berg *981*

Environmental and Life Cycle Assessment of DK0 Landfill Mining
Lea Hoffmann, Daniel Vollprecht & Jan Paul Lindner *982*

Optimized Conditioning of Incineration Residues for Landfill Space Conservation and Emission Reduction
Alexander Weh, Gisela Weibel, Philipp Hänggi & Patrick Kämpfer *983*

Landfill-on-Landfill: Planning, Construction and Operation of a Class I Landfill on a Closed Class II Landfill
Detlef Löwe & Roland Haubrichs *984*

Contaminated Site Remediation

RE-LAND Research Project: Contaminated Sites and Brownfields as a Resource
Daniela Sager, Christian Blothe & Soraya Heuss-Aßbichler *985*

In-situ remediation of a chromate-contaminated groundwater site at the former Schoch industrial area in Stuttgart using an innovative injection technology
Daniel Ruech, Kristina Schenk & Thomas Ertel *986*

Enabling the purification of PFAS-contaminated fine fractions: Lab scale experiments on soil washing
Samuel Griza, Benjamin Faigle, Jamie Afghani, Nico Mumm, Clarissa Kellner, Martin Draws, Marcellus Birkenmeier, Jan Paul Lindner, Ferhat Kaya, Claudia Traidl-Hoffmann & Daniel Vollprecht *987*

Landfill Aftercare

Long-term effects of in-situ aeration in landfill aftercare: An Austrian case study
Marlies Hrad & Marion Huber-Humer *988*

Current approaches for determining landfill gas potentials and the practical assessment of landfill gas collection – a follow-up article
Jürgen Forsting, Melina Simon & Konstantin Meier *989*

Determination of the gas formation rate in landfills to determine the degree of coverage
Gerhard Rettenberger *990*

Special Processing

Sleeves – Insights on the consumer disposal behaviour of sleeved packaging
Naruporn Wootthikanokkhan, Manuel Pfitzner, Martin Novak, Alexia Tischberger-Aldrian, Vasiliki-Maria Archodoulaki, Norbert Fenkart, Julia Lettner, Manuel Seifert & Viktoria Helene Gabriel *991*

Studies on lab-scale separation processes for material-specific recycling of resin-bonded abrasive tools
Claudia Maurer, Samuel Griza & Daniel Vollprecht *992*

Circular Economy in Practice: The Example of Solvent Recycling in the Semiconductor Industry
Roman Pöltner & Jonathan Welte *993*

Alternative Building Materials

The Path to Carbon-Neutral Cement Clinker Production: From Laboratory Experiments to Industrial Implementation
Wolfram Waldl, Cornelia Bauer, Florian Gomernik & Helmut Flachberger *994*

Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as Aggregate for Concrete Applications
Gisela Weibel, Alexander Weh, Philipp Hänggi & Patrick Kämpfer *995*

Effects of Thermochemically Treated Mineral Wool Waste as a Supplementary Cementitious Material on Concrete Performance
Sarah Steiner, Anna Krammer, Gerold Schnedl, Klaus Doschek-Held, Martin Billes & Theresa Sattler *996*

Innovative Building Materials - Geopolymers

Sustainable construction through the systematic use of recycled building materials, using the Harrislee waste management center as an example
Peter Riegl & Holger Bratz *997*

Investigation of the thermal stability of waste-based geopolymers for high-temperature applications
Klaus Doschek-Held, Anna Krammer, Christina Atzenhofer & Cyrill Grengg *998*

Circular Production of Soluble Alkali Silicates from SiO_2-Rich Waste
Cyrill Grengg, Florian R. Steindl, Sara Raič & Martin Dietzel *999*

Slags

New Process Approaches for the Recycling of Steel Mill Slag
Sebastian Keber *1.000*

CreeS – enabling the use of chromium-rich slags in the cement industry!
Florian Feucht, Anna Krammer, Alexander Halwax, Klaus Doschek-Held & Philipp Sedlazeck *1.001*

Phosphorus recovery from thermally treated sewage sludge for application in an inductively heated packed bed reactor
Christoph Gatschlhofer, Zlatko Raonic, Florian Steindl, Michael Meyer, Anna Christine Krammer, Harald Raupenstrauch & Klaus Doschek-Held *1.002*

PFAS

Initial Findings on the Implementation of the “PFAS Strategy for Contaminated Sites”
Gernot Döberl, Hanna Kobald, Birgit Moser, Markus Ausserleitner, Melanie Maltschnig & Martin Weisgram *1.003*

Development of a Fully Automated Online-SPE-LC-MS/MS Method for the Determination of PFAS in Aqueous Samples: Challenges and Pitfalls
Oliver Mann, Lilit Ispyrian, Daniel Tomsik, Oskar Schlesinger & Werner Wruss *1.004*

PFAS as a Pathfinder—The Long Road from Damage Assessment to Remediation
Kai-Uwe Ulrich & Dieter Poetke *1.005*

Permeable Reactive Contaminant Barriers for PFAS-Contaminated Soils: Applications in Landfills and Beyond
Christoph Schmüdderich, Herbert Lassnig & Stefan Niewerth *1.006*

Treatment of PFAS-Contaminated Groundwater, Landfill Leachate, and Soil Washing Water Using an Innovative Hybrid Treatment Process
Robert Mischitz, Peter Müller, Martin Nagy, Josefine Pfeiffer, Lukas Sitz & Florian Sommerauer *1.007*

In-situ Remediation of PFAS Contaminated Top Soil Using Biopolymer Elution
Anja Wilken & Miriam Kunz *1.008*

Remediation of a PFAS-contaminated site at Salzburg Airport
Hartwig Kraiger & Hans Christian Haslauer *1.009*

PFAS Contamination at the Styrian Firefighting Training School in Lebring – A Case Study
Elisabeth Winkler, Jürgen Maier & Sara Lang *1.010*

Prevention & Reuse

The transparent hospital: Waste management research in healthcare
Jörg Woidasky, Anton Vielsack, Franziska Zecha, Tobias Viere & Anne-Kathrin Cassier-Woidasky *1.011*

A new component made from old rotor blades – is that possible? Component recycling of wind turbine rotor blades
Ina-Marie Orawiec, Lina-Sophie Achilles, Matthias Oppe & Andreas Büter *1.012*

Ten Years of Social Urban Mining with BauKarussell – Impacts, Conclusions and Lessons Learnt
Markus Meissner, Thomas Romm, Sonja Zumpfe, Andreea Crudici & Jasmin Bermadinger *1.013*

Construction Material Recycling

Implementation and operational experience of Austria's first gypsum recycling plant
Monika Döll *1.014*

Assessment of gypsum-board waste in the context of the landfill ban – a first field report
Arne M. Ragossnig *1.015*

Smart Use of Resources

AI-based identification of the relationship between the chemical composition and leachability of mineral by-products and waste
Kai Ernst & Daniel Vollprecht *1.016*

Circular Construction: Preserving Existing Structures, Closing Loops
Christina Dornack, Claudia Kemfert, Mechthild Baron, Leonie Dahlmann, Hermann Keßler, Julia Michaelis, Eva-Maria Schatz, Ina Sieber & Bendix Vogel *1.017*

From Mineral Signals to automated Rock Classification: Circular Use of excavated Materials using multimodal Raman Spectroscopy
Martin J. Findl, Sai P.R. Gottam, Daniel Schneider, Daniel E. Sandu, Elmar Rueckert, Robert Galler, Roland Pomberger & Klaus P. Sedlazeck *1.018*

Biogenic Waste

Analysis of Vienna's biowaste management system, taking into account sociological, legal, economic and technical factors
Wojciech Rogalski *1.019*

Food Waste Prevention in School Food Services
Gudrun Obersteiner, Katharina Hofer, Sandra Luck, Reinhold Ottner & Elisabeth Schmied *1.020*

New Technical and Psychological Methods in Waste Collection and Their Impact on Sorting
Martin Wellacher *1.021*

EU Biochar LIFE “Screen Overflow as a Carbon Store in the Composting Cycle”
Daniela Meitner, Gerald Dunst, Thorsten Groeneveld & Patrick Stumm *1.022*

Plastic-Free Compost: A Circular Economy Approach to Improving Compost Quality
Josef Adam, Martin Wellacher, Gernot Kreindl, Andreas Kunter, Alexandra Loidl, Franz Poschacher, Georg Weingrill & Andreas Zöscher *1.023*

Soil Manufacturing Facilities (Vererdungsanlagen) in Austria
Antonia Bernhardt, Christian Neubauer, Maria Tesar & Vincent Wörndl *1.024*

Sewage Sludge & Phosphorus

Between Nutrient Recovery and Contaminant Risks: PFAS in Biowaste and Sewage Sludge within a Circular Economy Framework
Anke Bockreis & Lívia Hökl *1.025*

The UNFC Resource Classification as an Evaluation Framework for Phosphorus Recovery Projects from Sewage Sludge
Soraya Heuss-Aßbichler, Ludwig Hermann & Juan Antonio Munizaga-Plaza *1.026*

Feasibility study on the retrofitting of a thermochemical phosphorus recycling process for existing mono-sewage sludge incineration plants
Jakob Hirsch *1.027*

Circular Business

Innovating Circular Business Models through Collaboration and Digital Technologies to extend Product Life Cycles
Romana Rauter & Anika Schmitt *1.028*

Innovative and Sustainable Business Models for Waste Management Machinery: The Case of Komptech
Jochen Mandl, Ewald Konrad & Bernd Walter *1.029*

Circular Industries

The EU Circular Economy Act – A Long-Awaited Restart for Europe's Resource Policy
Gregor Biley *1.030*

Ingenieurdienstleistungen für Umweltschutz mit Mehrwert

www.umweltkonsulenten.at



jetzt auch in Oberösterreich:
Kaiser-Josef-Platz 52
4600 Wels

Festvortrag & Plenarvorträge

Projekt: **Deponie Leverkusen-Bürrig (DE)**





Effektiver PFAS-Schutz für Deponien – Tektoseal® Active als aktive Barriere

Auf der DK III-Sonderabfalldeponie im CHEMPARK Leverkusen wurde zur sicheren Behandlung PFAS-belasteter Abfälle ein spezieller Monobereich realisiert. Ziel war es, eine technisch sichere und wirtschaftliche Lösung zu schaffen, die den laufenden Deponiebetrieb sowie höchste Anforderungen an den Gewässerschutz gewährleistet.

Als zentrale Barriere kam Tektoseal® Active PFAS zum Einsatz, das PFAS durch Ionenaustausch und Adsorption dauerhaft im Geotextil bindet. Der rund 5.000 m² große Deponiebereich verfügt über eine separate Sickerwassererfassung mit regelmäßiger Überwachung der Reinigungsleistung. So entstand eine nachhaltige und langfristig wirksame Lösung für den sicheren Umgang mit PFAS-belasteten Materialien.

HUESKER
Ideen. Ingenieure. Innovationen.

Wie bewältigen Mega-Citys ihre Abfallprobleme?

Kerstin Kuchta
TU Hamburg, Institute CREM, Hamburg, Deutschland

KURZFASSUNG: Die Abfallwirtschaft in Mega-Cities steht vor vielfältigen und miteinander verknüpften Herausforderungen. Bevölkerungswachstum, Urbanisierung, steigender Konsum, unzureichende Infrastruktur, finanzielle Engpässe, geringe Recyclingquoten sowie Umwelt- und Klimabelastungen erschweren die Umsetzung einer nachhaltige Abfallbewirtschaftung erheblich. Um diese Probleme langfristig zu bewältigen, sind Investitionen in moderne Entsorgungssysteme, eine stärkere Förderung der Kreislaufwirtschaft, wirksame gesetzliche Rahmenbedingungen sowie die aktive Beteiligung der Bevölkerung erforderlich. Vor diesem Hintergrund werden Beispiele für unterschiedlich erfolgreiche Umsetzungen skizziert. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Organisation der Abfallwirtschaft in Hochhäusern und hyper-verdichteten Bereichen.

1 BEGRIFFSERKLÄRUNG: MEGA-CITIES

Der Begriff **Mega-City** bezeichnet eine besonders große und dicht besiedelte Stadt beziehungsweise einen urbanen Ballungsraum. Nach der klassischen Definition beginnt die Megacity bei fünf Millionen Einwohnern, beziehungsweise einer Mindesteinwohnerzahl von zehn Millionen. Diese Definition wird von den Vereinten Nationen (United Nations 2025) verwendet und dient als international anerkannter Maßstab zur Abgrenzung von anderen Stadtformen. Weitere Bemühungen zur Definition konzentrieren sich auf die Mindest-Bevölkerungsdichte, die mit mehr als 2000 Einwohnern pro Quadratkilometer festgelegt wurde (Umweltbundesamt 2025). Mega-Cities sind das Ergebnis eines anhaltenden Urbanisierungsprozesses, der insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern zu einem starken Bevölkerungswachstum in den Städten geführt hat.

Mega-Cities verfügen nicht über hohe Einwohnerzahl aus, sondern zeichnen sich auch durch ihre hohe wirtschaftliche, politische und kulturelle Bedeutung aus. Sie fungieren als nationale oder internationale Innovations-hot-spots, als Zentren für Handel, Industrie, Finanzdienstleistungen, Bildung und Innovation. Das schnelle Wachstum von Mega-Cities bringt jedoch zahlreiche Herausforderungen mit sich. Die steigende Bevölkerungsdichte führt zu einer erhöhten Nachfrage nach Wohnraum, Verkehrsinfrastruktur, Energie, Wasser sowie öffentlichen Dienstleistungen. Gleichzeitig nimmt die Menge an erzeugtem Abfall erheblich zu.

Nach Schätzungen der Vereinten Nationen (United Nations 2025) wird der Anteil der Weltbevölkerung, der in Städten lebt, in den kommenden Jahrzehnten weiter zunehmen. Damit wächst auch die Zahl der Mega-Cities weltweit. Diese Entwicklung macht deutlich, dass nachhaltige Stadtplanung sowie moderne Konzepte der Kreislaufwirtschaft und Abfallwirtschaft ein entscheidender Faktor für die Lebensqualität der Bevölkerung und den langfristigen Umwelt- und Klimaschutz in Mega-Cities sind.

Die folgende Tabelle 1 stellt die 25 größten Mega-Cities der Welt zusammen. Bemerkenswert ist, dass 18 der 25 größten Städte in Asien liegen und zum Teil ein bedeutendes Wachstum über die kommenden 20 Jahre für diese Städte vorausgesagt wird (z. B. Jakarta soll bis 2050 um ein Viertel wachsen). Ausnahmen bilden die japanischen und koreanischen Städte sowie Sao Paulo, Mexico und New York. Diese Städte sollen schrumpfen.

Die Bevölkerungsdichte erreicht in Mumbai einen Höchstwert von etwa 27.000 Einwohnende per km^2. Die am dichtesten besiedelte Stadt in Europa ist Kern-Paris mit einer EinwohnendenDichte von fast 20.000 Personen/km^2.

Die größte deutsche Stadt, Berlin, mit etwa 3,6 Mio. Einwohnenden kommt in diesem Ranking lediglich auf Platz 132.

Tab. 1: Liste der 25 größten Mega-Cities weltweit (Quelle: Vereinte Nationen 2025)

	Stadt	Land	Personen	Dichte (P/km²)	Prognosen (2050)
1	Jakarta	Indonesien	41.913.860	8.584	51.784.216
2	Dhaka	Bangladesch	36.585.479	5.371	52.122.843
3	Tokyo	Japan	33.412.512	6.490	30.657.618
4	New Delhi	Indien	30.222.405	14.385	33.890.685
5	Shanghai	China	29.558.908	9.444	34.912.186
6	Guangzhou	China	27.563.372	6.069	29.243.076
7	Cairo	Ägypten	25.566.102	15.542	32.365.955
8	Manila	Philippinen	24.735.305	10.146	27.119.826
9	Kolkata	Indien	22.549.738	9.682	23.767.882
10	Seoul	Südkorea	22.490.482	9.974	21.225.404
11	Karachi	Pakistan	21.422.590	24.624	32.592.965
12	Mumbai	Indien	20.203.056	27.301	23.059.150
13	São Paulo	Brasilien	18.949.790	9.271	18.217.300
14	Bangkok	Thailand	18.180.280	6.832	20.462.207
15	Mexico City	Mexiko	17.734.212	8.457	17.678.777
16	Beijing	China	17.013.303	9.932	18.004.156
17	Lahore	Pakistan	15.156.430	15.674	20.388.443
18	Istanbul	Türkei	15.014.763	11.841	16.303.309
19	Moscow	Russland	14.524.753	9.305	15.521.567
20	Ho Chi Minh City	Vietnam	14.052.713	9.090	17.201.445
21	Buenos Aires	Argentinien	14.017.736	6.478	14.235.648
22	New York City	USA	13.920.148	5.173	13.224.531
23	Shenzhen	China	13.878.396	9.512	14.660.570
24	Bengaluru	Indien	13.187.098	20.541	14.258.150
25	Osaka	Japan	12.964.145	5.816	10.449.439

2 HERAUSFORDERUNGEN DER ABFALL- UND KREISLAUFWIRTSCHAFT IN MEGA-CITIES

Die Abfallwirtschaft zählt zu den größten Herausforderungen moderner Mega-Cities. Mit dem stetigen Wachstum der Stadtbevölkerung steigt auch die Menge an festen Siedlungsabfällen kontinuierlich an. Nach Angaben der Weltbank entstehen weltweit jährlich mehr als zwei Milliarden Tonnen Siedlungsabfälle, wobei ein erheblicher Anteil in urbanen Ballungsräumen anfällt (Kaza et al 2018). Prognosen gehen davon aus, dass sich diese Menge aufgrund der fortschreitenden Urbanisierung, des Bevölkerungswachstums und des steigenden Konsums bis zum Jahr 2050 deutlich erhöhen wird (United Nations 2025). Für Mega-Cities bedeutet diese Entwicklung, dass Entsorgungssysteme immer wieder an ihre Kapazitätsgrenzen gelangen und umfassend erweitert und modernisiert werden müssen.

Besonders in Entwicklungs- und Schwellenländern wächst die Bevölkerung häufig schneller als die städtische Infrastruktur. Neue Wohngebiete entstehen teilweise ungeplant und verfügen über keine ausreichenden Einrichtungen zur Abfallentsorgung. Insbesondere informelle Siedlungen sind häufig nicht an kommunale Entsorgungssysteme angeschlossen. Infolgedessen wird Abfall oftmals auf offenen Flächen, in Flüssen oder an Straßenrändern entsorgt oder unter freiem

Himmel verbrannt. Diese Praktiken führen zu erheblichen Umweltbelastungen und erhöhen gleichzeitig das Risiko für Krankheiten.

Auch die Finanzierung der kommunalen Abfallwirtschaft stellt viele Stadtverwaltungen vor große Schwierigkeiten. Besonders in wirtschaftlich schwächeren Regionen können diese Kosten häufig nicht vollständig gedeckt werden, sodass notwendige Investitionen in moderne Entsorgungstechnologien ausbleiben.

Neben den finanziellen Herausforderungen spielen organisatorische Probleme eine wichtige Rolle. Eine effiziente Abfallwirtschaft erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen kommunalen Behörden, privaten Entsorgungsunternehmen und der Bevölkerung. In vielen Mega-Cities fehlen jedoch klare Zuständigkeiten oder einheitliche gesetzliche Regelungen. Unzureichende Kontrollen sowie mangelnde Durchsetzung bestehender Umweltgesetze führen dazu, dass illegale Müllablagerungen und Umweltverschmutzungen häufig nicht verhindert werden können. Korruption und ineffiziente Verwaltungsstrukturen erschweren zusätzlich die Umsetzung nachhaltiger Abfallkonzepte (OECD 2020).

Von besonderer Bedeutung ist in vielen Mega-Cities der informelle Abfallsektor. Millionen Menschen verdienen ihren Lebensunterhalt als Müllsammlerinnen und Müllsammler, indem sie Wertstoffe aus Haushaltsabfällen oder auf Deponien sammeln und an Recyclingunternehmen verkaufen. Diese Tätigkeit trägt zwar wesentlich zur Wiederverwertung wertvoller Rohstoffe bei, erfolgt jedoch meist unter gesundheitsschädlichen und sozial unsicheren Bedingungen. Fehlende Schutzkleidung, der Kontakt mit gefährlichen Stoffen sowie mangelnde soziale Absicherung stellen erhebliche Risiken für die Beschäftigten dar.

Schließlich stellt auch das veränderte Konsumverhalten der Bevölkerung eine wachsende Herausforderung dar. Mit steigendem Wohlstand nimmt der Verbrauch von Verpackungen, Elektrogeräten und kurzlebigen Konsumgütern zu. Dadurch erhöht sich nicht nur die Gesamtmenge des Abfalls, sondern auch dessen Zusammensetzung wird komplexer. Insbesondere Elektroschrott enthält wertvolle kritische Rohstoffe wie Gold, Kupfer oder seltene Erden, gleichzeitig können auch gesundheits- und umweltgefährdende Stoffe Quecksilber oder Cadmium enthalten sein. Eine fachgerechte Sammlung und Wiederverwertung dieser Stoffe ist daher von großer Bedeutung.

3 FALLBEISPIELE ZUR ABFALLWIRTSCHAFT IN MEGA-CITIES

Die Abfallwirtschaft in Mega-Cities wird weltweit durch unterschiedliche wirtschaftliche, soziale und politische Rahmenbedingungen geprägt. Während einige Städte als Vorbilder für nachhaltige Abfallwirtschaft gelten, stehen andere aufgrund ihres rasanten Bevölkerungswachstums und begrenzter Ressourcen vor erheblichen Herausforderungen. Vor diesem Hintergrund zeigen die folgenden Fallbeispiele, dass eine erfolgreiche Umsetzung der Circular Economy auf einer Kombination aus Infrastruktur, klaren gesetzlichen Vorgaben, technologischen Innovationen und einer aktiven Beteiligung der Bevölkerung fußt. Während Städte wie Tokio und Singapur durch effiziente Sammel- und Recyclingsysteme hohe Umweltstandards erreichen, verdeutlichen Beispiele wie Mumbai die Schwierigkeiten, die mit schnellem Bevölkerungswachstum, finanziellen Einschränkungen und unzureichender Infrastruktur verbunden sind. Der internationale Vergleich macht deutlich, dass nachhaltige Lösungen stets an die jeweiligen wirtschaftlichen, sozialen und geografischen Rahmenbedingungen angepasst werden müssen.

Gleichzeitig können Mega-Cities voneinander lernen, indem bewährte Konzepte der Kreislaufwirtschaft, Digitalisierung und Umweltbildung auf andere urbane Räume übertragen werden.
Anzumerken ist auch, dass die Digitalisierung ein Schlüsselfaktor in der Realisierung einer Circular Economy, besonders in Mega-Cities, sein wird. Intelligente Sensorsysteme in

Abfallbehältern ermöglichen eine kontinuierliche Überwachung des Füllstandes und optimieren die Planung von Sammelrouten. Mithilfe von GPS-Systemen, Geoinformationssystemen (GIS), Big-Data-Analysen und künstlicher Intelligenz können Transportwege optimieren und CO_2-Emissionen reduziert. Digitale Plattformen verbessern darüber hinaus die Kommunikation zwischen den Stakeholdern. Mobile Anwendungen informieren beispielsweise über Abholtermine, richtige Mülltrennung oder nahegelegene Recyclinghöfe. Gleichzeitig schaffen digitale Datenmanagementsysteme mehr Transparenz entlang der gesamten Wertschöpfungskette und erleichtern die Weiternutzung von Produkten und Materialien.

Mit der zunehmenden Urbanisierung und dem Wachstum von Mega-Cities gewinnen auch Hochhäuser und Wolkenkratzer und die spezifische Abfallwirtschaft in diesen Siedlungssystemen mit bis zu 10.000 Einwohnenden zunehmend an Bedeutung. Durch die hohe Zahl an Bewohnerinnen und Bewohnern sowie Beschäftigten entstehen erhebliche Mengen an Siedlungsabfällen. Eine zentrale Herausforderung besteht in der innerbetrieblichen Sammlung und dem Transport der Abfälle innerhalb des Gebäudes. Im Gegensatz zu niedrigeren Wohn- oder Bürogebäuden müssen Abfälle aus zahlreichen Etagen zentral zusammengeführt werden. Hierfür kommen häufig vertikale Müllschachtsysteme zum Einsatz. Diese ermöglichen den Transport des Abfalls über geschlossene Schächte in zentrale Sammelräume im Untergeschoss. Moderne Anlagen verfügen über automatische Verschlusssysteme, Brandschutzvorrichtungen sowie Belüftungs- und Geruchsfilter, um hygienische und sicherheitstechnische Anforderungen zu erfüllen. In hochwertigen Gebäuden werden zusätzlich getrennte Einwurfschächte für Restmüll, Papier, Kunststoffe oder organische Abfälle installiert, wodurch die spätere Wiederverwertung erleichtert wird.

Die folgenden Fallbeispiele verdeutlichen, wie unterschiedlich Mega-Cities mit der Bewältigung ihrer Abfallprobleme umgehen.

3.1 Tokio

Ein international anerkanntes Beispiel für eine effiziente Abfallwirtschaft ist die japanische Hauptstadt Tokio. Mit mehr als 33 Millionen Einwohnenden zählt Tokio zu den größten Mega-Cities der Welt. Die Stadt verfolgt ein konsequentes Abfallmanagement, welches auf Müllvermeidung, sorgfältiger Mülltrennung und hochwertigem Recycling basiert. Haushalte sind verpflichtet, ihren Abfall nach verschiedenen Kategorien wie brennbarer Abfall, nicht brennbarer Abfall, Kunststoffe, Glas, Papier und Dosen zu trennen. Ergänzt wird dieses System durch moderne Müllverbrennungsanlagen mit Energierückgewinnung. Gleichzeitig sorgen strenge gesetzliche Vorgaben sowie ein ausgeprägtes Umweltbewusstsein der Bevölkerung für hohe Recyclingquoten und eine deutliche Reduzierung der Deponierung von Abfällen (Tokyo 2025).

3.2 Singapur

Ein weiteres erfolgreiches Beispiel stellt Singapur dar. Aufgrund seiner geringen Landesfläche verfügt der Stadtstaat nur über begrenzte Möglichkeiten zur Deponierung von Abfällen. Deshalb verfolgt Singapur eine langfristige Strategie zur Abfallvermeidung und Kreislaufwirtschaft. Ein großer Teil der nicht recycelbaren Abfälle wird in modernen Waste-to-Energy-Anlagen verbrannt. Das verbleibende Restmaterial wird auf der künstlich angelegten Offshore-Deponie entsorgt, welche nach hohen Umweltstandards betrieben wird. Darüber hinaus investiert Singapur kontinuierlich in Recyclingtechnologien, digitale Überwachungssysteme und Umweltbildungsprogramme, um die Abfallmenge langfristig zu reduzieren und Ressourcen effizienter zu nutzen. (NEA 2023).

Viele Hochhauskomplexe in Singapur sind mit zentralen Müllschächten ausgestattet, die eine getrennte Sammlung verschiedener Abfallarten ermöglichen. In neueren Stadtquartieren kommen zusätzlich automatisierte pneumatische Sammelsysteme zum Einsatz. Diese transportieren den Abfall direkt zu zentralen Sammelstationen, wodurch herkömmliche Müllfahrzeuge aus

Wohnanlagen verbannt werden können. Ergänzend setzt Singapur auf intelligente Sensoren zur Überwachung der Sammelbehälter sowie digitale Steuerungssysteme für die Optimierung der Entleerungsintervalle.

3.3 Mumbai

Anders zeigt sich das Bild in der indischen Mega-City Mumbai, welche beispielhaft für die Herausforderungen vieler schnell wachsender Städte in Entwicklungs- und Schwellenländern ist. Mit einer Bevölkerung von über 20 Millionen Menschen entstehen täglich 7.000 Tonnen Siedlungsabfälle. Die kommunale Infrastruktur kann mit dem rasanten Bevölkerungswachstum jedoch nur begrenzt Schritt halten. Ein erheblicher Teil des Abfalls wird auf offenen Müllkippen abgelagert oder unzureichend behandelt. Gleichzeitig spielt der informelle Abfallsektor eine zentrale Rolle. Tausende Müllsammlerinnen und Müllsammler sammeln verwertbare Materialien wie Kunststoffe, Papier und Metalle und führen diese dem Recycling zu. Trotz ihres wichtigen Beitrags zur Kreislaufwirtschaft arbeiten sie häufig unter schwierigen hygienischen Bedingungen und ohne ausreichende soziale Absicherung (Mumbai 2026).

3.4 New York City

Auch New York City gehört zu den Städten mit einem besonders hohen Abfallaufkommen. Aufgrund des hohen Konsumniveaus fallen täglich große Mengen an Haus-, Gewerbe- und Verpackungsabfällen an. Die Stadt verfolgt das Ziel, die Deponierung langfristig zu reduzieren und den Anteil recycelbarer Materialien zu erhöhen. Programme zur getrennten Sammlung von Papier, Glas, Metall und Kunststoff sowie die Einführung von Biotonnen für organische Abfälle sollen die Wiederverwertung fördern. Darüber hinaus investiert New York verstärkt in Maßnahmen zur Abfallvermeidung, beispielsweise durch die Reduzierung von Einwegkunststoffen und den Ausbau der Kreislaufwirtschaft.

3.5 Dubai

Ein bedeutendes Beispiel für den Einsatz innovativer Abfallmanagementsysteme findet sich in Dubai in den Vereinigten Arabischen Emiraten. Die Stadt zählt zu den am schnellsten wachsenden Metropolregionen des Nahen Ostens und verfügt über eine außergewöhnlich hohe Zahl an Hochhäusern. Im weltbekannten Burj Khalifa sowie in zahlreichen modernen Wohn- und Bürokomplexen erfolgt die Abfallsammlung über zentrale Müllschachtsysteme mit automatischer Verdichtung. Ergänzt werden diese durch digitale Überwachungssysteme, welche den Füllstand der Sammelbehälter kontinuierlich erfassen und eine bedarfsgerechte Entleerung ermöglichen. Im Rahmen der „Dubai Integrated Waste Management Strategy“ 2021 – 2041) (Dubai 2021) verfolgt die Stadt zudem das Ziel, den Anteil deponierter Abfälle deutlich zu reduzieren und Recycling sowie energetische Verwertung weiter auszubauen. Intelligente Gebäudetechnik trägt dabei dazu bei, Abfallströme effizient zu erfassen und die Entsorgungslogistik innerhalb der Gebäude zu optimieren.

3.6 Hongkong

In Hongkong, eine der am dichtesten besiedelten Städte der Welt, wird ebenfalls ein innovativer Abfallmanagement betrieben. Die Stadt ist geprägt von zahlreichen Hochhäusern mit mehreren tausend Bewohnerinnen und Bewohnern pro Gebäudekomplex. Aufgrund der begrenzten Flächenkapazitäten steht Hongkong vor erheblichen Herausforderungen bei der Abfallentsorgung. Um die Effizienz zu steigern, werden moderne Gebäude zunehmend mit intelligenten Sammel- und Sortiersystemen ausgestattet. Darüber hinaus fördert die Stadtverwaltung Programme zur

Mülltrennung und zum Recycling von Papier, Kunststoffen, Glas und Lebensmittelabfällen. Parallel dazu investiert Hongkong in den Ausbau moderner Anlagen zur energetischen Verwertung von Restabfällen und verfolgt langfristig das Ziel, den Anteil deponierter Abfälle deutlich zu senken (Hongkong 2025).

4 ZUSAMMENFASSUNG

Die Studie zeigt Lösungsstrategien für die wachsenden Herausforderungen durch hohe Abfallaufkommen in Mega-Cities. Es werden Mega-Cities beschrieben, welche umfassende Vorgaben, angemessenes Investment und über exzellent Organisationen verfügen und Zuständigkeit umfassend geregelt haben. Hier rücken, innovative Prozesse und Konzepte und die Optionen, welche durch Digitalisierung gegeben sind immer mehr in den Fokus.

Andere Beispiel zeigen die spezifischen Herausforderungen in schnell wachenden Mega-Cities, welche organisatorische und technische Defizite aufweisen und für welche ein Übergang in eine Circular Economy noch in der weiten Zukunft liegt.

LITERATURVERZEICHNIS

Dubai (2021): Dubai Integrated Waste Management Strategy 2021-2041 https://www.dubai.ae/living/environment-sustainability/waste-managementeingesehen im Juli 2026

Hongkong 2025: Hong Kong case study: Overcoming barriers to a Zero Landfill direction through solutions that decarbonise the waste sector, https://www.slrconsulting.com/insights/hong-kong-case-study-overcoming-barriers-to-a-zero-landfill-direction/ eingesehen im Juli 2026

Kaza et al (2018)Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, D.C.: World Bank.

Mumbai (2026): Waste Management in Mumbai, https://ecodiscussion.com/mumbai-waste-management-area-wise-system/ eingesehen im Juli 2026.

NEA 2023) National Environment Agency (NEA 2023). *Waste Management Infrastructure and Resource Sustainability in Singapore*. Singapore: NEA.

New York City (2026): New York State Solid Waste Management Plan: Building the Circular Economy Through Sustainable Materials Management (2023 - 2032) https://dec.ny.gov/environmental-protection/waste-management, eingesehen im Juli 2026

OECD (2020), The Circular Economy in Cities and Regions: Synthesis Report, OECD Urban Studies, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/10ac6ae4-en.

Tokyo (2025): Waste Management Report Tokyo 2025, https://www.union.tokyo25-seisou.lg.jp › report, eingesehen im Juli 2026

Umweltbundesamt 2025: https://sns.uba.de/umthes/de/concepts/_00665204.html abgerufen im Juli 2026).

United Nations (2025) United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2025). World Urbanization Prospects: The 2025 Revision, Online Edition.

KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Kerstin Kuchta
kuchta@tuhh.de
+494030601-3054
Institute of Circular Resource Engineering and Management (CREM)
Technische Universität Hamburg
www.tuhh.de/crem

Verhalten von PFAS in der Siedlungsabfallverbrennung – Ergebnisse einer großtechnischen Messkampagne

Daniel Wohter [1], Anna Holfelder [2], Ragnar Warnecke [3], Hans-Joachim Gehrmann [2], Dieter Stapf [2] & Peter Quicker [1]

[1)] RWTH Aachen University, Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft (TEER), Aachen, Deutschland

[2)] Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Chemie (ITC), Karlsruhe, Deutschland

[3)] GKS – Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH, Schweinfurt, Deutschland

KURZFASSUNG: Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) in Siedlungsabfällen stellen eine Herausforderung für die sichere Entsorgung von Abfällen und die Ziele der Kreislaufwirtschaft dar. Um das Verhalten von PFAS bei der Verbrennung von Siedlungsabfällen zu untersuchen, wurde in der GKS-Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH (GKS) eine umfassende Messkampagne durchgeführt. Es wurden drei verschiedene Szenarien untersucht: die Verbrennung des üblichen Restabfalls als Referenzszenario, die Verbrennung des Restabfalls gemischt mit einem PFAS-kontaminierten Boden und die Verbrennung des Restabfalls, der gezielt mit PFAS-haltigen Materialien versetzt wurde (Worst-Case-Szenario). Alle Input- und Output-Ströme der Anlage wurden beprobt und auf PFAS untersucht. Da die methodische Grundlage für den Nachweis von PFAS in thermischen Abfallbehandlungsanlagen noch keine solide Grundlage hat, stand dieser Aspekt im Mittelpunkt des Projekts. Es wurde ein umfassender Vergleich verschiedener PFAS-Messmethoden für das Abgas und unterschiedliche Analysetechniken für die chemisch herausfordernden Reststoffe durchgeführt. Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der Messung von Produkten der unvollständigen Verbrennung im Abgas (z.B. CF_4).

Während des Worst-Case-Szenarios (gezielte Zugabe von PFAS zum Abfall) lag die PFAS-Konzentration im Reingas bei etwa 1-3 ng/$m^3_{i.N.,tr.}$ und damit auf oder unter dem Niveau der Blindwerte. Im Vergleich zum Referenzszenario wurde kein signifikanter Anstieg der Konzentration festgestellt. CF_4-Emissionen wurden nur während der PFAS-Zugabe beobachtet, während andere Produkte der unvollständigen Verbrennung nicht nachweisbar waren. Die PFAS-Konzentrationen in den Rückständen waren ebenfalls sehr gering. Lediglich für zwei bis drei Substanzen konnten Werte leicht über der Nachweisgrenze festgestellt werden.

Für die Gesamtanlage konnten fluorbezogene Abbauraten für toxikologisch relevante PFAS (ohne CF_4) von > 99,9999 % ermittelt werden. Bei Berücksichtigung der CF_4-Emissionen liegt die Abbaurate bei 99,7 %. Die hohen fluorbezogenen Abbauraten bestätigen die Siedlungsabfallverbrennung als Senke für PFAS.

1 EINLEITUNG

Der Einsatz von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in Produkten des alltäglichen Lebens und die inzwischen weit vorangeschrittene, diffuse Verbreitung dieser Stoffe führen unweigerlich dazu, dass PFAS in den Siedlungsabfall eingetragen werden. Dieser Eintrag kann indirekt aus dem Nachweis von PFAS in Gebrauchs- und Konsumgütern sowie der Analytik einzelner Abfallströme (z. B. Elektroschrott aus Sortieranlagen oder Straßenkehricht und Bauschutt) abgeleitet werden (Becanova, Melymuk, Vojta, Komprdova, & Klanova, 2016). Weitere Studien detektierten PFAS in Abfallstoffen indirekt über Analysen von Sickerwasser, Schlacken oder Luftemissionen aus Deponien, Abfallumschlagplätzen oder anderen Behandlungsanlagen (Wang, et al., 2020). Die sichere Entsorgung von PFAS-belasteten Abfällen und die gezielte Ausschleusung der diffus in die Abfälle eingetragenen PFAS stellen für die in vielen Industrieländern angestrebte Kreislaufwirtschaft eine große Herausforderung dar. Ein anthropogener PFAS-Kreislauf würde aufgrund der toxikologischen Relevanz dieser Stoffgruppe eine enorme Bedrohung darstellen.

Einige Literaturstellen suggerieren, dass die Abfallverbrennung für die Verbreitung von PFAS verantwortlich ist (Martin, et al., 2023). Die im Vergleich zur Sonderabfallverbrennung und zu den Zementwerken geringen Verbrennungstemperaturen stärken vermeintlich die Argumentation der entsprechenden Stellen. So geht die amerikanische Umweltschutzbehörde (engl.: U.S. Environmental Protection Agency, U.S. EPA) für eine ausreichende Zerstörung der PFAS von einer Verbrennungstemperatur von deutlich über 1100 °C aus. Bei Probenahmen in Praxisanlagen wurden zudem PFAS in den Reststoffen und zum Teil im Abgas nachgewiesen (Björklund, Weidemann, & Jansson, 2023 und Strandberg, et al., 2021). Die Europäische Umweltagentur (EEA) schreibt der Verbrennung von Fluorpolymeren mit Verweis auf (Cui, Guo, Zhai, & Zhang, 2019) sogar bis zu 14 % der Emissionen für Trifluoressigsäure (TFA) im Regenwasser zu (EEA, European Environment Agency, 2025).
Die aufgeführten Literaturstellen weisen jedoch erhebliche inhaltliche Lücken und methodische Limitationen auf. So liegen für PFAS bisher keine etablierten oder genormten Mess- und Analyseverfahren vor, weder für das Abgas noch für die Reststoffe aus den Anlagen. Die Studien verzichten zudem auf eine Untersuchung zum Eintrag von PFAS in die Anlagen und stellen keinen Bezug zur Anlagentechnik (Rostsysteme, Feuerraumgeometrie) oder den verfahrenstechnischen Kennzahlen der beprobten Anlage (Stöchiometrie, Verbrennungstemperaturen) her. Der derzeitige Wissensstand erlaubt folglich keine eindeutige Bewertung dieser Thematik.
Vor dem skizzierten Hintergrund wurde im Rahmen einer der bislang größten messtechnischen Versuchskampagnen das Verhalten von PFAS in der Siedlungsabfallverbrennung unter Überwindung der bisherigen Limitationen dezidiert untersucht. Die Arbeiten werden vom Umweltbundesamt (UBA), vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, von den Mitgliedsanlagen der Arbeitsgemeinschaft der Betreiber thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Bayern (ATAB) sowie der nordrhein-westfälischen Regionalgruppe der Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD), Behörden und Anlagenbetreibern aus Österreich und der Schweiz sowie Mitgliedern der European Suppliers of Waste-to-Energy Technology (ESWET) mit erheblichen finanziellen Mitteln unterstützt.

2 ZIELSTELLUNG & KONZEPT

Im Fokus des Forschungsvorhabens stehen zwei zentrale Ziele: Die Untersuchung des Zersetzungsverhaltens von PFAS in großtechnischen Rostfeuerungen und die Bewertung der Abscheideleistung der Rauchgasreinigung (RGR). Damit wird auch eine Übertragung der Arbeiten von Aleksandrov, et al. (2019) und Gehrmann, et al. (2024) vom Pilotmaßstab in die Praxis angestrebt. Angesichts der bislang unzureichend entwickelten methodischen Grundlagen zur Erfassung von PFAS in Anlagen der thermischen Abfallbehandlung (TAB) kommt diesem Aspekt im Vorhaben eine besondere Bedeutung zu. Teilziel ist es, verschiedene Mess- und Analyseverfahren für PFAS in Verbrennungsabgasen sowie in den chemisch und physikalisch anspruchsvollen Reststoffen der Anlage systematisch zu vergleichen, ihre Aussagekraft zu bewerten und verlässliche, in der Praxis anwendbare Methoden zu etablieren.
Kern des Vorhabens bildet eine 14-tägige Messkampagne am Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt (GKS). Die Untersuchungen fanden an einer der drei Verbrennungslinien (bestehend aus einem Vorschubrost im Gegenstromprinzip und anschließender nasser RGR) des Müllteils des GKS im Februar 2025 statt. Die PFAS-Konzentration im Abfall wurde im Verlauf der Kampagne im Vergleich zur Konzentration im üblichen Restabfallmix in zwei Schritten gezielt gesteigert. Aus diesem methodischen Ansatz resultierten drei Untersuchungsszenarien:

- Der Referenzzustand bei Verbrennung des üblichen Restabfalls,
- die Beimischung von PFAS-belastetem Boden zum Restabfall und
- die Zudosierung von PFAS-haltigen Materialien als Worst-Case-Szenario.

Um das Zersetzungsverhalten der PFAS in der Anlage und die Abscheideleistung der RGR beurteilen zu können, wurde ein umfassendes Beprobungs- und Analysekonzept aufgestellt, das

alle eingangsseitigen und ausgangsseitigen Stoffströme sowie die meisten Zwischenprodukte umfasste.

2.1 Einsatzstoffe und Zugabestrategie für die Untersuchungsszenarien Referenzzustand und PFAS-Dosierung

Um eingangsseitige Schwankungen vor dem Hintergrund des äußerst heterogenen Brennstoffs Restabfall zu reduzieren, wurde eine möglichst weitgehende Homogenisierung des Abfalls angestrebt. Dazu wurden die Abfälle aller anliefernden kommunalen Erzeuger in einem Zwischenlager vorgemischt, anschließend zur Anlage transportiert, separat gebunkert und während den Untersuchungsszenarien verbrannt. Gewerbeabfälle wurden während den Untersuchungen nicht aufgegeben.
Für die Erzeugung des Worst-Case-Szenarios wurden vier Materialtypen ausgewählt, über die ein möglichst breites und repräsentatives Spektrum an unterschiedlichen PFAS in die Anlage eingebracht werden konnte. Zudosiert wurde eine Mischung aus Fluorpolymeren (PTFE, PFA, PVDF, FKM), Schmiermittel auf PFPE-Grundlage, polymerbasierte Beschichtungssuspensionen mit Fluortelomeralkoholen und -akrylaten als Seitenketten (seitenkettenfluorierte Polymere, SFP) sowie fluorierten Löschmitteln. Die Löschmittel wurden gewählt, um neben den Fluorpolymeren auch die Konzentration von extrem stabilen perfluorierten Sulfon- und Carbonsäuren, unter anderem Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) und Perfluoroctansäure (PFOA), die als Reinsubstanzen nicht zugegeben werden konnten, im Abfall gezielt zu erhöhen. Die fluorierten Hauptkomponenten der Löschmittel sind die Substanzen Capstone A und B.
Für die Materialzugabe wurden Öffnungen in der Trichterwand unmittelbar unterhalb der Absperrklappe installiert und genutzt. Die verschiedenen Materialien wurden vorab so vorbereitet (zerkleinert und verpackt), dass sie durch Öffnungen mit einem Durchmesser von etwa 150 mm (vgl. Abb. 1) eingebracht werden konnten. Über einen Zeitraum von 70 Stunden erfolgte die Zugabe von Löschschaum im Vier-Minuten-Takt sowie des übrigen Materialgemischs alle acht Minuten. Der Massenstrom der zugegebenen reinen PFAS betrug in Summe etwa 10 kg/h. Der gesamte Materialinput lag aufgrund der zum Teil geringen PFAS-Gehalte in den Materialien (z.B. etwa 1% im Löschmittel) deutlich höher. Insgesamt wurde eine zusätzliche PFAS-Konzentration (polymere und nichtpolymere Verbindungen) von rund 0,13 Ma-% im Restabfallmix eingestellt. Allein durch die Zugabe der Löschmittel ergab sich dabei ein Anteil nichtpolymerer PFAS von 25 mg/kg Abfall.

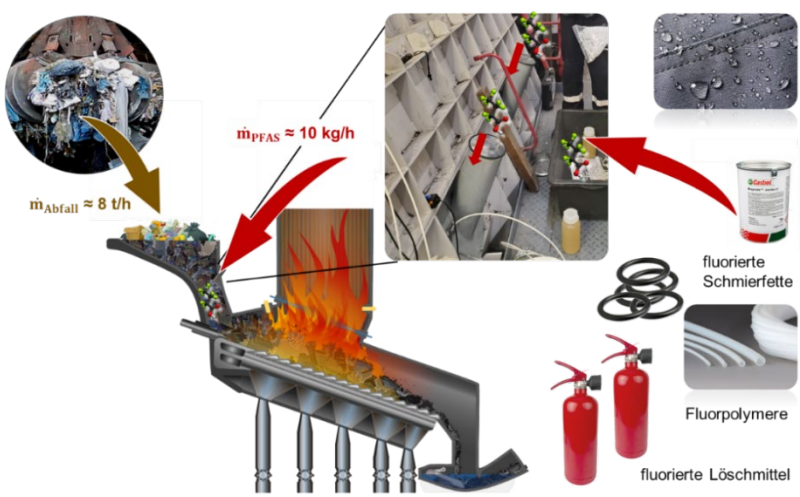


Abb. 1: Zugabestrategie für die Einbringung der PFAS-haltigen Materialien in die Anlage (Worst-Case-Szenario).

2.2 Probenahme- und Analysekonzept

Aufgrund der Diversität der PFAS in Bezug auf Flüchtigkeit und Polarität ist die Kombination verschiedener Probenahme- und Analysemethoden erforderlich. Um sowohl die PFAS- als auch die F-Gehalte in den Stoffströmen der Anlage zu quantifizieren, wurde eine Vielzahl an Mess- und Analyseverfahren angewendet.

2.2.1 Gas- und Abgaspfad

Zur Bewertung der thermischen Zersetzung und der Abscheideleistung der RGR wurden neben der klassischen Emissionsmessstelle im Reingas (vor Kamin) auch Gasprobenahmen im Rohgas (nach Kessel) durchgeführt. Darüber hinaus wurde die Unterwindluft beprobt. Abb. 2 zeigt die eingesetzten Messverfahren im Luft- und Abgaspfad der Anlage.

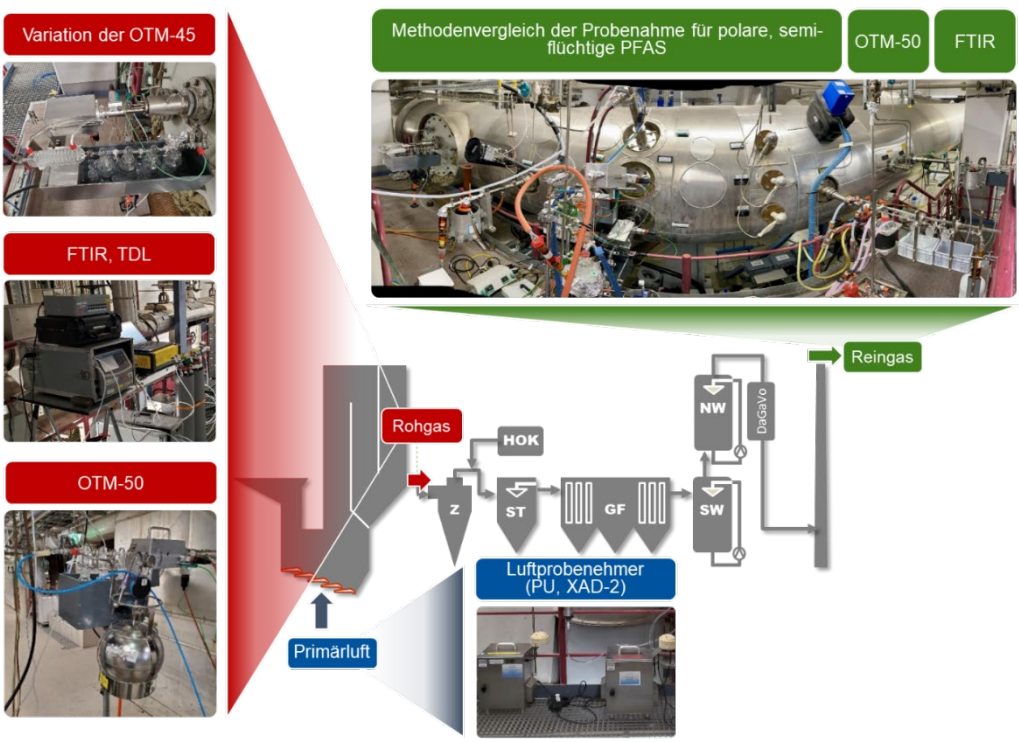


Abb. 2: Eingesetzte Messverfahren im Luft- und Abgaspfad der Anlage. (Z: Zyklon, HOK: Herdofenkoks, ST: Sprühtrockner, GF: Gewebefilter, NW: Neutraler Wäscher, SW: Saurer Wäscher)

Für die polaren, semi-flüchtigen (ionischen) PFAS wurde im Rohgas aufgrund der hohen Partikelkonzentration auf eine Messmethode mit beheiztem Filter zurückgegriffen. Hierzu wurde eine leichte Abwandlung der „Other Test Method 45“ (OMT-45), ein Verfahren der U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency, o.D.) eingesetzt (vgl. Abb. 3).

Mit dem Ziel, geeignete Mess- und Analyseverfahren für PFAS im Abgas von TAB-Anlagen voranzutreiben, fand im Reingas als einer der drei Kampagnenschwerpunkte ein umfassender Methodenvergleich statt. Die Konzeptionierung dieses Vergleichs und die Auswahl der einzelnen Messverfahren für polare, semi-flüchtige (ionische) PFAS erfolgte in Zusammenarbeit mit dem verantwortlichen Normungsausschuss „Messen von Dioxinen, PCB, PBF und POPs (E&I)“ des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) / Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL). Zum Einsatz kamen unter anderem die in Abb. 3 dargestellten Probenahmemethoden.

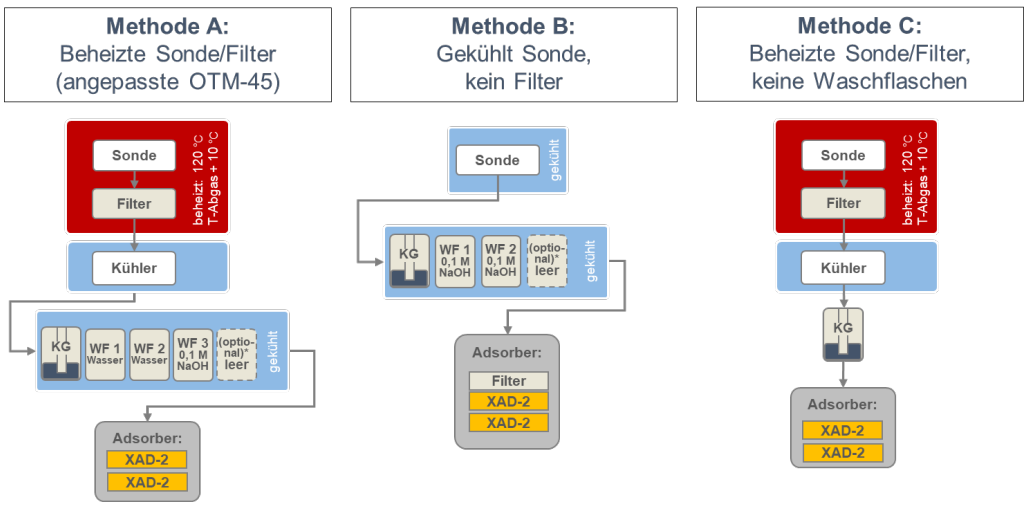


Abb. 3: Eingesetzte Probenahmemethoden für polare, semi-flüchtige (ionische) PFAS im Reingas. (KG: Kondensatgefäß, WF: Waschflasche)

Verglichen wurden die bereits im Rohgas eingesetzte Variante der OMT-45 (A), eine Probenahmemethode unter Verwendung einer gekühlten Sonde (B) und eine weitere Methode mit beheizter Sonde und Filter, bei der auf zusätzliche Waschflaschen verzichtet wurde (C). Beide letztgenannten Methoden sind Varianten der DIN EN 1948. Methode B wurde dabei zusätzlich durch den Vergleich der in den Waschflaschen eingesetzten Flüssigkeit variiert (NaOH-Lösung oder Wasser). Die Methoden B und C kamen in Varianten mit unterschiedlichen Adsorbermaterialien (Polymerharz vom Typ XAD-2 oder schwacher Anionenaustauscher) zum Einsatz. Die Methode B wurde darüber hinaus von zwei verschiedenen Messinstituten in Redundanz durchgeführt. Damit wurde ein umfänglicher Methodenvergleich unter Praxisbedingungen mit insgesamt acht unterschiedlichen Methoden für polare, semi-flüchtige (ionische) PFAS durchgeführt.
Der zusammen mit dem Normungsausschuss gewählte Analytenumfang des Methodenvergleichs ist in Tab. 1 als Gruppe 1 aufgeführt. Es handelt sich ausschließlich um Substanzen, die mittels LC-MS analysiert werden. Als Bestimmungsgrenze wurde für jede Substanz ein Wert von 0,2 bis 0,35 ng/$m^3_{i.N.,tr.}$ als Summe aller Teilproben gefordert. Mit der Gruppe 2 wurde der Umfang um Substanzen erweitert, die abhängig vom jeweiligen Labor in unterschiedlichem Umfang zusätzlich analysiert wurden. Die Erweiterung zielte darauf ab, das Zersetzungsverhalten möglichst umfassend bewerten zu können.

Tab. 1: Analytenumfang der PFAS-Gruppe 1 und 2.

Analyt Nr.	PFAS-Gruppe 1	PFAS-Gruppe 2 (variierend nach Labor)
1	Perfluorbutansäure (PFBA)	Trifluoressigsäure (TFA)
2	Perfluorpentansäure (PFPeA)	Perfluorpropansäure (PFPrA)
3	Perfluorhexansäure (PFHxA)	Perfluorhexadecansäure (PFHxDA)
4	Perfluorheptansäure (PFHpA)	Perfluoroctadecansäure (PFODA)
5	Perfluoroctansäure (PFOA)	Pentafluorethansulfonsäure (PFEtS)
6	Perfluornonansäure (PFNA)	Perfluorpropansulfonat (PFPrS)
7	Perfluordecansäure (PFDA)	Perfluornonansulfonat (PFNS)
8	Perfluorundecansäure (PFUnA)	2-(Perfluorhexyl)ethanol (6:2-FTOH)
9	Perfluordodecansäure (PFDoA)	2-(Perfluoroctyl)ethanol (8:2-FTOH)
10	Perfluortridecansäure (PFTrDA)	2-(Perfluordecyl)ethanol (10:2-FTOH)
11	Perfluortetradecansäure (PFTeDA)	4:2 Fluorotelomer Phosphatdiester (4:2 diPAP)
12	Perfluorbutansulfonat (PFBS)	6:2-Fluortelomerphosphatdiester (6:2 diPAP)
13	Perfluorpentansulfonat (PFPeS)	8:2-Fluortelomerphosphatdiester (8:2 diPAP)
14	Perfluorhexansulfonat (PFHxS)	DPOSA (Capstone A)
15	Perfluorheptansulfonat (PFHpS)	CDPOS (6:2 FTAB, Capstone B)
16	Perfluoroctansulfonat (PFOS)	Perfluoroctansulfonamid (PFOSA)
17	Perfluordecansulfonat (PFDS)	Methylperfluoroctansulfonamid (MeFOSA)
18	4:2-Fluortelomersulfonsäure (4:2 FTS)	Ethylperfluoroctansulfonamid (EtFOSA)
19	6:2-Fluortelomersulfonsäure (6:2 FTS, H4PFOS)	Weitere Substanzen nach Analysemöglichkeiter der einzelnen Labore.
20	8:2-Fluortelomersulfonsäure (8:2 FTS)	
21	4,8-Dioxa-3H-perfluornonansäure (ADONA)	
22	Hexafluorpropylenoxid-Dimersäure (GenX, HFPO-DA)	

Für jede der Gasprobenahmemethoden wurde jeweils mindestens ein Feldblindwert ermittelt. Dieser wurde nach vollständigem Auf- und Abbau der Apparatur analog zum Vorgehen der Messung bestimmt, jedoch ohne, dass Abgas durch die Apparatur geflossen ist.
Um potentielle PFAS-Zersetzungsprodukte in Form von nicht-polaren, flüchtigen PFAS (bspw. Tetrafluormethan, CF_4) zu erfassen, wurden Kanistermessungen in Anlehnung an die OTM-50 (U.S. Environmental Protection Agency, o.D.) der U.S. EPA sowohl im Roh- als auch im Reingas durchgeführt. Aus Gründen der Redundanz wurde CF_4 an beiden Messstellen mithilfe eines FTIR analysiert. Für die Messung von Fluorwasserstoff (HF) als einem potentiellen Mineralisierungsprodukt von PFAS wurden die FTIR-Messungen in Roh- und Reingas durch einen Tunable Diode Laser (TDL) ergänzt.
Da aus der Literatur die Verflüchtigung von PFAS aus Produkten und Abfällen bekannt ist, wurde ergänzend zu den Abgasmessungen die über den Bunker in die Anlage eintretende Unterwindluft beprobt und auf PFAS analysiert. Eingesetzt wurden Luftprobenehmer aus dem Bereich der Immissionsmessung mit Polyurethan (PU)-Schaum und XAD-2-Schüttung als Adsorber. Die Probenahme zielte sowohl auf die polaren, semi-flüchtigen (ionischen) als auch auf die schwach polaren, flüchtigen (neutralen) Substanzen ab, die mittels GC-MS analysiert werden. Eine entsprechende Probenahme wurde zudem für die Außenluft auf dem Dach des GKS durchgeführt. Die Abgaszusammensetzung und die Verbrennungsbedingungen wurden in den Betriebsdaten des GKS kontinuierlich aufgezeichnet und auf potentiell eintretende Prozessveränderung bewertet.

2.2.2 Feste und flüssige Stoffe der Anlage

Zusätzlich zu den Gasen wurden feste und flüssige Stoffströme der Anlage beprobt, aufbereitet und analysiert. Eine schematische Darstellung des Vorgehens zeigt Abb. 4.

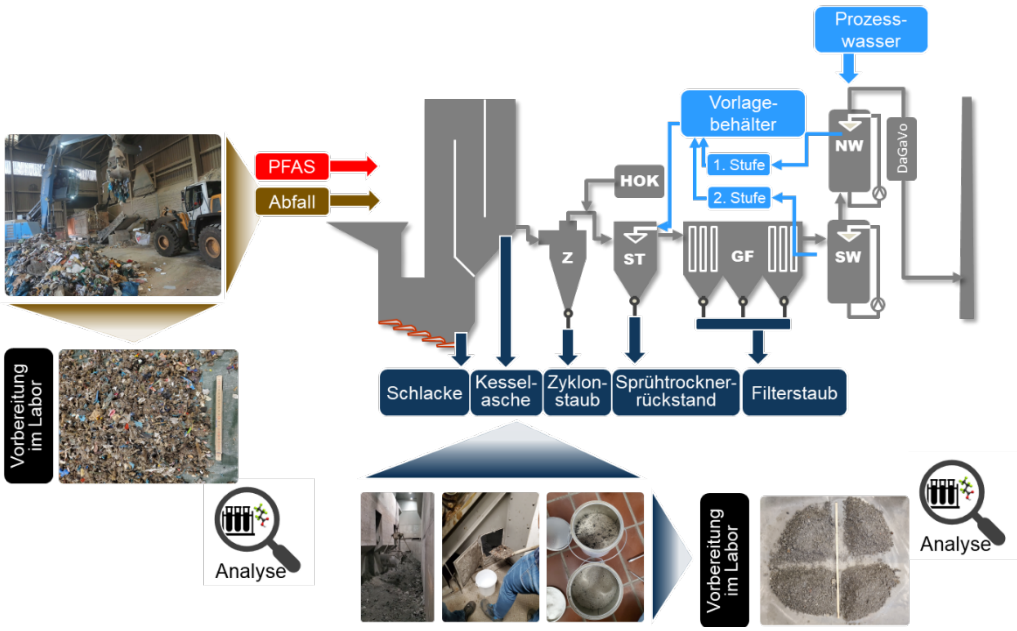


Abb. 4: Probenahme, Aufbereitung und Analyse der festen und flüssigen Stoffe der Anlage. (Z: Zyklon, HOK: Herdofenkoks, ST: Sprühtrockner, GF: Gewebefilter, NW: Neutraler Wäscher, SW: Saurer Wäscher)

Mit dem Ziel, erstmalig die PFAS-Grundbelastung in einem Restabfallmix zu analysieren, wurde eine Teilprobe des vorgemischten Abfalls am Zwischenlager geschreddert. 2 m^3 dieser Probe wurden in weiteren Schritten kryogen zerkleinert, dabei verjüngt und schließlich der Analytik zugeführt.
Die Reststoffe (Schlacken, Zyklon- und Filterstaub, Sprühtrocknerrückstände), die Zwischenprodukte (Kesselasche, Wäscherabwasser) und die Hilfsmittel HOK, Prozesswasser, Fällungsmittel) der Anlage wurden für alle Versuchstage im zeitlichen Abstand von 3 h beprobt und zu Tagesmischproben vereinigt.
Analytisch wurden die Proben nach methanolischer Extraktion einerseits auf polare, semi-flüchtige (ionische) PFAS mittels LC-MS (43 Einzelsubstanzen) und andererseits auf den F-Gehalt analysiert. Besonderes Augenmerk lag auf dem organischen Fluorgehalt, der in der Literatur als Summenwert für die nicht über die Einzelanalytik detektierbaren PFAS (Vorläufersubstanzen, Bruchstücke) herangezogen wird.

2.3 Bestimmung der fluorbezogenen Abbaurate

Die Bestimmung von Abbau- und Zersetzungsraten für PFAS in großtechnischen Anlagen der TAB ist mit großen Herausforderungen verbunden. Durch die heterogenen Abfallströme werden polymere sowie nicht polymere PFAS in schwankenden Konzentrationen in die Anlage eingetragen. Die analytische Bestimmung des tatsächlichen PFAS-Eintrags ist aufgrund der zahlreichen Einzelverbindungen nicht ohne weiteres möglich. Polare Substanzen können analytisch erfasst werden, für Fluorpolymere ist kein belastbares Verfahren bekannt. Sie können lediglich über den Gesamtfluorgehalt im Abfall abgeschätzt werden.

Die Bestimmung von substanzspezifischen Abbauraten (bspw. für PFOA) wird zudem als nicht zielführend angesehen, da von Umwandlungsprozessen der PFAS auch unabhängig von der thermischen Behandlung auszugehen ist. Bekannt ist dabei die Kettenverkürzung, die Abspaltung oder der Umbau funktioneller Gruppen und die Umwandlung von poly- zu perfluorierten Substanzen. Bilanzen führen z. B. in Kläranlagen aufgrund dieser Umwandlungsprozesse zu einem Anstieg einzelner Verbindungen. Das gleichzeitige Auftreten polymerer und nicht polymerer Verbindungen ist ein weiterer Grund dafür, dass die substanzspezifischen Abbauraten nicht valide sind.
Vor diesem Hintergrund wurden zwei zentrale methodische Ansätze genutzt, um den Abbau von PFAS in der Großanlage zu bewerten. Der erste Ansatz besteht darin, aufbauend auf den Arbeiten von (Gehrmann, et al., 2024), fluorbezogene Transferkoeffizienten (TK) und Abbauraten (AR) zu verwenden. Für den fluorbezogenen TK wird das Fluor aller detektierten PFAS eines Reststoffes und des Reingases am Kamin ($m_{F,PFAS,Reststoff\ i}$ und $m_{F,PFAS,Reingas}$) auf das Fluor der PFAS im Input ($m_{F,PFAS,Eintrag}$) bezogen. In die Berechnung gehen damit die Fluoratome aus nicht mineralisierten PFAS ein. Die fluorbezogene AR wird für den gesamten Prozess/die Gesamtanlage bestimmt. Die Abbaurate wird als Reduction Rate for Products of Incomplete Combustion (R^2PIC) bezeichnet und ist in Formel (1) mathematisch dargestellt.

$$Fluorbezogene\ Abbaurate\ (R^2PIC)\ = 1 - \frac{\sum \dot{m}_{F,PFAS,aus}}{\sum \dot{m}_{F,PFAS,ein}} \tag{2}$$

Um den schwankenden und weitgehend unbekannten PFAS-Konzentrationen im Abfall zu begegnen, ist eine definierte und gegenüber der abfallinhärenten PFAS-Belastung deutlich erhöhte PFAS-Dosierung erforderlich. Diese wurde im Szenario der PFAS-Zugabe (Worst-Case-Szenario) mit erheblichem Aufwand umgesetzt. Durch die PFAS-Dosierung wird der Einfluss abfallbedingter PFAS-Konzentrationsschwankungen auf die Berechnung der TK und AR weitgehend vernachlässigbar.
Die AR wird in diesem Ansatz als differenzbasierte, fluorbezogene Abbaurate für die Gesamtanlage bestimmt und als Total Delta Destruction Rate (TD^2R) bezeichnet. In die Berechnung gehen ausschließlich die durch die PFAS-Dosierung verursachten Mehremissionen ein. Hierzu werden die im Referenzszenario bestimmten Konzentrationen von den Konzentrationen während der PFAS-Dosierung abgezogen. Die daraus resultierenden Differenzkonzentrationen der ausgangsseitigen Stoffströme (Reststoffe der Anlage) bilden die Grundlage der Berechnung. Die eingangsseitige Differenz entspricht dem definiert zugegebenen PFAS-Massenstrom, respektive dem Fluor, aus den PFAS-haltigen Materialien im Worst-Case-Szenario und ist damit bekannt. Die Referenzmessungen ohne PFAS-Dosierung dienen folglich als Basislinie. Die Berechnung der TK und der TD^2R ist in den Formeln (2) bis (4) dargestellt.

$$Transferkoeffizient\ (TK)\ = \frac{\sum \dot{m}_{F\ aus\ PFAS,Szenario:PFAS,aus} - \sum \dot{m}_{F\ aus\ PFAS,Szenario:Ref,aus}}{\sum \dot{m}_{F\ aus\ PFAS,Zudosierung,ein}} \tag{3}$$

mit:

$$\sum \dot{m}_{F\ aus\ PFAS,Zudosierung,ein} = \sum \dot{m}_{F\ aus\ PFAS,Szenario:PFAS,ein} - \sum \dot{m}_{F\ aus\ PFAS,Szenario:Ref,ein} \tag{4}$$

$$TD^2R = 1 - \frac{\sum \dot{m}_{F\ aus\ PFAS,Szenario\ PFAS,aus} - \sum \dot{m}_{F\ aus\ PFAS,Szenario\ Ref,aus}}{\sum \dot{m}_{F\ aus\ PFAS,Zudosierung,ein}} \tag{5}$$

3 ERGEBNISSE

In den folgenden Abschnitten werden ausgewertete Analyseergebnisse dargelegt. Hierbei liegt der Fokus zunächst auf den PFAS-Konzentrationen in den einzelnen Stoffströmen, bevor hieraus entsprechende Transferkoeffizienten und Abbauraten abgeleitet werden. Für die erste Einordnung der Daten werden die Ergebnisse als arithmetische Mittelwerte angegeben. Des Weiteren werden Konzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze zunächst als Null angenommen.

3.1 Eintrag von PFAS in die Anlage

Die Analysen des Restabfalls zeigen eine PFAS-Konzentration von etwa 100 µg/kg_{wf} (Summe von 45 Einzelsubstanzen: polare Substanzen wie Carbon- und Sulfonsäuren und schwach polare Substanzen wie Fluortelomeralkohole (FTOH)), wobei knapp die Hälfte auf die Substanz TFA zurückzuführen ist. Neben zahlreichen perfluorierten Carbon- und Sulfonsäuren wurden auch Fluortelomerphosphatdiester und Sulfonamide sowie Capstone B nachgewiesen. Der organische F-Gehalt wurde zu etwa 200 bis 250 µg/kg_{wf} bestimmt (extrahierbarer organischer Fluor = EOF, mittels Verbrennungsionenchromatographie nach MeOH-Extraktion). Dieser Wert deutet auf zahlreiche weitere nicht quantifizierbare PFAS im Abfall hin. Welcher Anteil davon auf PFAS und deren Vorläufersubstanzen zurückzuführen ist, kann jedoch noch nicht abschließend beurteilt werden. Der Fluorpolymeranteil ist analytisch nicht zu erfassen und bleibt unbekannt. Im Vergleich zu der PFAS-Grundbelastung im Abfall wird deutlich, dass die Konzentration der nicht polymeren PFAS allein durch die Dosierung der Löschmittel im Worst-Case-Szenario um den Faktor 400 erhöht wurde.
Die Messungen in der Unterwindluft zeigen, dass ein Teil der im Restabfall vorhandenen PFAS nicht über den Trichter, sondern durch Verflüchtigung oder in partikulärer Form über den Umweg der Verbrennungsluft in die Anlage eingetragen werden. Die PFAS-Konzentration lag bei etwa 2 bis 3 ng/$m^3_{i.N.,tr.}$ für die Summe aus 35 polaren, semi-flüchtigen (ionischen) Einzelsubstanzen. Durch ergänzende Messungen der schwach polaren, semi-flüchtigen (nicht ionischen) PFAS wurde die Fluortelomeralkohol-Konzentration zu 3 bis 4 ng/$m^3_{i.N.,tr.}$ bestimmt.
Dass etwa 2 µg/l TFA und weitere ionische PFAS mit einer Konzentration von 6 ng/l im Prozesswasser des Wäschers gefunden wurden, ist das Ergebnis der mittlerweile ubiquitären Verbreitung dieser Stoffe. Auch im frischen Herdofenkoks (etwa 1 bis 2 µg/kg_{wf}) und im Fällungsmittel (0,2 bis 0,3 µg/kg_{wf}) wurden PFAS nachgewiesen. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass der umfassende und sorgfältige Bewertungsansatz der Kampagne notwendig und zielführend ist, um das Verhalten von PFAS in der MVA dezidiert bewerten zu können.

3.2 PFAS-Emissionen im Abgaspfad für die Untersuchungsszenarien Referenzzustand und PFAS-Dosierung

Die Messergebnisse für die polaren, semi-flüchtigen (ionischen) PFAS im Rohgas zeigen auf, dass die Gesamtkonzentration (Summe aller gemessenen Einzelsubstanzen der Gr. 1) sowohl für das Szenario der Referenzmessung als auch für das Szenario der PFAS-Zugabe im Bereich von 4 bis 22 ng/$m^3_{i.N.,tr.}$ liegt. Die Schwankung weist kein auf die Zudosierung zurückzuführendes Muster auf. Die erhöhten Werte sind zum größten Teil auf einzelne Substanzen zurückzuführen, deren Anteil an der Gesamtkonzentration deutlich über 80 % beträgt. Dass für die gleichen Substanzen hohe, zweistellige Feldblindwerte bestimmt wurden, deutet darauf hin, dass es sich um eine Kontamination und nicht um eine tatsächlich im Abgas vorliegende Substanz handelt.
Die Ergebnisse der Reingasmessungen weisen im Vergleich zu den Rohgasmessungen ein leicht geringeres Niveau der PFAS-Konzentrationen auf. Über beide Szenarien hinweg wurden in den einzelnen Messungen Werte zwischen 0 und 15 ng/$m^3_{i.N.,tr.}$ ermittelt. Während der PFAS-Dosierung wurden Werte von 1 bis 3 ng/$m^3_{i.N.,tr.}$ gemessen. Auch für diesen Messpunkt gehen die erhöhten Werte im Referenzbetrieb meist auf eine einzelne Substanz (z.B.

Hexafluorpropylenoxiddimersäure = GenX) zurück, deren Feldblindwert ebenfalls im zweistelligen Bereich liegt. Auch im Reingas sind diese singulären, hohen Werte daher als nicht belastbar anzusehen.
Der Methodenvergleich der Probenahme zeigt, dass keine der angewendeten Probenahmemethoden sichtbare Vorteile in der Erfassung der PFAS-Konzentrationen aufweist. Die Konzentrationen aller Messmethoden liegen mit Ausnahme der genannten singulären Ausreißer auf vergleichbarem Niveau.
Es ist zu betonen, dass die gemessenen Konzentrationen der polaren, semi-flüchtigen (ionischen) PFAS unabhängig von der Messstelle im gleichen Konzentrationsbereich liegen, wie die jeweiligen Bestimmungsgrenzen und Feldblindwerte. Für die Bewertung und Diskussion der Daten ist somit das Hinzuziehen der beiden Werte von größter Bedeutung. Auf Grundlage eines kontinuierlichen Austauschs mit Fachleuten aus dem Bereich Emissionsmessung und Analytik kann bei PFAS-Messungen von einer vermehrt aufgekommenen Blindwertproblematik gesprochen werden.
Im Zuge der Analysen der Zersetzungsprodukte wurde TFA im Reingas, jedoch nicht im Rohgas nachgewiesen. Unabhängig vom Untersuchungsszenario wurden Konzentrationen zwischen 5 und 50 ng/$m^3_{i.N.,tr.}$ ermittelt.
Eindeutig auf die PFAS-Dosierung kann die Emission von CF_4 zurückgeführt werden. Während des Referenzszenarios lag die CF_4-Konzentration unterhalb der Bestimmungsgrenze, sowohl für die Kanister- als auch die FTIR-Messungen. Mit Zugabe der PFAS-haltigen Materialien wurden dann Werte zwischen 1 und 2 mg/$m^3_{i.N.,tr.}$ (FTIR) und etwa 0,5 mg/$m^3_{i.N.,tr.}$ (OTM-50) gemessen. Weitere Zersetzungsprodukte wie C_2F_6 oder COF_2 wurden in keinem der Szenarien, weder im Rohgas noch im Reingas, nachgewiesen.

3.3 PFAS-Emissionen in den Reststoffen

Die Reststoffe der Anlage weisen bei Zugabe der PFAS-haltigen Materialien im Vergleich zum Referenzbetrieb leicht erhöhte PFAS-Konzentrationen auf. Diese bewegen sich allerdings auf sehr niedrigem Niveau. In der Schlacke wurden für den Referenzbetrieb deutlich weniger als 1 µg/kg_{wf} PFAS analysiert. Die Erhöhung während der PFAS-Dosierung (bis zu max. 5 µg/kg_{wf}) geht auf die Hauptsubstanzen (Capstone A/B und 6:2 FTS) der Löschmittel zurück. Es wird vermutet, dass einzelne zudosierte Flaschen im Müllbett abgeschirmt wurden und dadurch nicht oder zu kurz der erforderlichen Zersetzungstemperatur ausgesetzt waren.
Die Flugasche (Zyklonstaub), die Sprühtrocknerrückstände und die Filterstäube aus dem Gewebefilter sind im Referenzbetrieb nahezu ohne Befund (1 bis 2 singuläre Befunde knapp über der BG). Auch während der PFAS-Dosierung weisen lediglich 2 bis 3 Substanzen bestimmbare Werte leicht über der Bestimmungsgrenze auf. Alle Werte liegen im Mittel deutlich unterhalb von 0,5 µg/kg_{wf}.
Die TFA-Konzentrationen in den Zwischenprodukten und Rückständen erhärten den Verdacht, dass die nachgewiesenen TFA-Werte im Reingas sehr wahrscheinlich kein Produkt einer unvollständigen thermischen Zersetzung von höher molekularen PFAS sind. Am Kesselende konnten weder im Gas noch in den Partikeln TFA-Konzentrationen festgestellt werden, ebenso wenig in den Rückständen des Zyklonstaubes. Das Wäscherabwasser, die Sprühtrocknerrückstände und die Filterstäube weisen hingegen hohe Konzentrationen von 30 bis über 100 µg/kg_{wf} auf. Der Eintrag über das Prozesswasser, die Anreicherung im Wäscherwasser und schlussendlich die Eindüsung in das Abgas über den Sprühtrockner scheint der wahrscheinlichste Weg von TFA in das Reingas zu sein. Der Filterstaub stellt dabei eine signifikante TFA-Senke dar.

3.4 Fluorbezogene Transferkoeffizienten und Abbauraten

Bei der Ermittlung der fluorbasierten Abbaurate (AR) wurde das bei der PFAS-Dosierung (Worst-Case-Szenario) am Kamin emittierte CF_4 unterschiedlich berücksichtigt. $TD^2R_{Struktur}$ wurde bestimmt unter Berücksichtigung von CF_4 als PFAS laut Strukturdefinition (Wang, et al., 2021). TD^2R_{Haz} wurde ohne Berücksichtigung von CF_4 bestimmt, da dieses als gesundheitlich unbedenklich gilt (Makowski, et al., 2022). CF_4-Emissionen sind klimarelevant und sollten differenziert betrachtet werden. Es ist dennoch zu betonen, dass die CF_4-Emissionen ausschließlich bei der Zudosierung von PFAS-haltigen Materialien zum Abfallmix quantifizierbar waren.
In Abb. 5 sind die mit den Formeln aus Kapitel 3.1 ermittelten Transferkoeffizienten (TK) und Abbauraten dargestellt. Die in rot dargestellten Massenanteile stellen den TK in den jeweiligen Stoffstrom dar.

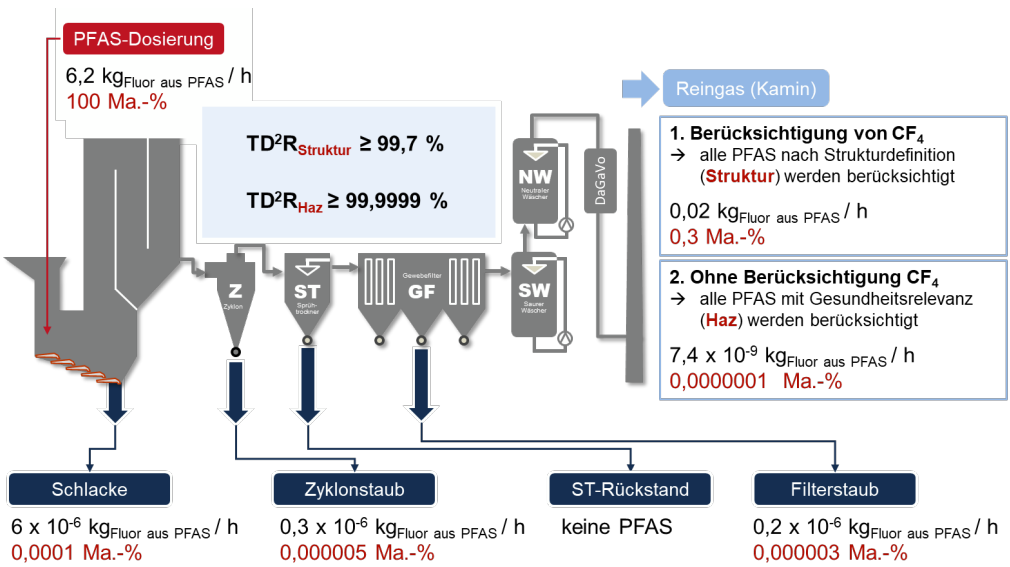


Abb. 5: Transferkoeffizienten und Abbauraten für die großtechnische Anlage.

Werden ausschließlich die PFAS-Konzentrationen am Kamin betrachtet, die als einziger Stoffstrom auf direktem Wege in die Umwelt emittiert werden, ist festzustellen, dass 99,9999999 Ma.-% des Fluors aus dem PFAS-Input in der Anlage zerstört oder abgeschieden werden und nicht als gesundheitsrelevante PFAS über die Abgasemissionen in die Umwelt überführt werden.

4 DISKUSSION UND AUSBLICK

Aus den umfangreichen Ergebnissen der vorgestellten Messkampagne lassen sich wesentliche Erkenntnisse im Hinblick auf das Verhalten von PFAS in der Siedlungsabfallverbrennung ableiten. Trotz einer künstlich hervorgerufenen signifikanten Steigerung der PFAS-Konzentration im Restabfall (Worst-Case-Szenario: ca. 400-fache PFAS-Konzentration im Vergleich zum üblichen Abfallmix) wurden lediglich geringe Emissionen von polaren, semi-flüchtigen PFAS am Kamin nachgewiesen (< 3 ng/$m^3_{i.N.,tr.}$). Die detektierten Substanzen liegen nur knapp über den Bestimmungsgrenzen und bewegen sich dabei auf oder teils unter dem Niveau der Feldblindwerte. Im Vergleich zu den Emissionen bei der Verbrennung des üblichen Abfallmixes (Referenzszenario) ist damit keine signifikante Steigerung der Emissionen festzustellen.

Der umfassende methodische Vergleich unterschiedlicher Messverfahren zeigt, dass mit einer PFAS-Kontamination auf allen Ebenen (Vorbereitung des Equipments, Auswahl der Hilfsmedien, Probenahme, Laboranalytik) zu rechnen ist. Dieser Umstand birgt das Risiko verfälschter Ergebnisse und daraus resultierender Fehlinterpretationen.
Im Hinblick auf mögliche Produkte einer unvollständigen Zersetzung ist davon auszugehen, dass beim Eintrag von PFAS in den Abfallstrom geringfügige Restemissionen von CF_4 auftreten können. CF_4-Emissionen wurden jedoch ausschließlich während der Zudosierung von PFAS gemessen. Im Referenzbetrieb, bei der Verbrennung des üblichen Abfallmixes, konnten hingegen weder über Kanister- noch mittels FTIR-Messungen CF_4-Emissionen nachgewiesen werden, sodass diese im regulären Anlagenbetrieb keine Relevanz besitzen. Weitere PFAS-Bruchstücke wurden in keinem Untersuchungsszenario nachgewiesen. Eine (Neu-)Bildung hochmolekularer, stabiler Carbon- oder Sulfonsäuren konnte ebenso wenig beobachtet werden.
Durch den ausführlichen Bilanzierungsansatz der Messkampagne, im Zuge derer auch alle eingangsseitigen Betriebsmittel der Anlage analysiert wurden, konnte aufgedeckt werden, dass TFA-Emissionen im Bereich der MVA mit nasser RGR ein relevantes Thema darstellen. Es kann jedoch als nachgewiesen angesehen werden, dass die TFA-Emissionen des GKS auf das vorbelastete Prozesswasser des Wäschers und damit auf die TFA-Verunreinigung des Mains, aus dem das Prozesswasser entnommen wird, zurückzuführen sind. Die Rauchgasreinigung der Anlage fungiert in diesem Fall als TFA-Senke.
Ein erheblicher Eintrag von PFAS in die Reststoffe der Anlage konnte selbst unter den Bedingungen des Worst-Case-Szenarios nicht nachgewiesen werden. Lediglich in der Schlacke wurden bereits im Referenzbetrieb geringe PFAS-Konzentrationen festgestellt. Im Worst-Case-Szenario zeigte sich ein Anstieg der Befunde. Diese gehen ausschließlich auf die in erhöhter Menge zudosierten Substanzen zurück. Ein Rostdurchfall scheint eine wahrscheinliche Erklärung zu sein.
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Siedlungsabfallverbrennung hohe fluorbezogene Abbauraten für polymere und nicht polymere PFAS aufweist. Werden nur die toxikologisch relevanten PFAS (ohne CF_4) betrachtet, liegt die Abbaurate bei Werten über 99,9999 %. Werden die CF_4-Emissionen in die Berechnung einbezogen, reduziert sich die Abbaurate auf 99,7 %. Dies ist der eindeutige Nachweis, dass die Siedlungsabfallverbrennung eine PFAS-Senke darstellt. Neben den hohen Temperaturen im Feuerraum (bis 1.200 °C) scheinen die Prozesse im Müllbett, insbesondere die anorganischen Bestandteile, einen bedeutenden Einfluss auf die Zersetzung der PFAS zu haben.
Durch das Vorhaben konnte nicht nur der Stand des Wissens bezüglich des Verhaltens von PFAS in der MVA deutlich gesteigert werden, sondern auch die Bewertungsmethodik des Prozesses verbessert werden. Ein vereinfachtes und genormtes Messverfahren für Abgase und eine Orientierung für die anspruchsvolle Analytik von Reststoffen der Anlage sind weitere Ergebnisse, die einen Mehrwert für die thermische Abfallbehandlung bedeuten.

LITERATURVERZEICHNIS

Aleksandrov, K., Gehrmann, H.-J., Hauser, M., Mätzing, H., Pigeon, D., Stapf, D., & Wexler, M. (2019). Waste incineration of Polytetrafluoroethylene (PTFE) to evaluate potential formation of per- and Poly-Fluorinated Alkyl Substances (PFAS) in flue gas. *Chemosphere, 226*, 898-906. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.03.191

Becanova, J., Melymuk, L., Vojta, S., Komprdova, K., & Klanova, J. (2016). Screening for perfluoroalkyl acids in consumer products, building materials and wastes. *Chemosphere, 164*, 322-329. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.08.112

Björklund, S., Weidemann, E., & Jansson, S. (2023). Emission of Per- and Polyfluoroalkyl Substances from a Waste-toEnergy Plant - Occurrence in Ashes, Treated Process Water, and First Observation in Flue Gas. *Environmental Science & Technology, 57*, 10089-10095. doi:10.1021/acs.est.2c08960

Cui, J., Guo, J., Zhai, Z., & Zhang, J. (2019). The contribution of fluoropolymer thermolysis to trifluoroacetic acid (TFA) in environmental media. *Chemosphere, 222*, 637-644. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.01.174

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (o.D.). *NA 134 - VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss*. Abgerufen am 23. Juni 2026 von https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/krdl/europaeische-gremien/wdc-grem:din21:391432826

EEA, European Environment Agency. (29. April 2025). *PFAS polymers in focus: supporting Europe's zero pollution, low-carbon and circular economy ambitions*. Von https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/pfas-polymers-in-focus abgerufen

Gehrmann, H.-J., Taylor, P., Aleksandrov, K., Bergdolt, P., Bologa, A., Blye, D., . . . Stapf, D. (2024). Mineralization of fluoropolymers from combustion in a pilot plant under representative european municipal and hazardous waste combustor conditions. *Chemosphere, 365*, 143403. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.143403

GKS - Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH. (o.D.). *Technische Anlagen*. Abgerufen am 23. Juni 2026 von https://www.gks-sw.de/index.php/de/technische-anlage

International Chemical Safety Cards (ICSC) 0575 - TETRAFLUOROMETHANE. (o.D.). Abgerufen am 23. Juni 2026 von https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=en&p_card_id=0575&p_version=2

Makowski, M. S., Sproul, C., Swartz, C., Everitt, J. I., Knaus, D. A., Wilbur, J. C., & Moon, R. E. (2022). Safety evaluation of carbon tetrafluoride as an inert hyperbaric breathing gas in Sprague-Dawley rats. *Toxicology and Applied Pharmacology, 444*, 116023. doi:10.1016/j.taap.2022.116023

Martin, K. V., Hilbert, T. J., Reilly, M., Christian, W. J., Hoover, A., Pennell, K. G., . . . Haynes, E. N. (2023). PFAS soil concentrations surrounding a hazardous waste incinerator in East Liverpool, Ohio, an environmental justice community. *Environmental Science and Pollution Research, 30*, 80643-80654. doi:10.1007/s11356-023-27880-8

Solo-Gabriele, H. M., Jones, A. S., Lindstrom, A. B., & Lang, J. R. (2020). Waste type, incineration, and aeration are associated with per- and polyfluoroalkyl levels in landfill leachates. *Waste Management*, 191-200. doi:10.1016/j.wasman.2020.03.034

Strandberg, J., Awad, R., Bolinius, D. J., Yang, J.-J., Sandberg, J., Bello, M. A., . . . Härnwall, E.-L. (2021). *PFAS in waste residuals from Swedish incineration plants.* IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd., Stockholm.

U.S. Environmental Protection Agency. (o.D.). *Other Test Method 45 (OTM-45) Measurement of Selected Per- and Polyfluorinated Alkyl*. Abgerufen am 23. Juni 2026 von https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/otm_45_semivolatile_pfas_1-13-21.pdf

U.S. Environmental Protection Agency. (o.D.). *Other Test Method 50 (OTM-50) Sampling and Analysis of Volatile Fluorinated Compounds from*. Abgerufen am 23. Juni 2026 von https://www.epa.gov/system/files/documents/2025-01/otm-50-release-1-r1.pdf

Wang, B., Yao, Y., Chen, H., Chang, S., Tian, Y., & Sun, H. (2020). Per- and polyfluoroalkyl substances and the contribution of unknown precursors and short-chain (C2–C3) perfluoroalkyl carboxylic acids at solid waste disposal facilities. *Science of The Total Environment, 705*, 135832.

Wang, Z., Buser, A. M., Cousins, I. T., Demattio, S., Drost, W., Johansson, O., . . . Leinala, E. (2021). A New OECD Definition for Per- and Polyfluoroalkyl Substances. *Environmental Science & Technology, 55*, 15575-15578. doi:10.1021/acs.est.1c06896

KONTAKT

Dr.-Ing. Daniel Wohter
wohter@teer.rwth-aachen.de
+49 24180-90718
Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft (TEER)
RWTH Aachen University
https://www.teer.rwth-aachen.de

M.Sc. Anna Maria Holfelder
anna.holfelder@kit.edu
+49 721608-24374
Institut für Technische Chemie (ITC)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
https://www.itc.kit.edu

Dr.-Ing. Ragnar Warnecke
Ragnar.Warnecke@gks-sw.de
+49 9721 6580-120
GKS – Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH
https://www.gks-sw.de

HINWEIS

Der Beitrag ist inhaltlich weitestgehend identisch mit dem Beitrag des Tagungsbandes der Berliner Konferenz Abfallwirtschaft und Energie, die am 28. und 29. Januar 2026 stattfand.

Asbest! Was verträgt die Kreislaufwirtschaft?

Roland Pomberger[1], Frank Melcher[2] & Klaus Philipp Sedlazeck[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und -wirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Geologie und Lagerstättenlehre, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Asbest ist in Österreich seit 1990 verboten, aus Gebäuden und Materialströmen verschwunden ist der Stoff jedoch nicht. Mit der Sanierung und dem Rückbau älterer Bauten treten asbesthaltige Produkte wieder zutage; zugleich kann Asbest geogen in natürlichen Gesteinen vorkommen, wie der Fall Burgenland mit behördlichen Schließungen mehrerer Steinbrüche gezeigt hat. Die dortigen Untersuchungen verdeutlichen die Spannweite zwischen nachweisbarem Asbest im Material, möglicher Faserfreisetzung und tatsächlicher Exposition.
Damit rückt eine Kernfrage der Kreislaufwirtschaft in den Fokus: Wie lassen sich Ressourcen im Kreislauf halten und zugleich gesundheitliche Risiken konsequent minimieren? Besonders heikel ist dies bei Bau- und Abbruchabfällen, in denen Asbest entweder gezielt zugesetzt wurde oder als Verunreinigung/Geogenanteil auftritt. Vor diesem Hintergrund sind klare, praktikable und harmonisierte Regeln und einheitliche Grenzwerte entlang der gesamten Wertschöpfungskette erforderlich: von Gewinnung und Aufbereitung bis zum Recycling.

1 EINLEITUNG

Die Verwendung von Asbest ist in Österreich seit 1990 verboten. Verschwunden ist der Werkstoff jedoch keineswegs. Im Gegenteil: Mit zunehmenden Sanierungs-, Modernisierungs- und Rückbaumaßnahmen älterer Gebäude kommen immer mehr Menschen mit dem Material in Kontakt. Asbest wurde aufgrund seiner technischen Eigenschaften über Jahrzehnte in einer Vielzahl von Produkten eingesetzt, insbesondere im Bauwesen. Obwohl die Verwendung schrittweise eingeschränkt und schließlich verboten wurde, befinden sich asbesthaltige Materialien bis heute in zahlreichen älteren Gebäuden. Damit verschiebt sich die Herausforderung zunehmend von der Verwendung hin zum Umgang mit dem vorhandenen Bestand und den daraus entstehenden Abfällen.
Wie aktuell und gesellschaftlich relevant diese Problematik ist, zeigt das Beispiel des Burgenlandes besonders deutlich. Anfang 2026 geriet die Region aufgrund von Asbestnachweisen in den Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit. Vier Steinbrüche in den Bezirken Oberwart und Oberpullendorf wurden nach Untersuchungen von Gesteins- und Materialproben behördlich geschlossen. Hintergrund ist das geologisch bedingte Vorkommen asbestiformer (faserförmiger) Minerale in Serpentingesteinen der penninischen Rechnitz-Bernsteiner Fenstergruppe (Koller, 1985). Damit wird im Burgenland eine Besonderheit sichtbar: Asbest ist hier nicht ausschließlich ein Relikt industrieller Nutzung, sondern kann auch als natürlich vorkommender Bestandteil von Gesteinen auftreten.
Die Diskussion weitete sich rasch über die Steinbrüche hinaus aus. Sorge entstand insbesondere dort, wo Gesteinsmaterial aus diesen Regionen bereits als Schotter oder Baustoff verwendet worden war. Untersuchungen und öffentliche Debatten über mögliche Belastungen von Straßen, Baustellen und anderen Flächen machten deutlich, wie komplex der Umgang mit asbesthaltigen Materialien werden kann, sobald diese einmal in die Stoffströme der Bauwirtschaft gelangt sind. Gleichzeitig zeigen die bisherigen Luftmessungen des Landes, dass aus den untersuchten Situationen keine unmittelbare flächendeckende Gesundheitsgefährdung abgeleitet werden konnte. Gerade diese Differenz zwischen nachweisbarem Asbest im Material, möglicher Faserfreisetzung und tatsächlicher gesundheitlicher Exposition macht den Fall zu einer anspruchsvollen Aufgabe für Behörden, Wirtschaft und Bevölkerung.
Das Burgenland-Beispiel stellt die Kernfrage der Kreislaufwirtschaft: Wie umgehen mit an sich verwertbaren Materialien, die zugleich ein dauerhaftes Gesundheitsrisiko bergen? Ziel ist, Stoffe im Kreislauf zu halten und Schadstoffe konsequent auszuschleusen. Für Asbest bedeutet das

besonders vorsichtige Steuerung von Rückbau-, Aufbereitungs- und Entsorgungsströmen. Die Grundspannung bleibt: Nicht alles, was technisch kreislauffähig ist, sollte zurück in den Kreislauf? Der aktuelle Diskurs im Burgenland ist daher mehr als eine regionale Asbestdebatte. Er ist ein Beispiel dafür, dass die Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft nicht nur die Frage beantworten muss, wie Stoffe möglichst effizient wiederverwendet werden können, sondern auch, welche Stoffe dauerhaft aus bestimmten Kreisläufen ausgeschlossen werden müssen und welche Konzentrationen noch tolerierbar sind. Asbest stellt damit einen besonderen Stresstest für das Leitbild der Kreislaufwirtschaft dar: zwischen Ressourcenschonung, Gesundheitsschutz und dem Prinzip, Risiken bereits an der Quelle zu minimieren.

2 WAS IST ASBEST?

Asbest ist aus mineralogischer Sicht eine klar definierte Gruppe natürlich vorkommender Silikatminerale (häufigste Mineralgruppe der Erde), die in natürlichen Gesteinen vorkommen und eine Faserstruktur aufweisen, wobei das faserige Vorkommen der Minerale nicht zwangsläufig ist. Offiziell werden sechs Minerale als Asbest anerkannt: Chrysotil aus der Serpentin-Gruppe (Schichtsilikat) sowie die fünf Amphibol-Asbeste Tremolit, Aktinolith, Anthophyllit, Amosit und Krokydolith (Kettensilikate; TRGS 517, 2013).
Asbestfasern sind faserförmige Partikel aus den sechs genannten Mineralen, die geogen vorliegen oder bei technischer Zerkleinerung entstehen. Gesundheitsrelevant ist nur ein Teil davon: die „WHO-Fasern“ (Länge > 5 µm, Durchmesser < 3 µm, L/D > 3:1), die als alveolengängig gelten und tief in die Lunge vordringen können. WHO-Fasern sind damit ein geometrisch definierter Teil der Asbestfasern; nur wenn Asbestfasern diese Kriterien erfüllen, gelten sie als besonders kritisch. Zum Vergleich: Das menschliche Haar weist einen Durchmesser zwischen 0,04 bis 0,12 mm auf und ist somit über 10-mal so dick.
Geologisch betrachtet kommen Minerale der Asbestgruppe weltweit in verschiedenen Gesteinsarten des gesamten Gesteinskreislaufs vor. Besonders häufig sind sie in metamorphen Systemen, aber auch in basischen bis ultrabasischen Ausgangsgesteinen und deren Umwandlungsprodukten zu finden, darunter Serpentinit, Amphibolit oder Diabas. Über Erosion und Umlagerung gelangen entsprechende Partikel zudem auch in Sedimente.
Aus umwelttechnischer Sicht kommt es entscheidend darauf an, in welcher Form Asbest im Gestein vorliegt: Liegt er eher kompakt und körnig, eingebettet in der Gesteinsmatrix vor, ist das in der Regel eher als unproblematisch einzustufen. Kritisch sind feine, faserige Vorkommen, häufig in Rissen und Störungszonen, da sie locker gebunden sind und bei Abbau, Aufbereitung oder mechanischer Belastung leicht freigesetzt werden. Kompakte, nicht-faserige Vorkommen können zwar ebenfalls durch starke mechanische Einwirkung in kleinere Bestandteile zerlegt werden; die Wahrscheinlichkeit, dass dabei gefährliche WHO-Fasern entstehen und freigesetzt werden, ist jedoch geringer.
Asbest weist eine hohe thermische und chemische Beständigkeit auf und diente bis in die späten 1980er-Jahre weltweit als Bau- und Industriestoff. Im Bauwesen kam er u. a. als Dicht- und Dämmmaterial, Spritzasbest, in Boden und Wandbelägen sowie in Asbestzementprodukten und -platten vor als auch in Speicherheizungen vor (BAWP, 2023). Daher findet sich Asbest heute in vielen Abfallströmen, vor allem bei Bau- und Abbruchabfällen. Zusätzlich kann er geogen in natürlichen Materialien, etwa in Bodenaushub, auftreten.

3 GRENZWERTE

Gewinnung, Aufbereitung, Weiterverarbeitung
In Österreich gibt es keinen ausdrücklichen Grenzwert für den Asbest-Gesamtmineralgehalt bei Gewinnung, Aufbereitung, Weiterverarbeitung und direkter Wiederverwendung natürlicher Gesteine. Aus der CLP-Verordnung (2008) ergibt sich jedoch faktisch ein Grenzwert von 0,1 Masse-%. Gemische über diesem Wert sind als „Carc. 1A“ (Karzinogenität, Kategorie 1A) einzustufen, was auch im Einklang mit der deutschen Gefahrstoffverordnung (GefStoffV, 2010)

ist, die eine Gewinnung und Nutzung natürlicher Rohstoffe ab > 0,1 Masse-% verbietet. Diese ist natürlich in Österreich ohne rechtliche Bindung, wird aber als Referenz genannt. Darüber hinaus regelt die CLP-Verordnung (2008) Einstufung und Kennzeichnung, nicht aber die Verkehrsfähigkeit etwaiger Materialien und das Produktsicherheitsgesetz (PSG, 2004) greift nur bei abgepackten Verbraucherprodukten.
Das unionsrechtliche Asbestverbot nach REACH (2006) und die österreichische Chemikalien-Verbotsverordnung (Chem-VerbotsV, 2011) untersagen die Herstellung, das Inverkehrbringen und die Verwendung von Asbestfasern sowie von Erzeugnissen oder Gemischen, denen Asbestfasern absichtlich zugesetzt wurden. Diese Verbote richten sich nicht gegen Natursteine mit geogenen Asbestgehalten, da hier kein absichtlicher Zusatz vorliegt und sind daher nicht anwendbar.
Das Mineralrohstoffgesetz (MinroG, 1999) befasst sich mit dem Gewinnen und Aufbereiten, nicht jedoch das Inverkehrbringen oder die Verwendung mineralischer Rohstoffe und adressiert die Gewinnung über den Arbeitnehmerschutz. Der entsprechende Grenzwert wurde mit 1.1.2026 von 100.000 auf 10.000 Fasern/m³ gesenkt.

Recycling
Für das Recycling von Baustoffen gelten im Unterschied zum Abbau natürlicher mineralischer Rohstoffe ausdrückliche Grenzwerte. Demnach sind Abfälle mit mehr als 0,1 Masse-% Asbest gemäß Abfallverzeichnisverordnung (AVV, 2020) als gefährlich einzustufen und dürfen nicht zu Recycling-Baustoffen verarbeitet werden. Die Recycling-Baustoffverordnung verlangt zudem, dass Recycling-Baustoffe weitestgehend asbestfrei sind und kontaminierte Fraktionen von vornherein ausgeschlossen bzw. getrennt behandelt werden. Als Stand der Technik für die Analytik gilt TRGS 517 (Nachweisgrenze 0,008 Masse-%) und ein Recycling ist nur zulässig, wenn der Asbestgehalt unter dieser Nachweisgrenze liegt. Dies konkretisiert der BAWP (2023) etwa für RC-Gips, aber auch für andere Materialien. Besonders zu beachten sind ältere Bauwerke und Materialien, bei denen Asbest entweder gezielt als Zuschlagstoff eingesetzt wurde oder als Verunreinigung aus der Produktion bzw. aus anderen asbesthaltigen Bauteilkomponenten vorliegt; entsprechende Bauteile, wie etwa bei Putzen, Spachtelmassen und Fliesenklebern sind getrennt zu erfassen, zu untersuchen und bei Überschreitung der genannten Schwellen von der Verwertung auszuschließen.
Aus diesen Grenzwertunterschieden resultiert ein Spannungsfeld zwischen Primärproduktion, respektive dem Einsatz von Primärrohstoffen und dem Recycling.

4 KONSEQUENZEN

Die unterschiedlichen Grenzwerte zwischen Erstverwendung und Recycling haben mehrere negative Folgen: Geogen gering belastete Recyclingfraktionen aus der Kreislaufwirtschaft müssten ausgeschleust und kostenintensiv entsorgt werden, obwohl ihr Gesamtasbestgehalt unterhalb des für Primärrohstoffe maßgeblichen Grenzwertes liegt. Dadurch steigen Entsorgungsaufwand, Deponiebedarf, CO_2-Emissionen und Kosten, während wertvolle Primärrohstoffe weiterhin abgebaut werden. Zudem entsteht ein Fehlanreiz: Wenn ein RC-Baustoff mit beispielsweise 0,020 Masse-% Asbest nicht wiederverwendet werden darf, wird er häufig durch einen Primärrohstoff mit bis zu 0,099 Masse-% ersetzt; der Gesamtasbestgehalt in den verwendeten Baustoffen sinkt somit nicht zwingend, es kann sogar zu einem Anstieg kommen. Für Betreiberinnen und Betreiber von Aufbereitungsanlagen sowie Bauherrschaften führt das Regelungsgefälle zu Rechts- und Planungssicherheitseinbußen: Prüf- und Dokumentationsaufwand nehmen zu, Haftungsrisiken wachsen, Investitionen in Recyclingtechnologien werden erschwert, und der Vollzug wird uneinheitlich. Insgesamt unterminiert das Grenzwert-Ungleichgewicht ökologische Ziele, verursacht höhere Kosten und stiftet Verunsicherung entlang der gesamten Wertschöpfungskette, vom Endverbraucher war bisher noch gar nicht die Rede.

5 SCHLUSSFOLGERUNG UND EMPFEHLUNG

Um die Versorgung mit Primär- und Sekundärrohstoffen österreichweit ökologisch wie ökonomisch abzusichern und das derzeitige Ungleichgewicht zwischen Erstverwendung und Recycling zu beheben, ist eine Harmonisierung der Grenzwerte erforderlich. Für natürlich vorkommenden, geogen bedingten Asbest in ungebundenem oder bituminös gebundenem Gestein soll der für Primärmaterialien maßgebliche Grenzwert von 0,1 Masse-% auch im Recycling gelten. Damit bleibt geogen gering belastetes RC-Material im Kreislauf, ohne den Gesundheits- und Umweltschutz zu unterlaufen.

Gleichzeitig ist bei künstlich zugesetzten Asbestfasern ein strenger Grenzwert beizubehalten: Für typischerweise betroffene Hochbaurestmassen (z. B. Putze, Spachtelmassen, Fliesenkleber) gilt weiterhin 0,008 Masse-%. Solche Fraktionen sind gezielt zu identifizieren, vor Ort zu trennen und aus dem Kreislauf auszuschleusen.

Dabei könnte ein Formulierung für die Regelsetzung folgendermaßen lauten:

> ***„****Recycling von ungebundenem oder bituminös gebundenem Gestein mit Asbestgehalt bis 0,1 Masse-% ist zulässig, wenn*
>
> - *keine künstliche Asbestzugabe vorliegt und*
> - *die Fasern fest in der kompakten Gesteinsmatrix eingebunden sind und bei sachgerechter Aufbereitung/Verwendung keine gesundheitsrelevanten Faseremissionen zu erwarten sind (Nachweis nach Stand der Technik).*
>
> *Für Materialien mit künstlich zugesetztem Asbest gilt weiterhin ein Grenzwert von 0,008 Masse-%; diese sind aus dem Recyclingstrom auszuscheiden und entsprechend zu behandeln/entsorgen.“*

Damit wäre einerseits sichergestellt, dass für primäre Gesteinsprodukte auch im Recycling harmonisierte Grenzwerte gelten und andererseits künstlich zugesetzte Asbestverunreinigungen strenger geregelt bleiben. Diese Differenzierung verbindet Versorgungssicherheit und Kreislaufwirtschaft mit klaren Schutzstandards für Gesundheit und Umwelt. Das Risiko, dass in Österreich Baurestmassenrecycling und Kreislaufwirtschaft im Bauwesen verunmöglicht werden könnten, wäre dadurch gebannt.

LITERATURVERZEICHNIS

Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023 – Teil 1 (BAWP, 2023). Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (Chem-VerbotsV, 2011). Chemikalien-Verbotsverordnung 2003 (BGBl. II Nr. 477/2003).

Bundesrepublik Deutschland (GefStoffV, 2010). Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV). Bundesgesetzblatt I.

Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union (CLP-Verordnung, 2008). Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (CLP-Verordnung)

Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union (REACH, 2006). Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH).

Koller, F. (1985) Petrologie und Geochemie der Ophiolite des Penninikums am Alpenostrand. Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, Band 128, S. 83-150, Wien.

Republik Österreich (MinroG, 1999). Mineralrohstoffgesetz (MinroG), BGBl. I Nr. 38/1999.

Republik Österreich. (AVV, 2003). Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über ein Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnisverordnung – AVV), BGBl. II Nr. 570/2003.

Republik Österreich. (PSG, 2004). Produktsicherheitsgesetz 2004 (PSG 2004), BGBl. I Nr. 16/2005.

TRGS 517 (2013): Technische Regeln für Gefahrstoffe: Tätigkeiten mit potenziell asbesthaltigen mineralischen Rohstoffen und daraus hergestellten Gemischen und Erzeugnissen.

ferroDECONT
JUST PUMPING IRON

UMWELTTECHNIK AUS LEOBEN

BELASTETES WASSER. KLAR GELÖST.



Schwermetalle entfernen. PFAS konzentrieren und weiterbehandeln.

ferrodecont®-Verfahren

Nullwertiges Eisen im Fließbett

PFAS-Kombinationsverfahren

Schaumfraktionierung + elektrochemische Oxidation

Von der Machbarkeitsprüfung bis zur mobilen Anlage.

Projekt besprechen

www.ferrodecont.at

office@ferrodecont.at


FISCHER
Ratzfatz

Vorträge

Waste Culture | Library

Ihr Wissen auf https://library.wasteculture.com/
Zur Entwicklung einer nachhaltige Abfallkultur. Weltweit.

Studium

Studienrichtung UKT
(Umwelt- & Klimaschutztechnik)

Exkursionen

Industrienahe Praktika

Events

Recy & DepoTech
(Abfallwirtschaftliche Konferenz)

Tagungen, Seminare & Workshops



Forschung

Arbeitsgruppe
Abfallverfahrenstechnik

Arbeitsgruppe
Future Waste & Abfallwirtschaft

Versuchsstand für sensor-gestützte Sortierung

DIGITAL Waste Research LAB

Arbeitsgruppe
Methoden & Umweltanalytik

Arbeitsgruppe
Umweltsanierung & mineralische Abfälle

Kreislaufwirtschaft im Umbruch – administrative Hürde oder gerechtfertigtes Mittel?

Tatjana Katalan
DORDA Rechtsanwälte GmbH, Wien – Graz – Klagenfurt, Österreich

KURZFASSUNG: Im Zentrum der europäischen Umwelt- und Industriepolitik steht der Übergang zu einem zirkulären Wirtschaftsmodell. In Reaktion aufsteigende Ressourcenverbräuche und zunehmende Abfallmengen ergingen zahlreiche Aktionspläne und Gesetzespakete, die zu einer nachhaltigen und vor allem auch zukunftsfähigen Wirtschaft führen sollen. Die regulatorischen Instrumente sind vielfältig und finden sich in verschiedenen Rechtsakten der EU wieder: So knüpfen Vorgaben für die Produktgestaltung an den Beginn des Lebenszyklus eines Produkts an, während die erweiterte Herstellerverantwortung umfangreiche Pflichten am Ende des Lebenszyklus vorsieht, mit dem Ziel der Rücknahme und der Sammlung für das Recycling. Den Regelungen gemein: Sie gehen nicht selten mit einem erheblichen Mehraufwand für die Wirtschaftsteilnehmer einher. Vor diesem Hintergrund werden in vorliegendem Beitrag die neuen EU-Verordnungen über Verpackungen und Verpackungsabfälle sowie über Batterien und Altbatterien dargestellt und diskutiert.

1 DER WEG ZUR EUROPÄISCHEN KREISLAUFWIRTSCHAFT

Seitens der EU wird seit Jahren die umfassende regulatorische Strategie zur Etablierung geschlossener Stoffkreisläufe gefördert. Das im Juni 2018 im Amtsblatt der EU veröffentlichte **Circular Economy Package („Kreislaufwirtschaftspaket")** stellt einen wesentlichen Teil dieser Strategie dar. Es umfasste insbesondere Anpassungen des Abfallrechts, darunter ambitionierte Recyclingquoten, Vorgaben zur getrennten Sammlung sowie Maßnahmen zur Abfallvermeidung. Das damit verfolgte Ziel war, Produkte, Materialien und Ressourcen möglichst lange im Wirtschaftskreislauf zu erhalten und die Abfallerzeugung zu minimieren (Holzer, 2018).

Aufbauend auf dem Circular Economy Package entwickelte die Europäische Kommission im März 2020 als Teil des europäischen Green Deals einen neuen **Circular Economy Action Plan ("CEAP")** (Mitteilung der Kommission, 11.03.2020, COM(2020) 98 final).

Der CEAP bildet seither den strategischen Rahmen für eine Vielzahl weiterer legislativer und nicht-legislativer Maßnahmen der EU. Zu den zentralen Weiterentwicklungen zählen insbesondere die **Verordnung (EU) 2025/40 über Verpackungen und Verpackungsabfälle (Packaging and Packaging Waste Regulation, "PPWR")**, die auf eine EU-weit harmonisierte Reduktion von Verpackungsabfällen sowie eine Stärkung von Wiederverwendung und Recycling abzielt, sowie die **Verordnung (EU) 2023/1542 über Batterien und Altbatterien („EU-BatterieVO")**, die umfassende Anforderungen an Nachhaltigkeit und Kreislaufführung über den gesamten Lebenszyklus von Batterien hinweg festlegt. Weitere, im Rahmen des CEAP ergangene Rechtsakte sind etwa die Ökodesign-Verordnung (Verordnung (EU) 2024/1781), eine neue Abfallverbringungs-Verordnung (Verordnung (EU) 2024/1157), eine Verordnung zur Vermeidung der Freisetzung von Kunststoffgranulat zur Verringerung der Umweltverschmutzung durch Mikroplastik (Verordnung (EU) 2025/2365), die Reparaturrichtlinie (Richtlinie (EU) 2024/1799) und die Richtlinie zur Stärkung der Verbraucher für den ökologischen Wandel (Richtlinie (EU) 2024/825, Empowering-RL). Im Rahmen des CEAP kam es auch zu einer Änderung der Industrieemissions-Richtlinie (Richtlinie (EU) 2024/1785). Im März 2022 wurde die EU-Strategie für nachhaltige und kreislauffähige Textilien angenommen (Mitteilung der Kommission, 30.03.2022, COM(2022) 141 final). Die Kommission hat 2023 ebenfalls eine neue Altfahrzeugverordnung vorgeschlagen. Auf dem CEAP baut auch der **Circular Economy Act ("CEA")** auf, dessen Verabschiedung für Ende 2026 geplant

ist. Er soll den Übergang Europas zu einer ressourceneffizienten, abfallarmen und klimaneutralen Wirtschaft weiter beschleunigen (EU-Kommission, Circular Economy).

2 VERORDNUNG (EU) 2025/40 ÜBER VERPACKUNGEN UND VERPACKUNGSABFÄLLE

Die PPWR harmonisiert die Rechtsvorschriften über den gesamten Lebenszyklus von Verpackungen. Sie enthält nicht nur Bestimmungen zur Entwicklung und zu den Eigenschaften von Verpackungen, sondern macht auch Vorgaben zu deren Recycling. Der Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastung sollen deutlich reduziert und gleichzeitig ein einheitliches, zukunftsfähiges Verpackungssystem in der EU geschaffen werden (vgl. ErwGr2 VO (EU) 2025/40).

Die PPWR ist seit dem 11. Februar 2025 in Kraft. Erste Verpflichtungen gelten ab dem 12. August 2026. Sie ersetzt die bisherige Verpackungsrichtlinie 94/62/EG und gilt im Gegensatz zu dieser unmittelbar in allen Mitgliedstaaten, ohne, dass nationale Umsetzungsakte erforderlich sind. Dennoch sind nationale Gesetze, die eine reibungslose Anwendung in Österreich ermöglichen, zu erwarten (vgl. Art 70 f VO (EU) 2025/40). Konkrete Entwürfe des nationalen Gesetzgebers liegen bislang noch nicht vor.

Die PPWR gilt für alle Verpackungen und Verpackungsabfälle, unabhängig vom verwendeten Material und davon, ob diese in der Industrie, in sonstigen Herstellungs-, Einzelhandels- oder Vertriebsunternehmen, in der Verwaltung, im Dienstleistungsbereich oder in Haushalten verwendet werden oder dort anfallen (vgl. Art 2 Abs 1 VO (EU) 2025/40). Die PPWR definiert eine Reihe von Wirtschaftsakteuren. So treten über die nächsten Jahre diverse Pflichten etwa für Erzeuger, Lieferanten und Importeure in Kraft (vgl. Art 3 VO (EU) 2025/40).

Zu Beginn steht der **Lieferant**. Zu den Lieferanten zählen Personen, die Verpackungen oder Verpackungsmaterial an einen Erzeuger liefern. Die Lieferanteneigenschaft hängt maßgeblich davon ab, dass der belieferte Wirtschaftsakteur ein Erzeuger im Sinne der PPWR ist (dazu sogleich). Lieferanten haben dem Erzeuger alle Informationen zur Beschaffenheit der Verpackungen zur Verfügung zu stellen, damit dieser die Konformität der Verpackungen mit der PPWR beurteilen und nachweisen kann (vgl. Art 16 VO 2025/40).

Der **Erzeuger** ist, wer Verpackungen oder verpackte Produkte herstellen lässt oder selbst herstellt, um diese in der EU in Verkehr zu bringen. Der Erzeuger ist nicht unbedingt der tatsächliche Produzent einer Verpackung (EU-Kommission, Leitlinien zur Verordnung (EU) 2025/40 über Verpackungen und Verpackungsabfälle, 2026). Es können grob drei alternative Konstellationen unterschieden werden:

- Erzeuger ist, wer ein anderes Unternehmen mit der Entwicklung oder Herstellung von Verpackungen oder (der Abfüllung von) verpackten Produkten **beauftragt** und diese sodann unter eigenem Namen oder eigener Marke in Verkehr bringt.
- Erzeuger ist, wer leere **Verpackungen** im Sinne der PPWR **herstellt**. Dazu zählen Transportverpackungen, Serviceverpackungen (sofern diese bereits im leeren Zustand ihre endgültige Form erreicht haben) und Primärproduktionsverpackungen (EU-Kommission, Leitlinien zur Verordnung (EU) 2025/40 über Verpackungen und Verpackungsabfälle, 2026).
- Erzeuger ist, wer **verpackte Produkte abfüllt**, d.h. die letzten Verarbeitungsschritte setzt. Dies gilt für Verkaufsverpackung und Umverpackungen. Diese erreichen ihre endgültige Form erst mit ihrer Befüllung oder Anbringung und stellen davor Verpackungsmaterial dar. Wer solches produziert, kann Lieferant im Sinne der PPWR sein (Engelmann, 2026).

Der Erzeuger darf nur solche Verpackungen in Verkehr bringen, die den Anforderungen der PPWR entsprechen. Er ist verpflichtet, ein **Konformitätsbewertungsverfahren** durchzuführen. Der Erzeuger stellt sodann eine EU-Konformitätserklärung aus und hat diese zusammen mit der technischen Dokumentation des Bewertungsverfahrens fünf Jahre nach Inverkehrbringen von

Einwegverpackungen bzw. zehn Jahre nach Inverkehrbringen von wiederverwendbaren Verpackungen bereitzuhalten. Mit Ausstellung der Konformitätserklärung trägt er die Verantwortung dafür, dass die von ihm in Verkehr gebrachten Verpackungen den Anforderungen der Artikel 5 bis 12 der PPWR entsprechen. Diese bestehen etwa in Bezug auf die Recyclingfähigkeit von Verpackungen (vgl. Art 6 VO 2025/40), den Mindestrezyklatanteil in Kunststoffverpackungen (vgl. Art 7 VO 2025/40), die Kompostierbarkeit (vgl. Art 9 VO 2025/40) oder auch deren Gestaltung (vgl. Art 10 VO 2025/40, wonach der Erzeuger (oder Importeur) sicherstellt, "*dass die in Verkehr gebrachten Verpackungen so gestaltet sind, dass ihr Gewicht und ihr Volumen unter Berücksichtigung der Form und des Materials, aus dem die Verpackungen bestehen, auf das zur Gewährleistung ihrer Funktionsfähigkeit erforderliche Maß reduziert sind*").

Importeur ist jede in der EU ansässige Person, die Verpackungen aus einem Drittland im Unionsgebiet in Verkehr bringt. Der Importeur darf ebenfalls nur Verpackungen in Verkehr bringen, die den Anforderungen der PPWR entsprechen. Er hat sicherzustellen, dass für die betreffende Verpackung ein Konformitätsbewertungsverfahren durchgeführt wurde, die Konformität besteht und diese nachgewiesen werden kann. Bestehen Anhaltspunkte, dass die betreffende Verpackung den Anforderungen der PPWR nicht entsprechen, hat der Importeur die Konformität der Verpackungen selbst herzustellen oder sie vom Markt zu nehmen (vgl. insb. Art 18 VO 2025/40).

Die Vorgaben der PPWR bringen somit entlang der gesamten Lieferkette zusätzlichen administrativen Aufwand: Erzeuger und Importeure haben sicherzustellen, dass die von ihnen in Verkehr gebrachten Verpackungen den neuen gesetzlichen Anforderungen entsprechen, durchgeführte Konformitätsbewertungsverfahren zu dokumentieren und diese Dokumentation bereitzuhalten. Sie sind bei der Konformitätsbewertung vor allem auf Informationen angewiesen, die ihre Lieferanten bereitzustellen haben.

3 VERORDNUNG (EU) 2023/1542 ÜBER BATTERIEN UND ALTBATTERIEN

Batterien sind eine unverzichtbare Energiequelle und Schlüsseltechnologie für den Übergang zu Klimaneutralität und zu einer kreislauforientierten Wirtschaft. Die weltweite Nachfrage nach Batterien steigt rasant und wird bis 2030 voraussichtlich um das 14-fache steigen. 17 % dieser Nachfrage könnten auf die EU entfallen (EU-Kommission, Batteries).

Die EU-BatterieVO regelt den gesamten Lebenszyklus von Batterien von der Rohstoffgewinnung über Herstellung und Nutzung bis hin zur Sammlung, Wiederverwendung und zum Recycling. Sie regelt produktbezogene Anforderungen sowie Vorgaben für den Umgang mit Altbatterien und enthält insbesondere Vorschriften zu Nachhaltigkeit, Sicherheit, Kennzeichnung sowie zur Sammlung und Behandlung von Altbatterien. Ziel ist es, die Umweltbelastung durch Batterien zu reduzieren, deren Nachhaltigkeit und Sicherheit zu erhöhen sowie die Ressourceneffizienz und Kreislaufführung zu stärken (vgl. ErwGr 1 und 2; Art 1 Abs 1 VO (EU) 2023/1542).

Die EU-BatterieVO gilt seit dem 18. Februar 2024 unmittelbar in allen Mitgliedstaaten, wobei in Bezug auf einige Bestimmungen ein späteres Inkrafttreten vorgesehen ist. Die EU-BatterieVO ersetzt die bislang geltende Batterierichtlinie 2006/66/EG. In Österreich wird dazu aktuell das EU-Batterienverordnung Begleitgesetz ("BattBegG") ausgearbeitet.

Der Anwendungsbereich der EU-BatterieVO ist weit gefasst. Sie gilt für sämtliche Batteriekategorien, darunter Gerätebatterien, Starterbatterien, Industriebatterien, Elektrofahrzeugbatterien sowie Batterien für leichte Verkehrsmittel und dies unabhängig von Form, Größe, Zusammensetzung oder Verwendung und auch dann, wenn Batterien in Produkte integriert sind (vgl. im Detail Art 1 Abs 3 VO (EU) 2023/1542).

Die Verordnung adressiert eine Vielzahl von Wirtschaftsakteuren entlang der Liefer- und Wertschöpfungskette. Die EU-BatterieVO sieht (der PPWR vergleichbare) Pflichten im Hinblick auf die Produktgestaltung und -kennzeichnung sowie die Bewertung und Dokumentation der Konformität von in Verkehr gebrachten Batterien vor. In Kapitel VIII der EU-BatterieVO ist die Bewirtschaftung von Altbatterien geregelt. In diesem Kontext sieht sie eine sogenannte erweiterte Herstellerverantwortung vor, wonach der Hersteller nicht nur für das Inverkehrbringen von Batterien, sondern insbesondere auch für die Rücknahme, Sammlung, Behandlung und das Recycling von Altbatterien verantwortlich ist. Hersteller haben die Organisation und Finanzierung der getrennten Sammlung und Behandlung von Altbatterien sicherzustellen sowie Systeme zur Rücknahme und Verwertung einzurichten oder sich daran zu beteiligen (vgl. Art 56 Abs 4 Buchstabe a, Art 59, Art 60, Art 61 VO (EU) 2023/1542). In Bezug auf bestimmte Batterien sieht die Verordnung Sammelquoten vor, die in den nächsten Jahren graduell steigen (Suchanek & Ruiß, 2024).

Hersteller im Sinne der EU-Batterie-VO ist jede Person, die Batterien herstellt oder herstellen lässt und diese unter ihrem eigenen Namen erstmals in der EU in Verkehr bringt, sowie jene, die Batterien aus Drittländern importiert oder die Batterien unter eigenem Namen weiterverkauft (vgl. im Detail Art 3 Abs 1 Z 47 VO (EU) 2023/1542). Unter den Herstellerbegriff fallen damit insbesondere klassische Produzenten mit eigener Herstellung, Eigenmarkeninhaber, die Batterien herstellen lassen und unter eigener Marke vertreiben, Importeure und Vertreiber, sofern diese die Batterien unter eigenem Namen anbieten. Hersteller, die Batterien über Fernabsatzverträge direkt an Endnutzer in einem Mitgliedstaat verkaufen und selbst nicht in diesem Mitgliedstaat, sondern in einem anderen Mitgliedstaat oder in einem Drittland niedergelassen sind, haben in den Mitgliedstaaten, in denen sie Batterien verkaufen, jeweils einen Bevollmächtigten für die erweiterte Herstellerverantwortung zu benennen. Dieser ist sodann für die Erfüllung der Pflichten im Rahmen der erweiterten Herstellerverantwortung verantwortlich.

Das BattBegG (welches sich Stand Juni 2026 noch im Entwurfsstadium befindet), sieht eine Reihe an Voraussetzungen vor, die für die Registrierung eines Bevollmächtigten für die erweiterte Herstellerverantwortung erfüllt sein müssen. So ist es nach dem Gesetzesentwurf insbesondere erforderlich, dass der Bevollmächtigte seinen Sitz im Inland hat und über eine inländische Zustelladresse verfügt. Ein Hersteller kann jeweils nur einen Bevollmächtigten bestellen, während verschiedene Hersteller denselben Bevollmächtigten bestellen können (vgl § 14 BattBegG).

Die EU-Batterie-VO sieht eine umfassende erweiterte Herstellerverantwortung vor. Die Sicherstellung der getrennten Sammlung und Rücknahme von Altbatterien wird verpflichtend. Viele Details, so etwa die tatsächliche Ausgestaltung der Sammlung und Rücknahme von Altbatterien sowie Fragen zum Bevollmächtigten für die erweiterte Herstellerverantwortung, sind noch ungeklärt, wobei das diesbezügliche nationale BattBegG abzuwarten bleibt.

4 KRITISCHE BETRACHTUNG

4.1 PPWR: Mehraufwand und noch keine Rechtssicherheit

Die PPWR verfolgt das ambitionierte ökologische Ziel einer Trendumkehr im Verpackungsbereich: Weniger Verpackungsabfall, mehr Ressourceneffizienz und Zirkularität. Demgegenüber steht ein beachtlicher administrativer und organisatorischer Mehraufwand für Unternehmen, der sich entlang der gesamten Lieferkette auswirken wird. Dies in wirtschaftlich schwierigen Zeiten. Der Aufwand ergibt sich im Kontext der Konformitätsbewertung aus den umfassenden Prüf-, Dokumentations- und Nachweispflichten. Diese sind nicht punktuell, sondern kontinuierlich zu erfüllen und die relevante Dokumentation über mehrere Jahre zum Nachweis gegenüber den Behörden bereitzuhalten. Unternehmen, die Verpackungen nicht selbst herstellen, sondern zukaufen, werden größere Aufmerksamkeit auf ihr Lieferantenmanagement legen müssen. Da jede einzelne Verpackungsvariante eine eigene Konformitätsbewertung und -erklärung erfordert, kann

bereits bei mittelgroßen Produktportfolios ein erheblicher Mehraufwand entstehen. Es gilt, zunächst alle eingesetzten Verpackungen zu erfassen und konkreten Lieferanten zuzuordnen. Darauf aufbauend werden strukturierte Prozesse zur Einholung und Prüfung der erforderlichen Nachweise sowie eine unternehmensinterne Überwachung notwendig sein, um Vollständigkeit und Compliance sicherzustellen (Großhennrich, 2026).

Die PPWR gibt zwar einen allgemeinen, verbindlichen Rahmen für die Gestaltung von und den Umgang mit Verpackungen und Verpackungsabfällen vor, weitere Klarstellungen sind aber notwendig. Einerseits stehen noch präzisierende Rechtsakte der Kommission aus. In den kommenden Jahren werden zahlreiche Detailfragen durch die Europäische Kommission zu konkretisieren sein. Dies betrifft insbesondere Fragen der Bewertung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen oder der Ermittlung des Rezyklatanteils (vgl. Art 6 Abs 4 und Art 7 Abs 8 VO (EU) 2025/40). Andererseits belässt die PPWR in zentralen Bereichen einen erheblichen Gestaltungsspielraum bei den Mitgliedstaaten. Dies betrifft insbesondere Fragen der Durchsetzung und Behördenorganisation sowie die Ausgestaltung von Sanktionen. Zwar verpflichtet die Verordnung die Mitgliedstaaten dazu, wirksame, verhältnismäßige und abschreckende Sanktionen festzulegen, konkretere Vorgaben – etwa deren Höhe und Art– werden nicht gemacht. In der Praxis bedeutet das, dass sich das konkrete Sanktionsregime von Mitgliedstaat zu Mitgliedstaat unterscheiden kann und wohl auch wird (Mengelée, 2026).

4.2 EU-Batterie-VO: Konkretisierungsbedarf und Verzögerungen

Die EU-Batterie-VO bringt umfassende Neuerungen und weitet die Pflichten für Batteriehersteller stark aus. Inhaltlich hervorzuheben ist die erweiterte Herstellerverantwortung. Während Registrierungs- und Berichtspflichten vor allem einen administrativen Mehraufwand bringen, werden Hersteller nun auch verpflichtet, einen wirtschaftlichen Beitrag zur Kreislaufführung von Altbatterien zu leisten. Es liegt an diesen (bzw. an den von diesen beauftragen Organisationen oder Bevollmächtigten), Rücknahme- und Sammelstellen einzurichten und die zukünftigen Sammelquoten zu erreichen. Die EU-Batterie-VO bedarf aber weiterer Konkretisierungen. In den kommenden Jahren sind einerseits Durchführungsrechtsakte der Kommission selbst zu erwarten, andererseits hat die konkrete Ausgestaltung der erweiterten Herstellerverantwortung durch die nationalen Gesetzgeber zu erfolgen (Schneikert, 2025). Aspekte wie die Regelung der Behördenorganisation oder des Sanktionsregimes bleiben den Mitgliedstaaten überlassen.

Die Konkretisierungen der EU-Batterie-VO lassen auf sich warten: Das nationale Begleitgesetz zur EU-Batterie-VO befindet sich noch im Entwurfsstadium. Auch auf europäischer Ebene kommt es zu Verzögerungen: Die in Artikel 48 Absatz 5 der EU-Batterie-VO vorgesehenen Leitlinien für die Anwendung der festgelegten Sorgfaltspflichten wurden nicht, wie ursprünglich vorgesehen, bis 18. Februar 2025 veröffentlicht. Mit der am 30. Juli 2025 veröffentlichten Verordnung (EU) 2025/1561 zur Änderung der EU-Batterie-VO wurde dieser Termin auf den 26. Juli 2026 verschoben. Auch den Wirtschaftsakteuren wurde entsprechend mehr Zeit für die Umsetzung der Sorgfaltspflichten eingeräumt. Während diese ursprünglich ab dem 18. August 2025 gelten sollten, werden die entsprechenden Anforderungen, insbesondere zur Anpassung der Unternehmensstrategie und des Managementsystems, zur Einführung von Risikomanagementmaßnahmen sowie zu unabhängiger Überprüfung und Offenlegung, nun erst ab dem 18. August 2027 wirksam. Diese Verzögerungen dürften aber zu begrüßen sein. So bleibt mehr Zeit, um sich auf die Neuerungen einzustellen (Schneikert, 2025).

5 FAZIT

Der Übergang zur Kreislaufwirtschaft wird nicht allein durch ambitionierte ökologische Zielsetzungen erreicht, sondern erfordert auch weitreichende produkt-, dokumentations- und organisationsbezogene Pflichten der Unternehmen. Während EU-Verordnungen wie die PPWR oder die EU-Batterie-VO wichtige Rahmenbedingungen für mehr Ressourceneffizienz und Zirkularität schaffen, bedürfen viele Aspekte der weiteren Konkretisierung. Gelingt eine klare, verhältnismäßige und rechtssichere Umsetzung, können sie einen wesentlichen Beitrag zu einer zukunftsfähigen Kreislaufwirtschaft leisten. Die Frage, die sich stellt, ist, ob dies nur mit den administrativen Hürden schaffbar ist oder die Wirtschaft nicht ohnedies aufgrund der äußeren Umstände selbst ein Interesse an der umfassenden Kreislaufwirtschaft Ressourcenrückgewinnung hat und durch Innovation und Kooperationen neue Lösungswege findet. In wirtschaftlich angespannten Zeiten erscheinen die vielen administrativen Aufwendungen jedenfalls kontraproduktiv. Der kleine Wehrmutstropfen: Es trifft immerhin auch alle Inverkehrbringer und nicht nur die europäischen Unternehmen.

LITERATURVERZEICHNIS

Engelmann, M. (5. Februar 2026). Wer ist wer in der PPWR? (Teil I). *ZfPC*, S. 18.

EU-Kommission. (5. Juni 2026). Leitlinien zur Verordnung (EU) 2025/40 über Verpackungen und Verpackungsabfälle. Brüssel.

EU-Kommission. (kein Datum). Batteries. Von https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/batteries_en abgerufen

EU-Kommission. (kein Datum). Circular Economy. Von https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en abgerufen

Großhennrich, F. (21. Mai 2026). PPWR Declaration of Conformity and Technical Documentation: What companies must submit from August 12, 2026. *tanso*.

Holzer, C. (2018). EU-Kreislaufwirtschaftspaket. *UPDATE Österreich*.

Mengelée, C. (19. Mai 2026). PPWR: Warum aus einem politischen Signal noch kein funktionierendes System wird. *Haufe*.

Schneikert, K. (21. November 2025). Aktuelle Entwicklungen zur Batterieverordnung. Von https://www.ibf-solutions.com/fachbeitraege/aktuelle-entwicklungen-zur-batterieverordnung abgerufen

Suchanek, D., & Ruiß, M. (11. November 2024). Die neue EU-Batterie-VO: Ein lebenszyklusbasierter holistischer Ansatz zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele der EU. *NR*, S. 310.

KONTAKT

Dr. Tatjana Katalan
Tatjana.katalan@dorda.at
+43 664 9629645
Partnerin
DORDA Rechtsanwälte GmbH
www.dorda.at

Kreislaufwirtschaft – aber wie?

Wolfgang Klett[1]
[1)] Kunz Rechtsanwälte Partnerschaft mbB, Büro Köln, Deutschland

KURZFASSUNG: In dem Beitrag wird die Diskrepanz zwischen politischen Ambitionen und der praktischen Realität bei der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in Deutschland und Österreich beschrieben. Dazu werden die nationalen Strategien der Kreislaufwirtschaft beider Länder untersucht. Die erweiterte Herstellerverantwortung wird als mögliche Lösung diskutiert. Am Beispiel von Kunststoffen und Altfahrzeugen plant die Europäische Kommission einheitliche End-of-Waste-Kriterien, die wegen darin enthaltener strenger Anforderungen jedoch das Erreichen des End-of-Waste-Status erschweren, wenn nicht sogar unmöglich machen werden. Es werden mögliche konkrete Lösungen aufgezeigt. Ein gezielter Ansatz sollte sich auf das größte Abfallaufkommen konzentrieren – nämlich auf mineralische Bauabfälle. In den Schlussfolgerungen wird ein grundlegendes Umdenken gefordert. Es reicht nicht aus, bei der Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen in Kategorien von Abfall zu denken. Das Denken in Kreisläufen muss dort beginnen, wo Materialien in den Kreislauf eingebracht werden. Dies wird am Beispiel eines Wandels der Mobilitätsmuster verdeutlicht: Anstatt Autos zu kaufen, könnten Nutzer eine Mobilitätsdienstleistung erwerben. Diese Änderung würde bereits bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden. Das Recht hat sich anschließend an diese wirtschaftlichen Entwicklungen anpassen.

1 EINLEITUNG

Wir wollen Stoffe im Kreislauf führen, aber so richtig will es uns nicht gelingen. In der jüngeren Zeit ist zudem die Erkenntnis gewachsen, dass wir wegen der geopolitischen Auswirkungen von kriegerischen Auseinandersetzungen auf Autarkie bei der Versorgung mit Rohstoffen/Sekundärrohstoffen bedacht sein müssen.

Obwohl wir seit einer Reihe von Jahren über Kreislaufwirtschaft sprechen[1], ist wiederholt festgestellt worden, dass sie im praktischen Alltag noch nicht angekommen ist. Nur zwei Prozent macht die Kreislaufwirtschaft an der Wirtschaftsleistung der EU aus[2]. Es gibt seit 16.11.2023 mehrere Vertragsverletzungsverfahren gegen die Republik Österreich wegen der mangelnden Umsetzung der überarbeiteten Abfall-Rahmen-richtlinie in nationales Recht.[3]

Diese Umstände beschreiben, dass bisher nicht einmal die gesetzlichen Voraussetzungen für die Kreislaufwirtschaft, wie sie von der Europäischen Union vorgegeben werden, vollständig in nationales Recht umgesetzt worden sind, so dass erst recht der Vollzug der Vorschriften noch weit von der Kreislaufwirtschaft entfernt ist.

2 NATIONALE KREISLAUFWIRTSCHAFTSSTRATEGIEN

Die EU-Kommission hat im Rahmen des Circular Economy Act (CEA)[4] festgestellt, dass es mehr preislicher Attraktivität von Sekundärrohstoffen für deren Einsatz in Produktionsprozessen bedürfe. Besondere Bedeutung messe die EU-Kommission dabei der Abfallende-Regulierung bei. Dazu müssten die Sekundärrohstoffe im Binnenmarkt durch einheitliche nationale Umsetzungsakte vorangebracht werden. Besondere Bedeutung komme der öffentlichen Beschaffung zu[5].

2.1 Bundesrepublik Deutschland

Das Aktionsprogramm zur nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie wurde von der Bundesregierung jüngst beschlossen[6]. Ausgangspunkt ist die Feststellung, dass die Wirtschaft bei Verbrauch von Rohstoffen weder ökonomisch noch ökologisch tragfähig sei. Kreislaufwirtschaft bedeute, Rohstoffe und Produkte so lange wie möglich im Kreislauf zu halten. Damit gehe eine lange Nutzungsphase, die Wiederverwendung und das Recycling einher. Sie richte sich unter anderen an die Stoffströme „Baustoffe, Textilien und Industriemetalle“.

Die Strategie bedeute die Gestaltung von Produkten, die bereits bei der Auswahl der Materialien für die Produktion (Produktdesign) beginne.

Als wesentliches Ziel der Strategie gelte es, den Verbrauch primärer Rohstoffe zu vermeiden[7]. Nur 13 % der Rohstoffe würden nach dem ersten Gebrauch wiedergenutzt. Deswegen sollen nach den Vorgaben der EU[8] bis 2030 25 % der strategischen Rohstoffe durch Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft gedeckt werden.

Nach den Vorgaben des BMUKN für die Kreislaufwirtschaft werde daran gedacht, die Industrieprozesse zirkulär zu denken und neu auszurichten, den nachhaltigen Konsum durch mehr Langlebigkeit und Reparaturfähigkeit zu fördern, die einzelnen Teile der Kreislaufwirtschaft durch digitale Informationen zu verbinden, die öffentliche Beschaffung durch Bund, Länder und Kommunen sicherzustellen und dafür den Rechtsrahmen weiterzuentwickeln. Die Verlautbarung der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie erfolgte unter dem Motto, „Wegwerfen sei teurer als Verwerten“[9].

2.2 Republik Österreich

Durch das Umweltministerium wurde der Beschluss des Ministerrats (Wirtschafts-, Sozial- und Umweltministerium) vom 07.12.2022 für eine Kreislaufwirtschaftsstrategie bekanntgegeben[10]. Die darin genannten zentralen Ziele der Strategie befassten sich auch mit der Reduktion des Ressourcenverbrauchs, der Steigerung der Ressourcenproduktivität (um 50 %), der Steigerung der Zirkularitätsrate (auf 18 %), der Reduktion von Konsum (um 10 %) jeweils bis 2030. Dadurch soll bis 2050 eine klimaneutrale, nachhaltige Kreislaufwirtschaft geschaffen werden mit der Vision durch biogene Rohstoffe und qualitativ hochwertige, nachhaltig gewonnene Sekundärrohstoffe dieses Ziel zu erreichen.

2.3 Entwicklungsstand zu einer Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaftsstrategien sind auf der nationalen Ebene mit Zielen und nur zum Teil mit Maßnahmen ausgestattet, die allerdings auch nur allgemein umschrieben sind. Insoweit betonte auch der Sachverständigenrat für Umweltfragen in seiner Stellungnahme gegenüber dem Bundesumwelt- und Bundesbauministerium die Bedeutung der Kreislaufwirtschaft im Bausektor, zumal der Bau- und Gebäudebereich in Deutschland rund die Hälfte des Abfallaufkommens, ein Drittel des Rohstoffverbrauchs und ein Drittel der Klimaemissionen verursache[11]. Technisch sei Vieles bereits umsetzbar, es fehlten allerdings die wirtschaftliche Anreize.
Auch für die Konkretisierung des Circular Economy Act (CEA) von einem Vertreter der EU-Kommission in einer Fachdiskussion anlässlich der IFAT einzelne Maßnahmen genannt werden, bleiben diese nur abstrakt. In demselben Atemzug wurde betont, dass die Kapazitäten für die Ausarbeitung neuer „end-of-waste“ Kriterien begrenzt seien, so dass kurzfristig nicht einer konkreten Regelung gerechnet werden könne.
Die bislang vorhandenen, auf Art. 6 AbfRRL beruhenden EU-Verordnungen zum Abfallende von Eisen-, Stahl und Aluminiumschrott[12], Altglas und Bruchglas[13] sowie von Kupfer[14] haben in der praktischen Anwendung bislang wenig Bedeutung gefunden.

Auch die Republik Österreich hat verschiedene Abfallendeverordnungen erlassen[15], die sich mit EU-rechtlichen Vorgaben zum Teil nicht in Einklang haben bringen lassen[16], soweit darin auch für den Vollzug Regelungen enthalten sind.

Demgegenüber sind Regelungen zum Abfallende in der Bundesrepublik Deutschland bis in die Gegenwart nicht erlassen worden, obwohl die Voraussetzungen dazu zum Beispiel in der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) angelegt sind. Denn bei Einhaltung der in den Vorschriften genannten Anforderungen sind nachteilige Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit und schädliche Bodenveränderungen nicht zu erwarten (§ 19 Abs. 2 EBV, § 5 Abs. 4 KrWG).

Regelungen zum Abfallende von Ersatzbaustoffen wurden schließlich nicht zum Gegenstand der Verordnung gemacht[17]. Regelungen zum Abfallende sollten in einer gesonderten Verordnung vorgesehen werden[18], um den von der EU-Kommission vorgesehenen Regelungen für einheitliche Abfallende-Kriterien nicht vorzugreifen. Es werden also noch Jahre vergehen, ehe Abfallende-Vorschriften für mineralische Materialien gelten werden.

3 HEMMNISSE FÜR EINE KREISLAUFWIRTSCHAFT

Die Realität der Kreislaufwirtschaft in den Mitgliedstaaten steht im Kontrast zu den politischen Ambitionen der EU-Kommission, wie sie unter anderem in dem Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft[19] und in dem in Vorbereitung befindlichen Kreislaufwirtschaftsgesetz[20] zum Ausdruck gelangen.
Die Realität in den Märkten sieht anders aus. Von der Wirkung unterschiedlicher Skalierungspfade sei die europäische Kreislaufwirtschaft noch weit entfernt.

3.1 Erfahrungen bei dem Umgang mit Abfällen und deren Verwertung

Es ist festzustellen, dass die Neigung von Bauherren, Abfälle in ein zu errichtendes Gebäude einzubauen, wegen der Besorgnis der Verantwortlichkeit in Zukunft nach weiterer Entwicklung des Umwelt- und Stoffrechts für ein als schadstoffbelastet eingestuftes Gebäude einstehen zu müssen, gering ist.

Entsprechendes gilt bei der Altlastensanierung, wenn von dem Sanierungspflichtigen schadstoffbelasteter Boden durch aufbereiteten Abfall als (Ersatz-) Baustoff ersetzt wird.

Auch die Verwendung von Abfällen in einem Produktionsprozess werfen im Hinblick auf die Eigenschaften des Produkts nicht nur zivilrechtliche Haftungsfragen des Herstellers gegenüber dem Erwerber und/oder Verwender des Produkts bzw. des Geschädigten auf, sondern auf der Grundlage der erweiterten Herstellerverantwortung[21] dessen öffentlich-rechtliche Haftung für das Produkt während des gesamten Lebenszyklus.
Solche Feststellungen könnten zu der Einschätzung führen, mit längst unionsrechtlich weiter konkretisierten Anforderungen für das Abfallende bei einzelnen Stoffströmen würden die Probleme bei der Verwendung von Sekundärrohstoffen überwunden werden können. Dies trifft jedoch entgegen den geltenden Abfallende-Verordnungen und der Priorisierung einer Abfallende-Regulierung im Rahmen des CEA nicht zu.

3.2 Auf dem Weg zur erweiterten Herstellerverantwortung

3.2.1 Kunststoffe

Einen Ansatz dazu verfolgt offenbar die EU-Kommission im Rahmen der erweiterten Herstellerverantwortung mit den ersten Überlegungen für einheitliche Abfallende-Kriterien bei Kunststoffen. Das Abfallende soll ausschließlich für das recycelte Kunststoffmaterial unter bestimmten Voraussetzungen gelten. Dazu gehören u.a. ein zugelassenes Recyclingverfahren, die Einhaltung definierter Produktqualitätsanforderungen, ein dokumentiertes Qualitätsmanagementsystem.

Zusätzlich soll gelten, dass der Anteil an Fremdmaterialien im Rezyklat 1,9 Massen-% des Trockengewichts nicht übersteigen darf. Eine solche Anforderung zur Begrenzung des Massenanteils an Fremdmaterialien im Rezyklat erscheint im Einzelfall problematisch, weil Verunreinigungen und Hilfsstoffe über 1,9 Massen-% hinausgehende größere Massenanteile ausmachen dürfen.

Angesichts solcher beabsichtigten Vorschriften stellt sich die zentrale Frage, ob das Abfallende, ob die Kreislaufwirtschaft wirklich gewollt ist?

3.2.2 Mineralische Ersatzbaustoffe

Dieser Eindruck wird noch dadurch verstärkt, dass bei der Ersatzbaustoffverordnung die Zurückhaltung des Verordnungsgebers festzustellen ist, von einer Regelung für das Abfallende abzusehen, obwohl die gesetzlichen Voraussetzungen, insbesondere die abgeleiteten Materialwerte, dies zuließen[23].

3.2.3 Altfahrzeuge

Dieses Prinzip der erweiterten Herstellerverantwortung reicht vom kreislauforientierten Design bis zur kostenlosen Rücknahme jedes ausgedienten Altfahrzeugs. Die neue EU-Altfahrzeug-Verordnung[24] revolutioniert die Altfahrzeugentsorgung. Sie schreibt vor, dass Autos umweltgerecht recycelt und designtechnisch so gebaut werden müssen, dass Bauteile und Rohstoffe (wie Stahl und seltene Erden) im Kreislauf bleiben. Dies bedeutet mit anderen Worten, dass die Kreislaufwirtschaft durch die Produktgestaltung ermöglicht werden soll.

Dabei bleibt jedoch ungeklärt, wie mit dem Bestand zugelassener Fahrzeuge[25] umgegangen werden soll, die den Anforderungen nach der novellierten EU-AltfahrzeugVO noch nicht genügen.

4 IDEEN UND MASSNAHMEN FÜR EINE KREISLAUFWIRTSCHAFT

Abschließend gilt es noch zu klären, welche Wege in die Kreislaufwirtschaft führen können.

4.1 Zielgerichtetes Vorgehen

Ein effizientes Vorgehen zur Zielerreichung „Kreislaufwirtschaft“ wird sich danach zu richten haben, eine Lösung für den größten Massenstrom zu entwickeln, so wie es auch der Sachverständigenrat für Umweltfragen fordert. Dabei handelt es sich um die mineralischen Bauabfälle[26] im Verhältnis zu dem (Gesamt-)Abfallaufkommen, einschließlich gefährlicher Abfälle[27].

Die mineralischen Baurohstoffe, die in Deutschland produziert und anschließend im Bausektor eingesetzt werden, belaufen sich auf das Dreifache des Anfalls mineralischer Abfälle[28]. Die recycelten Baustoffe haben einen Anteil von 13,3 % des Gesamtbedarfs an Gesteinskörnungen gedeckt[29].

Dies zeigt, dass auch bei den mineralischen Recycling-Baustoffen auch bei Geltung der Anforderungen nach der Ersatzbaustoffverordnung die Kreislaufwirtschaft noch nicht angekommen ist.

4.2 Pflichten der öffentlichen Hand

Nach § 45 KrWG haben die Behörden des Bundes in der Bundesrepublik Deutschland insbesondere bei der Beschaffung oder Verwendung von Material zur Erfüllung des Zwecks von § 1 KrWG (Förderung der Kreislaufwirtschaft) beizutragen. Dazu sind sie verpflichtet durch ihr Verhalten, Erzeugnissen den Vorrang zu geben, welche entsprechend hergestellt worden sind. Diese Verpflichtung ist auf sämtliche Behörden der öffentlichen Hand auszuweiten. Dabei macht das wirtschaftliche Bauvolumen des Bundes nur etwa ein Drittel des Gesamtvolumens der öffentlichen Hand aus.[30]

Auch für die Republik Österreich gilt der Einsatz von Materialien, die den Anforderungen der Kreislaufwirtschaft genügen, für die öffentliche Hand nach §§ 1, 4 AWG nur im Rahmen einer Vorbildfunktion und im Rahmen konkreter operativer Pflichten, die allerdings nicht die Kreislaufwirtschaft betreffen.

Eine strenge Bindung sämtlicher Stellen der öffentlichen Hand an eine solche Verpflichtung wird eine wesentliche Vorbildwirkung haben können

4.3.1 Verpflichtung einerseits – einklagbare Ansprüche andererseits

Um solche Verpflichtungen zu realisieren, sollte darüber nachgedacht werden, die Einhaltung der Verpflichtung zum Einsatz von Recycling-Stoffen mit Hilfe von einklagbaren Ansprüchen der Hersteller von Erzeugnissen der Kreislaufwirtschaft durchzusetzen.[31]

4.3.2 Zwischenziele anstatt Vision

Insoweit könnte der Kreislaufwirtschaft gedient sein, wenn die in den verbrauchten Stoffen enthaltenen gefährlichen Stoffe, die aus der Phase des Lebenszyklus „Nutzung durch den Menschen“ zum Recycling kommen, zunächst mit anderen Primärstoffen, die den REACH-Anforderungen genügen, zusammen in Produktionsprozesse zurückgeführt werden können.
Es könnte bei Ersatzbaustoffen, von denen nach den geltenden Anforderungen schädliche Auswirkungen für Mensch und Umwelt nicht zu besorgen sind, zur Erleichterung bei deren Verwendung auf die mehrstufigen Überwachungsszenarien mit Dokumentationen verzichtet werden.

4.3.3 Kreisläufe von vorne denken

Wir werden lernen müssen umzudenken. Die fehlenden wirtschaftlichen Anreize für Maßnahmen zur Kreislaufwirtschaft werden umgekehrt werden müssen.[32]

Stellen sie sich einmal vor, Kraftfahrzeuge würden nicht mehr gekauft, sondern nur noch eine Mobilitätsdienstleistung darstellen, die bezahlt wird. Im Interesse des Unternehmers würde ein Pkw solange wie möglich, im Kreislauf gehalten. Das Herstellen von Pkw würde dadurch bei dem Produktdesign beginnen, die Haltbarkeit, die Reparaturfähigkeit und die nachhaltige Verwertung mit der Verwendung einzelner weiterhin sicherer Bauelemente umfassen. Der Hersteller wäre zudem darauf bedacht, seine Produkte zurückzuholen[33], von denen er weiß, mit welchen Stoffen, Bauelementen und die Taxonomie berücksichtigenden Prozessen sie hergestellt worden sind. Hier beginnt die Reverse Logistik – der nachfolgende Beitrag.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Wir sagen es seit langer Zeit (20 Jahre) so leicht dahin – wir wollen mehr Kreislaufwirtschaft – und doch haben wir uns dem Ziel nicht wesentlich genähert. Es reicht offenbar nicht, vom Abfall her zu denken. Kreisläufe haben dort zu beginnen, wo Stoffe in den Kreislauf eingebracht werden.

Auch die Verlagerung des Ausgangspunktes unserer Betrachtung führt noch nicht zum Erfolg. Denn bei allen Vorgängen innerhalb der Kreislaufwirtshaft sind allein die ökonomischen Anreize entscheidend für den einzuschlagenden Weg. Unser Erfindungsreichtum ist, wie beispielhaft an dem Erwerb einer Mobilitätsdienstleistung gezeigt, auf alle Vorgänge innerhalb der Kreislaufwirtshaft zu übertragen – und schließlich das Recht den gefundenen Errungenschaften anzupassen!

LITERATURVERZEICHNIS

1 Europäisches Parlament und Rat, EG Abfall-Rahmen-Richtlinie 2008/98/EG vom 19.11.2008 (ABl. Nr. L 312, S. 3); Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und der Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen – KrWG vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212); Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft – AWG 2002 (BGBl. I Nr. 102/2002), Novelle Kreislaufwirtschaftspaket vom 10.12.2021 (BGBL. I Nr. 200/2021).

2 Karmann, Warum die Kreislaufwirtschaft in der Nische festhängt, Beitrag 320° vom 23.04.2026.

3 Kurmayer, in: EURACTIV, Richtlinie 2008/98/EG in der Fassung vom 05.07.2020, Vertragsverletzungsverfahren unter anderem wegen des End of Waste Status, der Zielvorgaben zur Vorbereitung zur Wiederverwendung, zum Recycling sowie zur Reduzierung von Abfällen, des Verbots zur Vermischung gefährlicher Abfälle und zum Abfallwirtschaftsplan.

4 European Commission. (2025). Circular Economy Act. https://environment.ec.europa.eu/news/commission-launches-consultation-upcoming-circular-economy-act-2025-08-01_en

5 Neubaur, Wirtschaftsministerin für das Land Nordrhein-Westfalen, EUWID 20.2026, S. 25, anlässlich der IFAT 2026.

6 Die Bundesregierung, Beschluss des Kabinetts am 03.06.2026.

7 Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) Informationspapier aus Nov. 2024, von derzeit 16 t pro Kopf/Jahr auf 6-8 t pro Kopf/Jahr.

8 EU KOM „Critical Row Material Act“, Verordnung (EU) 2024/1252 vom 11.04.2024 zur Gewährleitung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen. ABl. Nr. L vom 03.05.2024.

9 Bundesminister Schneider (BMUKN), Pressemitteilung Nr. 065/26 zur| Nationalen Kreislaufwirt-schaftsstrategie vom 03.06.2026.

10 Bundesministerium Land- und Forstwirtschaft , Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft, Beschluss des Ministerrats (Wirtschafts-, Sozial- und Umweltministerium) Mitteilung vom 07.12.2022 für eine Kreislaufwirtschaftsstrategie, unter anderen auch zur Verminde-rung des Ressourcenverbrauchs auf max. 14 t pro Kopf/Jahr.

11 Sachverständigenrat für Umweltfragen fordert mehr Kreislaufwirtschaft im Bausektor, EUWID 16/2026 vom 13.04.2026.

12 Verordnung (EU) Nr. 333/2011 des Rates vom 31.03.2011, ABl. Nr. L 94 vom 08.04.2011, S. 2.

13 Verordnung (EU) Nr. 1179/2012 der Kommission vom 10.12.2012, ABl. Nr. 337 vom 11.12.2012, S. 31.

14 Verordnung (EU) Nr.715/2013 der Kommission vom 25.07.20213, ABl. Nr. 201 vom 26.07.2013, S. 14.

15 Bundesministerium Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasser-wirtschaft, Kompostverordnung, Inkrafttreten am 01.09.2001 (BGBl. II Nr. 292/2001), Recyclingholz-verordnung vom 15.05.2012 (BGBl. II Nr. 160/2012), Recycling-Baustoffverordnung (RBV) vom 29.06.2015 (BGBl. II Nr. 181/2015), Verordnung über das Abfallende von feuerfesten Abfällen vom 10.04.2024 (BGBl. Nr. 100/2024), Recyclinggips-Verordnung vom 27.01.2025 (BGBl. Nr. 415/2024).

16 EuGH, Urteil vom 17.11.2022 – C-238/21.

17 Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke vom 09.06.2021 (BGBl. I S. 2598); nach § 19 Abs. 2, 3 EBV wird bei Einhaltung der in der Vorschrift genannten Anforderungen entsprechend dem Ableitmodell davon ausgegangen, dass Veränderungen der Grundwasserbe-schaffenheit und schädliche Bodenveränderungen nicht zu besorgen sind. Dies folgt auch aus dem Ableitungsmodell der nach Anlage 1 zur EBV geltenden Materialwerte.

18 BMUKN Eckpunktepapier zur Abfallende Verordnung für bestimmte mineralische Ersatzbaustoffe , Referate T II 4, T II 2 und T II 1 vom 28.12.2023.

19 EU KOM, Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft, Brüssel, 11.03.2020, COM (2020) 98 final.

20 EU KOM Pressemitteilung vom 01.08.2025.

21 EU KOM, Erweiterte Herstellerverantwortung oder Extended Producer Responsibility (EPR), Richtlinie (EU) 2025/1892 vom 10.09.2025, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle , ABl. Nr. L vom 26.09.2025, betreffend Textilabfälle und Lebensmittel).

22 Europäisches Parlament und Rat, Verordnung (EU) Nr. 1907/2006 vom 18.12.20206 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), Abl. Nr. L 396 vom 30.12.2006, S. 1, Art. 3 Nr. 1.

23 Klett, Kopp-Assenmacher, Hahn „Rechtsgutachten zu den Auswirkungen der Porr-Entscheidung des EuGH…“ im Auftrag des Zentralverbands des Deutschen Baugewerbes e.V., Deutschen Abbruchverbands e.V. und der Bundesgemeinschaft Recycling-Baustoffe e.V., Abschnitt VI, S. 31ff. sowie Abschnitt VII, S. 39ff., Anlage zu Abschnitt II., 1.1.6, Fn. 149, insbesondere BR-Drs. 566/17, S. 270f. „…keine weitergehenden .abfallrechtlichen Anforderungen zum Schutz von Mensch und Umwelt festgelegt werden müssen.“

24 Europäischen Parlament, legislative Entschließung vom 18.06.2026 zu dem Vorschlag für eine Verordnung über Anforderungen an die kreislauforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen, Veröffentlichung im Amtsblatt ausstehend, Verfahrensdatei 2023/0284 (COD).

25 Kraftfahrt-Bundesamt, Angaben zum Kfz-Gesamtbestand vom 01.01.2024: 69,1 Mio. Fahrzeuge.
26 Kreislaufwirtschaft BAU, 15. Monitoringbericht vom 22.07.2025, Statistik auf Grund von Angaben zum Jahr 2022, Durchschnitt in den Jahren 1996 bis 2022, 208,1 Mio. t, siehe auch Umweltbundesamt, Bericht vom 22.07.2025, für 2022 mit 207,9 Mio. t, allerdings Bodenaushub, Baggergut, Gleisschotter, Bauschutt und Straßenaufbruch mit 294,4 Mio. t.
27 Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN), Arbeitsgruppe KS 2, Oktober 2025, Quelle: Statistisches Bundesamt 2024, 342,0 Mio. t.
28 VDI im Auftrag BMUKN nach Angaben des Statistischen Bundesamts (Stand 2024) etwa 600 Mio. t, siehe auch Umweltbundesamt, Bericht vom 22.07.2025, für 2022 Bedarf an Gesteinskörnungen im Hoch- Tiefbau und Straßenbau mit 564,1 Mio. t.
29 Umweltbundesamt, Bericht vom 22.07.2025, im Abschnitt Recycling-Baustoffe.
30 Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Strukturdaten für Bau-, Stadt- und Raumforschung g für 2024, bei einer Größenordnung von 535 Mrd. € im Verhältnis zu etwa 90 Mrd. €.
31 Scheuermann, in: Kreislaufwirtschaft & Recycling, 29.02.2024.
32 Jäkel, de Maizière, Steinbrück, Voßkuhle, in: Initiative für einen handlungsfähigen Staat, S. 134.
33 Scheuermann, a.a.O.

KONTAKT

Rechtsanwalt Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Klett
wolfgang.klett@kunzrechtsanwaelte.de
Tel.: +49 221 921801-767
Kompetenzbereich „Umwelt, Klima & Energie“
KUNZ Rechtsanwälte Partnerschaft mbB
https://www.kunzrechtsanwaelte.de/kanzlei/anwaelte/prof-dr-wolfgang-klett

Zurück in die Zukunft – Reverse-Logistik als zentrales Instrument der Kreislaufwirtschaft

Thomas Enderlein[1]
[1)] KUNZ Rechtsanwälte Partnerschaft mbB, Büro Köln, Deutschland

KURZFASSUNG: Dieser Beitrag untersucht die rechtliche Einordnung und Bedeutung der Reverse-Logistik als Schlüsselinstrument der Kreislaufwirtschaft. Während sich die traditionelle Logistik auf vorwärts gerichtete Materialströme konzentriert, bezieht sich die Reverse-Logistik auf alle Prozesse, die mit der Rückführung von Stoffen, Materialien, Produkten und Informationen zum Ausgangspunkt der Wertschöpfungskette verbunden sind. Sie umfasst sowohl interne Prozesse – wie Rücknahme, Sortierung und Prüfung auf Wiederverwendbarkeit – als auch externe Prozesse – wie Sammlung, Transport und Dokumentation der Rückführwege. Eine Analyse der geltenden Bestimmungen zeigt, dass der deutsche Rechtsrahmen historisch auf lineare Wertschöpfungsketten („Cradle to Grave“) ausgerichtet ist und den Anforderungen von Konzepten der Kreislaufwirtschaft („Cradle to Cradle“) nicht gerecht wird. Zusammenfassend hebt der Beitrag hervor, dass die Reverse-Logistik den logistischen Aufgaben eine neue Dimension verleiht: Sie ist ein strategisches Instrument für nachhaltige Geschäftsmodelle und eine wesentliche Voraussetzung für die Wahrnehmung der Produktverantwortung im Rahmen der Kreislaufwirtschaft.

1 EINLEITUNG

Als die Filmkomödie „*Zurück in die Zukunft*“ begeisterte Fans der Abenteuer des „*Marty McFly“* und seines Freunds „*Dr. Emmett L. Brown“* im Jahr 1985 in die Kinos zog, dürften nur die wenigsten den Titel der Trilogie in Verbindung gebracht haben mit dem Begriff „Reverse-Logistik“. Dies, obwohl sich *Marty* auf seiner Reise in die Vergangenheit Herausforderungen ausgesetzt sah, die nicht weniger komplex zu bewältigen waren als die logistischen Herausforderungen, die mit der Transformation einer linearen in eine zirkuläre Wirtschaftsform einhergehen und gerade der rückwärtsgerichteten Logistik eine Schlüsselfunktion für zukunftsweisende Supply-Chain-Modelle zukommt.

Logistik wurde seitjeher vorwärts gedacht und der rechtliche Rahmen entsprechend gestaltet. Dieser Beitrag beleuchtet die rückwärtsgerichtete Logistik, ihre rechtliche Einordnung und ihre Bedeutung für die mit innovativen Geschäftsmodellen und Projekten im Bereich der Kreislaufwirtschaft einhergehenden logistischen Herausforderungen, Chancen und Risiken. Insoweit knüpfe ich an die Ausführungen im vorstehenden Beitrag an.

2 BEGRIFFSBESTIMMUNG

Der Begriff „Logistik“ beschreibt im Wesentlichen all diejenigen Vorgänge und Prozesse, die erforderlich sind, um die **r**ichtigen Güter in der **r**ichtigen Menge, zum **r**ichtigen Zeitpunkt, am **r**ichtigen Ort, in der **r**ichtigen Qualität und zu den **r**ichtigen Kosten bereitzustellen (sog. sechs „R“ der Logistik). Das Ziel logistischer Prozesse, namentlich die optimale Gestaltung von Versorgungsketten, spiegelt sich in fünf typisierten Teilbereichen der Logistik wider: „Beschaffungslogistik“, „Produktionslogistik“, „Distributionslogistik“, „Entsorgungslogistik“ und „Informationslogistik“.

„Beschaffungslogistik“ befasst sich mit der Versorgung von Unternehmen mit Rohstoffen, Bauteilen und Materialien aus externen Quellen. „Produktionslogistik“ mit der innerbetrieblichen Versorgung. „Distributionslogistik“ mit der Aufgabe, fertiggestellte Produkte vom Hersteller zum Endkunden zu bringen und „Entsorgungslogistik“ beschreibt u.a. die logistischen Vorgänge im Zusammenhang mit den bei dem Produktionsprozess verbrauchten, aber nicht unmittelbar in das Produkt eingeflossenen Rohstoffen, insoweit mit einer umweltgerechten Verwertung und/oder Beseitigung von Abfällen. Alle physischen Logistikprozesse begleitend umfasst die „Informationslogistik“ die Erfassung, Verarbeitung und Übermittlung von Informationen entlang der gesamten Lieferkette.

Diese typisierten Teilbereiche decken sich bereits begrifflich mit dem Schema, dem das traditionelle lineare Wirtschaftsmodell folgt: "Abbau – Produktion – Konsum – Entsorgung". Es könnte daher der Eindruck gewonnen werden, dass rückwärtsgerichtete Logistik (Reverse-Logistik) sich begrifflich am ehesten im Bereich der „Entsorgungslogistik“ verorten ließe. Eine entsprechend eng gefasste Zuordnung griffe indes viel zu kurz:

Der Begriff "Reverse" verweist auf die Umkehrung der herkömmlichen, vorwärts gerichteten Stoffströme. Reverse-Logistik beschreibt damit sämtliche Prozesse, die der Rückführung von Stoffen, Materialien, Produkten und/oder Informationen in den Wertschöpfungskreislauf dienen. Der Begriff umfasst damit eine Vielzahl von Vorgängen innerhalb der typisierten Teilbereiche der Logistik, sowohl unternehmensintern als auch unternehmensextern. Zu den wesentlichen internen Prozessen gehören die Rücknahme von Produkten aus dem Markt, die Sortierung und Klassifizierung, die Prüfung auf Wiederverwendbarkeit sowie die Entscheidung über die weitere Verwertung oder Beseitigung. Externe Prozesse betreffen die Sammlung bei Endverbrauchern, die Beförderung zu Verwertungs- oder Beseitigungsanlagen und die Dokumentation der gesamten Rückführungswege.

Reverse-Logistik fungiert damit als zentrales Instrument zur Realisierung der Kreislaufwirtschaft. Werterhaltung und Wertschöpfung durch Wiederverwendung und Verwertung innerhalb der Kreislaufwirtschaft lassen sich ohne eine rückwärtsgerichtete Logistik denklogisch nicht realisieren. Reverse-Logistik schließt Retouren aus dem E-Commerce ebenso ein wie die Rücknahme von Altgeräten, die Wiederverwendung von Verpackungen oder das Recycling von Produktionsresten. Sie dient der Rückführung von gebrauchten Erzeugnissen und Stoffen in den Wirtschaftskreislauf und trägt damit zu der Versorgung von Unternehmen mit Primär- und Sekundärrohstoffen bei. Durch die Optimierung des Ressourcenmanagements können Kostenvorteile realisiert werden.

Die mit diesem Begriffsverständnis einhergehende Vielfältigkeit und Komplexität der Organisation und Durchführung von Aufgaben im Rahmen der Reverse-Logistik stellt gleichsam den Grund für die Komplexität der rechtlichen Einordnung der von ihr umfassten Vorgänge dar.

Diese sind schließlich einer Vielzahl von Rechtsgebieten zugeordnet, insbesondere dem

- Bauplanungsrecht – wo sollen die maßgeblichen Anlagen errichtet werden, um die Logistik der Rückführung von Stoffen zu optimieren?,
- Recht des Anlagenbetriebs zur Herstellung der Produkte – wie soll der Produktionsprozess angelegt werden, um die dabei anfallenden auf möglichst kurzem Weg wieder in den Prozess zu integrieren?,
- der Produktverantwortung unter Berücksichtigung der Kreislaufführung von Primär- und Sekundärrohstoffen,
- der erweiterten Produktverantwortung mit der Organisation zur Erfüllung damit verbundener Pflichten,

- dem Stoffrecht im Hinblick auf die Anforderungen nach der CLP- und REACH-Verordnung
- dem Abfall- und Kreislaufwirtschaftsrecht, soweit sich daraus die Pflichten ergeben, wie mit den im Produktions- und Konsumptionsprozess anfallenden Stoffen umzugehen ist,
- dem Immissionsschutzrecht, wie mit den Anforderungen an die Begrenzung der im Umgang mit den Stoffen auftretenden Emissionen (Lärm, Staub und andere Luftschadstoffe) umzugehen ist,
- dem Transport- und Speditionsrecht, soweit es die Organisation und Durchführung spediteller Leistungen oder der Beförderung der Stoffe im Kreislauf betrifft,
- dem Vergaberecht, bei der Auswahl geeigneter Unternehmen und deren Leistungen bei der Durchführung von Speditions- und Frachtverträgen, und schließlich
- dem Vertragsrecht, das auf allen Ebenen der Revers-Logistik Regelungen der rechtlichen Beziehungen unter den jeweils Beteiligten schafft.

3 DEFIZITÄRE RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Eine Analyse der berührten Rechtsgebiete verdeutlicht eine grundlegende Dissonanz zwischen dem traditionellen Rechtsrahmen und den Anforderungen, die die Reverse-Logistik an einen rechtlichen Rahmen stellt. Das Normengefüge ist historisch auf lineare Wertschöpfungsketten ("Cradle to Grave") ausgerichtet, während Reverse-Logistik zirkuläre Konzepte ("Cradle to Cradle") erfordert.

Im Wesentlichen lassen die betroffenen Rechtsgebiete eine ganzheitliche Perspektive vermissen. Die einzelnen Rechtsgebiete sind isoliert betrachtet und nicht auf die Integration von vorwärts- und rückwärtsgerichteten Logistikströmen ausgerichtet.

Diese nachfolgend aufgezeigten Defizite verdeutlichen, dass der Rechtsrahmen einer grundlegenden Überarbeitung bedarf, um die Potenziale der Reverse Logistik voll ausschöpfen zu können. Die Transformation zur Kreislaufwirtschaft erfordert ein integriertes Rechtskonzept, das die logistischen Realitäten rückwärtsgerichteter Stoffströme berücksichtigt und Unternehmen Rechtssicherheit für Investitionen in zirkuläre Geschäftsmodelle bietet. Dies soll bespielhaft dargestellt werden.

3.1 Produktverantwortung

Produktverantwortung im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), Rücknahmepflichten im Verpackungsgesetz (VerpackG) und Elektrogesetz (ElektroG) bilden beispielsweise kein kohärentes Konzept für die Gestaltung rückwärtsgerichteter Logistikprozesse. Es dominiert zudem die ordnungsrechtliche Ausrichtung betroffener Rechtsgebiete. Viele Regelungen, insbesondere im Abfall- und Verpackungsrecht, sind primär ordnungsrechtlich motiviert und berücksichtigen nicht logistische Effizienz. Die Fokussierung auf Abfallvermeidung und -verwertung führt zu starren Rücknahmequoten und Nachweispflichten, die flexiblen logistischen Lösungen entgegenstehen. Gerade einer hinreichenden Flexibilität logistischer Lösungen bedürfen indes innovative Geschäftsmodelle.

3.2 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) bildet das zentrale Fundament der Produktverantwortung. § 23 Abs. 2 Nr. 7 KrWG erstreckt die Produktverantwortung ausdrücklich auf die Rücknahme der Erzeugnisse und der nach Gebrauch der Erzeugnisse entstandenen Abfälle sowie deren nachfolgende umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung. Die Ermächtigungsgrundlage in § 25 KrWG ermöglicht dem Verordnungsgeber, Rücknahme- und Rückgabepflichten sowie Nachweispflichten für Hersteller und Vertreiber zu regeln.

Die Dissonanz zur Reverse-Logistik manifestiert sich mithin bereits in der grundlegenden Konzeption. Rücknahmepflichten werden primär als Ordnungsrecht zur Abfallvermeidung und -verwertung verstanden, nicht als integraler Bestandteil logistischer Prozesse.

Die Produktverantwortung ist als "Jedermannpflicht" ausgestaltet, die Entwickler, Hersteller, Be- oder Verarbeiter- sowie die Vertriebsorganisation erfasst. Diese breite Adressatenfassung ohne spezifische Berücksichtigung logistischer Prozessverantwortung führt zu Unklarheiten bei der Zuordnung von Zuständigkeiten in komplexen Rückführungsströmen. Zudem ist die Abgrenzung zwischen der Rücknahme von Erzeugnissen (die noch nicht zu Abfall geworden sind) und der Rücknahme von Abfällen für die logistische Praxis unzureichend trennscharf ausgestaltet. Die Regeln zur freiwilligen Rücknahme nach § 26 KrWG bieten zwar Flexibilität, sind jedoch eher als Ausnahmeregeln zu verstehen.

3.3 Verpackungsgesetz

Das Verpackungsgesetz (VerpackG) regelt in § 15 detaillierte Rücknahme- und Verwertungspflichten für Hersteller und in der Lieferkette nachfolgende Vertriebsorganisationen. Erfasst werden Transportverpackungen, bestimmte Verkaufs- und Umverpackungen, systemunverträgliche Verpackungen, Verkaufsverpackungen schadstoffhaltiger Füllgüter sowie Mehrwegverpackungen. Die Regelungen offenbaren eine deutliche Vernachlässigung logistischer Effizienzgesichtspunkte. Die Rücknahme muss gemäß § 15 Abs. 1 Satz 1 VerpackG "am Ort der tatsächlichen Übergabe oder in dessen unmittelbarer Nähe" erfolgen. Diese lokal gebundene Rückgabepflicht steht im Widerspruch zu modernen Konzepten der Zentralisierung und Bündelung von Rückführungsströmen, die economies of scale und ökologische Optimierung ermöglichen. Nur bei systemunverträglichen Verkaufs- und Umverpackungen sowie Verkaufsverpackungen schadstoffhaltiger Füllgüter kann ausnahmsweise eine Rücknahme an einer zentralen Annahmestelle erfolgen, wenn eine umwelt- und gesundheitsverträgliche Rücknahme vor Ort nicht möglich ist. Die Nachweis- und Dokumentationspflichten in § 15 Abs. 3 Satz 4 bis 6 VerpackG sind auf abfallwirtschaftliche Zwecke ausgerichtet und berücksichtigen nicht die Informationsbedürfnisse logistischer Steuerungssysteme. Auch die Verwertungsanforderungen in § 16 VerpackG mit ihren spezifischen Quoten fokussieren auf das Abfallaufkommen, nicht auf die logistische Prozessgestaltung.

3.4 Elektrogesetz

Nicht zuletzt mangelt es an der erforderlichen, rechtlichen Flexibilität im Rahmen des Elektrogesetzes (ElektroG). Starre Regelungen zu Rücknahmeorten, -zeiten und -verfahren behindern innovative Logistikkonzepte wie zentrale Annahmestellen, Sammelrücksendungen oder intelligente Rückverfolgungssysteme.

Das Elektrogesetz konkretisiert die Produktverantwortung für Elektro- und Elektronikgeräte. § 17 ElektroG regelt die Rücknahmepflichten der Vertriebsorganisation, insbesondere die 1:1-Rücknahme bei Abgabe eines neuen Geräts und die 0:1-Rücknahme kleiner Altgeräte auf Verlangen des Endnutzers. Verstöße gegen diese Rücknahmepflichten sind gemäß § 45 ElektroG bußgeldbewehrt.

Die Ausgestaltung dieser Rücknahmepflichten verdeutlicht die mangelnde logistische Durchdringung des Normengefüges. Die Verpflichtungen werden rein mengen- und flächenbezogen definiert – etwa die Pflicht zur Rücknahme für Vetriebsorganisationen mit einer Verkaufsfläche von mindestens 400 Quadratmetern. Eine solche starre Schwellenwertregelung berücksichtigt nicht die logistischen Möglichkeiten zur effizienten Bündelung von Rückführungsströmen über verschiedene Standorte hinweg. Zudem schließt § 12 Satz 1 ElektroG die Erfassung von Altgeräten durch Nichtberechtigte weitgehend aus. Damit werden gewerbliche Sammler und spezialisierte Logistikdienstleister, die effiziente Rückführungsstrukturen aufbauen könnten, vom Markt ausgeschlossen. Die Fokussierung auf die "Erfassung" statt auf die Gestaltung effizienter Rückführungsprozesse ist symptomatisch für die ordnungsrechtliche Ausrichtung.

3.5 Transport- und Speditionsrecht

Das Transportrecht- und Speditionsrecht in den §§ 407 ff. HGB (Frachtvertrag) und §§ 453 ff. HGB (Speditionsvertrag) regelt die Beförderung bzw. die Organisation der Versendung von Gütern. Der Frachtführer verpflichtet sich zur Beförderung zum Bestimmungsort und zur Ablieferung an den berechtigten Empfänger, während der Spediteur die Versendung zu besorgen hat.

Die Ausrichtung auf vorwärts gerichtete Stoffströme dokumentiert sich bereits in der Grundstruktur. Das Frachtrecht geht von einer Beförderung von A nach B aus. Rücktransporte sind nur als Ausnahmefälle geregelt, etwa bei Annahmeverweigerung des Empfängers. In diesem Fall muss der Auftraggeber eine Weisung zum Rücktransport geben, da der Frachtführer/Spediteur nicht für ihn entscheiden kann, an wen das Gut nun geliefert werden soll. Die Pflicht zur Besorgung der Versendung in § 454 HGB umfasst die Organisation der Beförderung, die Bestimmung des Beförderungsmittels und -weges, die Auswahl ausführender Unternehmer sowie die Sicherung von Schadensersatzansprüchen. Diese Aufgabenstellung ist nicht auf die Komplexität rückwärtsgerichteter Logistikströme zugeschnitten. Sonderprobleme bei dem Einsatz von Paletten und anderen Transport- und Verpackungshilfsmitteln verdeutlichen die Regelungslücken. Die Haftungsregeln in den §§ 461 ff. HGB berücksichtigen nicht die spezifischen Risiken von Rückführungsprozessen, etwa bei der Rücksendung gebrauchter oder beschädigter Ware.

Besonders deutlich werden die defizitären Regelungen des Transport- und Speditionsrechts unter Berücksichtigung der erkennbaren Annahme, dass zu jeder Zeit an jedem Ort Absender und Versender die Art, Mengen und den Zustand der zu befördernden Güter kennen und zumindest in der Lage sind, entsprechende Informationen den Spediteuren und Frachtführen zur Verfügung zu stellen. Diese Kenntnis kann im Rahmen der Reverse-Logistik gerade nicht vorausgesetzt werden.

3.6 Anforderungen an die betroffenen Rechtsgebiete

Dass überdies Verantwortlichkeiten der einzelnen Akteure entlang der Wertschöpfungskette unklar sind, erschwert eine Abgrenzung zwischen den Verantwortungsbereichen der Beteiligten, den Herstellern, Vertreibern, Logistikdienstleistern und Entsorgern. Die breite Adressatenfassung der Produktverantwortung ohne spezifische Berücksichtigung logistischer Prozessverantwortung führt zu Zuständigkeitskonflikten und Effizienzverlusten.
Auch bleibt die digitale Transformation unberücksichtigt. Die traditionellen Regelungen berücksichtigen nicht die Möglichkeiten digitaler Rückverfolgung, Blockchain-basierter Transparenz oder KI-gesteuerter Prozessoptimierung in modernen Supply-Chain-Modellen. Die Nachweis- und Dokumentationspflichten sind auf analoge Prozesse ausgerichtet und behindern digitale Innovationen.

4 THESEN

4.1 Die Abgrenzung zwischen Produkt und Abfall ist der Schlüssel für die rechtssichere Gestaltung von Reverse-Logistik-Prozessen.

Die rechtliche Einordnung von Stoffströmen als Produkt oder Abfall entscheidet bis heute über das anzuwendende Rechtsregime und damit über die Anforderungen an Dokumentation, Transport und Verwertung. Diese Abgrenzung ist nicht immer eindeutig und kann im Einzelfall schwierig sein. Unternehmen sollten daher klare Kriterien für die Einordnung entwickeln und diese konsequent anwenden. Die Dokumentation der Entscheidungsgrundlagen ist essenziell, um im Falle von Prüfungen oder Streitigkeiten die getroffene Einordnung begründen zu können.

4.2 Die Produktverantwortung beginnt bei der Produktentwicklung und nicht erst bei der Entsorgung.

Die Anforderungen der erweiterten Produktverantwortung nach § 23 KrWG umfassen bereits die Entwicklung Ökodesign), Herstellung und das Inverkehrbringen von Erzeugnissen.

4.3 Kooperation ist unverzichtbar für die Bewältigung der komplexen Anforderungen.

Die Komplexität der Organisation und Durchführung von Aufgaben im Rahmen der Reverse-Logistik erfordert Kooperation zwischen den beteiligten Wirtschaftsakteuren. Die Zusammenarbeit mit anderen Unternehmen, Logistikdienstleistern, Verwertungsunternehmen und öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern kann zur Effizienzsteigerung beitragen und Risiken minimieren. Die Beteiligung an bestehenden Rücknahmesystemen oder die gemeinsame Entwicklung neuer Systeme kann für viele Unternehmen eine sinnvolle Alternative zum Aufbau eigener Kapazitäten darstellen (§ 25 KrWG). Bei der Gestaltung von Kooperationen sind jedoch kartellrechtliche Vorgaben zu beachten.

4.4 Digitalisierung und Transparenz sind Schlüsselfaktoren für den Erfolg.

Die Dokumentations- und Nachweispflichten entlang der Rückführungswege erfordern eine lückenlose Nachverfolgbarkeit der Stoffströme

4.5 Haftungsrisiken lassen sich durch sorgfältige Prüfung und Dokumentation minimieren.

Die mit der Wahrnehmung von Aufgaben im Rahmen der Reverse-Logistik verbundenen Haftungsrisiken sind nicht zu unterschätzen. Schäden an der Umwelt oder an Dritten können zu Schadensersatzansprüchen nach § 823 BGB führen (§ 823 BGB). Die Verletzung abfallrechtlicher Vorschriften kann als Ordnungswidrigkeit oder Straftat geahndet werden. Eine sorgfältige Planung aller Prozesse, die Auswahl zuverlässiger Partner, die Schulung der Mitarbeiter und eine lückenlose Dokumentation können zur Risikominimierung beitragen. Ergänzend können Versicherungen und Sicherheitsleistungen einen Schutz vor unvorhergesehenen Haftungsrisiken bieten.

5 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

5.1 Rückwärtsgerichtete Stoffströme verlangen eine frühzeitige Auseinandersetzung mit den rechtlichen Anforderungen.

Unternehmen sollten sich frühzeitig mit den rechtlichen Anforderungen auseinandersetzen, die sich aus der erweiterten Produktverantwortung und den spezialgesetzlichen Regelungen ergeben. Dies schließt die Analyse der eigenen Produkte und Produktionsprozesse, die Identifizierung von Handlungsbedarf und die Entwicklung von Strategien zur Erfüllung der Anforderungen ein. Die Einbeziehung von Rechtsberatung und spezialisierten Fachexperten kann helfen, komplexe Fragestellungen zu klären und rechtssichere Lösungen zu entwickeln.

5.2 Das System der Reverse-Logistik verlangt den Aufbau von Kompetenzen und Strukturen.

Die Bewältigung der Anforderungen der Reverse-Logistik erfordert spezialisierte Kompetenzen und entsprechende organisatorische Strukturen. Unternehmen sollten daher in die Schulung ihrer Mitarbeiter investieren und interne Zuständigkeiten klar regeln. Die Einrichtung von spezialisierten Abteilungen oder die Benennung von Verantwortlichen für die Produktverantwortung und die Reverse-Logistik kann zur effizienten Organisation beitragen. Die Zusammenarbeit mit externen Experten und Dienstleistern kann ergänzend genutzt werden, um fehlende Kompetenzen abzudecken.

6 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Reverse-Logistik ist nach den Grundsätzen zur Herstellung einer autarken Versorgung mit Energie und Rohstoffen zu einer unverzichtbaren Voraussetzung für die weltpolitisch erforderlich gewordene Unternehmensführung. Die Transformation von einer linearen hin zu einer zirkulären Wirtschaftsform und die zunehmende Regulierung im Bereich der Kreislaufwirtschaft stellen Unternehmen vor komplexe logistische und rechtliche Herausforderungen. Nicht zuletzt führen diese Regulatorien zur schwindenden Konkurrenzfähigkeit im internationalen Wettbewerb und zur Entscheidung der Industrieunternehmen, ihre Standorte aufzugeben. Dabei bietet Reverse-Logistik erhebliche Chancen für Unternehmen, die diese Herausforderungen proaktiv annehmen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen, insbesondere die Produktverantwortung und die darauf aufbauenden spezialgesetzlichen Regelungen, bilden das Fundament für die Gestaltung von Rückführungsprozessen.
Die Zukunft der Reverse-Logistik wird durch die zunehmende Digitalisierung, die Vernetzung entlang der gesamten Wertschöpfungskette und die Weiterentwicklung der europäischen und nationalen Regulierungen geprägt sein. Unternehmen, die frühzeitig auf diese Entwicklungen reagieren, in Kompetenzen und Strukturen investieren und Kooperationen aufbauen, werden in der Lage sein, die Chancen der Kreislaufwirtschaft zu nutzen.

Die Reverse-Logistik ist mehr als eine logistische Aufgabe – sie ist ein strategisches Instrument für nachhaltiges Wirtschaften und eine zentrale Voraussetzung für die Erfüllung der Produktverantwortung auf den verschiedenen Stufen des Stoffkreislaufs.

Dem Gesetzgeber könnte nach alledem mit der gleichen Aussage entgegengetreten werden, wie sie *Marty McFly* zur Rechtfertigung seiner Rock'n'Roll-Performance im Jahr 1955 verwendete:

„Ich schätze, ihr seid noch nicht bereit dafür.
Aber deine Kinder werden es lieben."

KONTAKT

Rechtsanwalt Thomas Enderlein
thomas.enderlein@kunzrechtsanwaelte.de
Tel.: +49 221 921801-760
Kompetenzbereiche „Transport & Logistik“ und „Umwelt, Klima & Energie“
KUNZ Rechtsanwälte Partnerschaft mbB
https://www.kunzrechtsanwaelte.de/kanzlei/anwaelte/thomas-enderlein

Circular Economy braucht ein Deponieverbot

Werner Bauer
WtERT Germany GmbH, München, Deutschland

KURZFASSUNG: Unbehandelte kommunale Siedlungsabfälle dürfen nach der Richtlinie (EU) 2018/850 – Änderung der Deponierichtlinie 1999/31/EG bis zu 10% der Gesamtmenge bis 2035 deponiert werden. Aber ein Ende der Ablagerung ist 10 Jahre vor dem zeitlichen Horizont in vielen osteuropäischen Ländern nicht in Sicht – eine Reduzierung nur schwer zu überwachen. In der umweltpolitischen Diskussion wird die Verfolgung des Ziels Circular Economy priorisiert. Der Circular Economy Action Plan (CEAP, 2020) - als zentrales operatives Programm - umfasst Maßnahmen zu Design, Produktion, Konsum, Abfallvermeidung und Sekundärrohstoffen. Der geplante „Circular Economy Act“ (CEA, 2026) zielt auf einen einheitlichen Binnenmarkt für Sekundärrohstoffe, um damit die Nachfrage nach Rezyklaten zu stärken und eine Verdopplung der EU-Circularity-Rate auf 24 % bis 2030 zu erreichen. Ein Blick auf die aktuellen Zahlen und die Probleme der Recyclingbranche zeigt die Hindernisse bei der Durchsetzung dieser Ziele. Solange die Mitverantwortung der Produzenten begrenzt bleibt und in der EU noch immer 25% der Siedlungsabfälle deponiert werden, müssen Vorschläge für eine veränderte Herangehensweise an Legislative wie Exekutive neu diskutiert werden.

1 EU-ABFALLRAHMENRICHTLINIE – ANSPRUCH UND WIRKLICHKEIT

Die europäische Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) bildet die zentrale Grundlage der europäischen Abfallpolitik. Sie definiert die wesentlichen Prinzipien des modernen Abfallmanagements, insbesondere die fünfstufige Abfallhierarchie. Ziel ist der Schutz von Umwelt und Gesundheit sowie die Förderung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft. Ergänzt und verschärft wurde dieses Regelwerk durch die Richtlinie (EU) 2018/850, mit der die ursprüngliche Deponierichtlinie 1999/31/EG geändert wurde. Die Reform verfolgt das Ziel, die Deponierung von Abfällen innerhalb der Europäischen Union deutlich zu reduzieren und damit den Vorrang von Vermeidung, Wiederverwendung und Recycling zu stärken. Kernstück der Richtlinie ist die Recyclingrate von 65% und die Vorgabe, dass bis 2035 höchstens 10 Prozent der kommunalen Abfälle eines Mitgliedstaates deponiert werden dürfen. Gleichzeitig soll verhindert werden, dass unbehandelte oder verwertbare Abfälle auf Deponien gelangen. Die Deponierichtlinie ist damit ein wesentliches Instrument zur Umsetzung der europäischen Kreislaufwirtschaftsstrategie.

Wie Abb.1 zeigt, bestehen trotz der im Jahr 2018 formulierten klaren gesetzlichen Vorgabe innerhalb der Länder der EU erhebliche Unterschiede bei der Umsetzung. Während einige Mitgliedstaaten die Deponierung unbehandelter Siedlungsabfälle vollständig zurückgedrängt haben, werden in vielen Ländern die Haushaltsabfälle noch immer überwiegend deponiert. Wer denkt, dass diese Länder nun sukzessive aufholen, täuscht sich.

Es ist nachvollziehbar, dass der defizitäre Status quo der Abfallwirtschaft auch durch wirtschaftliche Interessen bestimmt wird. Eine auf regionaler Ebene annähernd kostenlose Entsorgung von Restabfall in wilden Müllkippen oder billigen Deponien zu überwinden ist bei der vorhandenen institutionellen Schwäche und fehlender Infrastruktur eine gigantische Aufgabe.

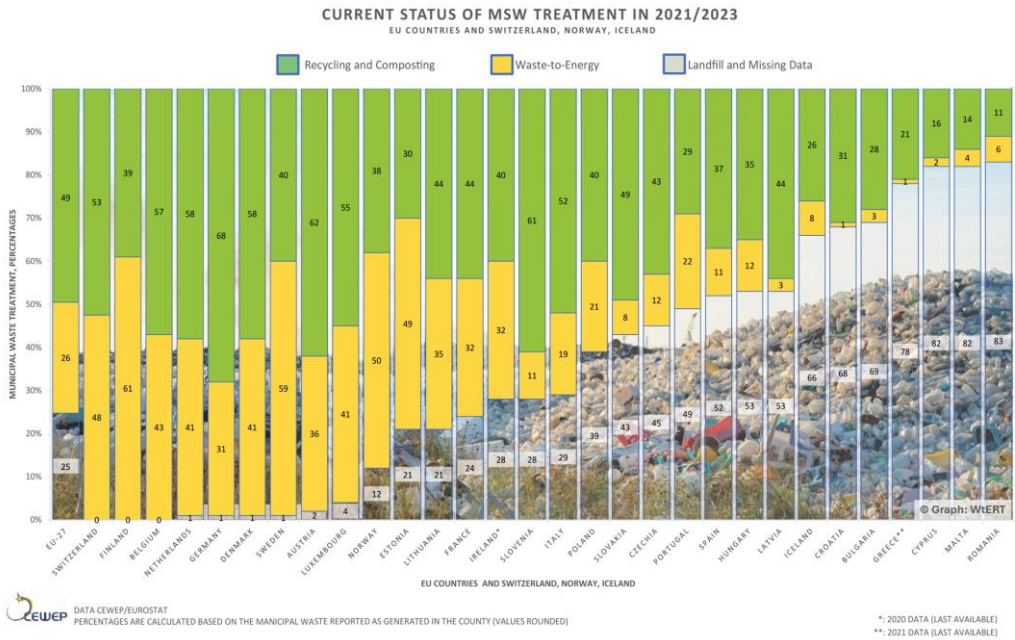


Abb. 1: Abfallbehandlung der Länder der EU aus den Jahren 2021 und 2023

Ein Blick auf die Diskussion um das European Union Emissions Trading System (EU-Emissionshandelssystem) in Europe dient jedem Deponiebetreiber als zusätzliches Argument, lieber nichts oder wenig an der aktuellen Situation zu ändern. Wenn durch das EU ETS CO_2-Emissionen aus der thermischen Abfallbehandlung künftig stärker bepreist werden, wird die Hürde zu einer nachhaltige Kreislaufwirtschaft ohne Deponierung (siehe Abb. 1) noch größer.

2 STRATEGIEN ZUR EINHALTUNG DER RICHTLINIE (EU) 2018/850

In diesem Beitrag werden zwei wesentliche Strategien vorgestellt, mit denen die in der die Richtlinie (EU) 2018/850 verankerten Ziele der EU gegebenenfalls besser erreicht werden können. Es geht dabei um zwei Herausforderungen:

- die überwiegende Tendenz der öffentlichen Kommunikation über Müllverbrennung in der Branche bzw. der interessierten Gesellschaft
  und
- die Schwerpunkte der legislativen Vorgaben und wie sie verändert werden könnten, um eine deutlich vereinfachte Überwachung zu erreichen.

2.1 Kommunikation über Müllverbrennung

Die vorherrschende Kommunikation in der Branche bzw. der interessierten Gesellschaft lässt sich gut am folgenden Beitrag zur Lösung der Müllprobleme in LinkedIn, dem weltweit größten beruflichen Online-Netzwerk im beruflichen Kontext ablesen.

Symptomatisch ist ein Beitrag des Circularity Hub aus dem Juni 2026:

Mit der Überschrift “Every choice shapes your Planet” werden die Branche aber auch Interessensgruppen der Gesellschaft angesprochen. Jeder einzelne Bürger soll

- Reduzieren, bevor man recycelt,
- Wiederverwenden, bevor man ersetzt,
- Nachfüllen statt neu kaufen,
- Reparieren statt wegwerfen.
- Kreativ umfunktionieren,
- Verantwortungsbewusst recyceln...

... und erst dann die Mülltonne benutzen.



867 45 238

Abb. 2: Attraktivität des Posts von Circularity Hub am 03.07.2026

Was auf den ersten Blick wie eine erweiterte Darstellung der Abfallhierarchie der EU aussieht, vergisst bewusst oder unbewusst die energetische Verwertung die als „Sonstige Verwertung“ in der 4. Stufe der Abfallhierarchie verankert ist.

Mit einem erneuten Blick auf die Verteilung der Abfälle auf die Entsorgungswege in Deutschland oder Österreich wird deutlich, dass die Lösung der Abfallprobleme nur unter Einbeziehung der energetischen Verwertung umsetzbar ist.

In der Darstellung des Posts fährt als letzte Maßnahme ein klein dargestelltes Müllfahrzeug zur Deponie.

Circularity Hub adressiert in oberster Priorität die Aufgaben / Pflichten eines Konsumenten und Verbraucher. Dies ist zwar gesellschaftlich anerkannt, aber abfallwirtschaftlich in der Erwartungshaltung eine reine Illusion.

Die Aufgaben der Verwaltung werden ganz einfach dargestellt: Sie bestehen in der Organisation der Sammlung und dem Transport zu Deponie.

SEND TO LANDFILL WHEN ALL ELSE FAILS:

Im Bildaufbau ist das Müllfahrzeug mit der bezeichnenden Aufschrift klein dargestellt, mit Blumen umrankt und gleich neben der Aufschrift „Circularity Hub in harmloser Ausübung seiner Pflicht.
Da ich annehme, dass die ursächlichen Zusammenhänge zwischen Deponieemissionen und Klimakatastrophe bekannt sind, soll hier ausschließlich die öffentliche Wahrnehmung des Abfallproblems anhand dieses Posts diskutiert werden.

Trotz seiner abfallwirtschaftlich irreführenden Tendenz und der Zuordnung vieler einzelner Aufgaben an die Gesellschaft wird er (am 3. Juli 867) überwiegend positiv „geliked“. Auch in den Kommentaren sind die Beiträge aus einem gemäß den Berufsangaben kundigem Fachpublikum überwiegend bestätigend.

Natürlich ist „Abfallvermeidung an der Quelle“ eine richtige Empfehlung. Und auch die Aussage „Weniger Material spart CO2“ ist ebenso begrüßenswert, wie „Abfallmanagement beginnt beim Produktdesign“. Aber blenden all diese Global ESG-Leaders und Marketing wie Abfall Experten im Augenblick des Kommentierens die Plastikmassen im Meer und die Umweltprobleme durch Deponien einfach aus?
Ein rascher Blick auf die Key Findings of “What a Waste 3.0” belegt, dass die Abfallmengen schneller wachsen als Entsorgungsstrukturen.

Wie passt dies zusammen? Angesichts der in der Branche bekannten Zahlen dürfte in keiner Diskussion die Optimierung der Sammlung und Forderung nach gesicherter stofflicher UND auch energetischer Entsorgung der Abfälle vor der Deponierung fehlen.

Ich frage mich, ob mit diesem Post eine Absicht verbunden ist. Wenn ja - macht es Sinn gegenzuhalten? Ich habe mit meinem klar ablehnenden Kommentar (...is a trap ...) auf die oben gezeigte Mengenverhältnisse verwiesen und war gespannt, was passiert.

In der unmittelbaren Folge wurde der Post nur noch wenig „geliked“. Der Kommentar (...is a trap ...) wurde nach drei Tagen bereits 3.340-mal geklickt. Die Likes für den Re-Post sind an einer Hand zählbar, aber es scheint, als wäre es gelungen eine Welle der unreflektierten Zustimmung abzuschwächen.

Aber nicht nur in der öffentlichen Diskussion kommt die Müllverbrennung schlecht weg, auch ansonsten wissenschaftlich fundierte Arbeiten, wie der Bericht der UNEP zum „Waste to Energy: Considerations for Informed Decisionmaking“, sind - vorsichtig formuliert - irreführende Aussagen enthalten. Aussagen wie

“…taking into account that it (WtE) should be the option of last resort”

sowie eine verharmlosende und grafisch verfälschte Darstellung des Gegenüber der Emissionen von Deponien und WtE Anlagen sind tendenziös.

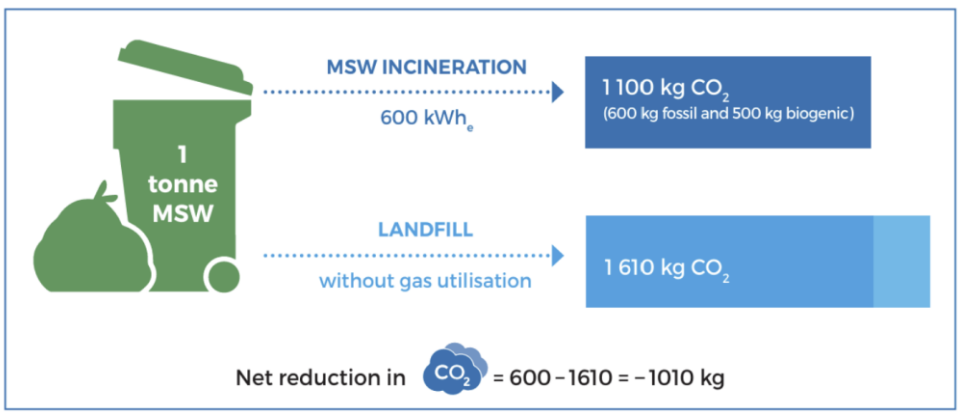


Abb. 3: CO_2 Einsparungen durch Verbrennung

2.2 Legislative und Überwachung

Zur Durchsetzung ihrer Umwelt- und Abfallvorschriften besitzt die Europäischen Kommission verschiedene Instrumente. Das wichtigste Instrument dabei, ist das Vertragsverletzungsverfahren nach Artikel 258 des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union. Stellt die Kommission fest, dass ein Mitgliedstaat europäisches Abfallrecht nicht ordnungsgemäß umsetzt oder anwendet, kann sie zunächst ein Mahnschreiben versenden, anschließend eine begründete Stellungnahme abgeben und schließlich den Europäischen Gerichtshof anrufen. Wird ein Urteil des Gerichtshofs nicht umgesetzt, können erhebliche finanzielle Sanktionen verhängt werden. Im Bereich der Abfallwirtschaft und insbesondere bei Verstößen gegen die Abfallrahmen- und Deponierichtlinie werden solche Verfahren regelmäßig eingeleitet. In der Regel orientiert sich die Kommission allerdings daran, ob ein Land die Richtlinie rechtlich umgesetzt hat. Denn die tatsächliche Vollzugspraxis vor Ort – etwa illegale Deponien, mangelhafte Getrenntsammlung oder schwache Kontrollen – ist deutlich schwieriger nachzuweisen.

Darüber hinaus überwacht die Kommission die Entwicklung der Abfallwirtschaft in den Mitgliedstaaten anhand der Berichts- und Meldepflichten zum Abfallaufkommen, der Recyclingquoten und der Deponierungsraten. Auf dieser Grundlage erstellt die Kommission Bewertungen und Frühwarnberichte für Staaten, die ihre Ziele voraussichtlich verfehlen werden.

Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wird begrenzt bleiben, denn zwischen der Feststellung eines Verstoßes und einer rechtskräftigen Entscheidung des Europäischen Gerichtshofs vergehen mitunter mehrere Jahre.

Auch mit einer rechtskräftigen Entscheidung hat die EU keine direkten Eingriffsbefugnissen vor Ort. Es gibt weder eine eigene Umweltaufsicht noch eine europäische Abfallbehörde.

2.3 Vereinfachung der Legislative

Wer meint, dass mit all diesen Bemühungen, dem Mix aus Gesetzen und Verordnungen, den Zuschüssen bei der Umsetzung und den Milliarden im Forschungsbereich die deponierten Mengen sich in allen Staaten der EU in Richtung des 10% Ziels bewegen, möge das jährliche EU GHG Inventar bemühen. Die NIR-Zahlen belegen, dass auch in den Jahren zwischen 2021 und 2022 in zehn (10) Ländern der EU die Emissionen aus Deponien weiter ansteigen. Dass gerade diese Länder auch erhebliche Defizite gegenüber den EU-Zielen beim Recycling aufweisen, ist zu erwarten, denn wer recycelt kostenpflichtig Abfälle, wenn sie umsonst in wilden Kippen oder nur zu geringen Kosten in Deponien entsorgt werden können.

Ein konsequentes Deponierungsverbot in allen Ländern der EU wäre einfacher zu überwachen als die Vorgabe der maximalen Ablagerung von 10% der Abfälle verbunden mit der komplexen Überwachung der Recyclingziele.

Die Begründung kann im IESP White Book „20 Jahre Deponierungsverbot – eine vergessene Klimaschutzmaßnahme“ nachgelesen werden. Bei dieser Initiative wurden 20 handelnde Protagonisten aus den DACH-Staaten gebeten, eine Stellungnahme zu ihren Erfahrungen mit dem Deponierungsverbot abzugeben. Übereinstimmend sind sich alle Mitwirkenden aus Verbänden, Wissenschaft und Verwaltung einig, dass das Deponierungsverbot

- eine der wichtigsten Klimaschutzmaßnahmen der letzten 30 Jahre
  sowie
- ein Fundament für den Aufbau einer vielfältigen Abfallwirtschaft war.

Das ist auch einfach verständlich, dass sich eine umfassende Recycling- und Kreislaufwirtschaft erst dann bilden kann, wenn die Billig-Entsorgung über Kippen und Deponien wegfällt.
Das Deponierungsverbot würde eindeutig die Ziele der EU bei der Bekämpfung des Klimawandels und der Reduzierung der Rohstoffabhängigkeit fördern.

3 SCHLUSSFOLGERUNG

Ohne ein Verständnis für die Bedeutung einer nachhaltigen Abfallwirtschaft für den Klimaschutz und die in den Deponien verlorenen Ressourcen wird es keine Änderung im Verhalten der östlichen Länder und damit auch in der Politik der EU geben. Aus diesem Grund müssen fehlgeleitete Narrative über Lock-In Effekte der Müllverbrennung und Erwartungshaltungen an die Bürgerinnen und Bürger wie auch an die Industrie relativiert werden.

Aber auch diese wesentlich vereinfachte Abfalllegislative wird die Zukunft der europäischen Kreislaufwirtschaft nur dann bestimmen, wenn die Mitgliedstaaten die finanziellen Mittel erhalten, eine nachhaltige Abfallwirtschaft in ihrer ganzen Vielfalt zu realisieren und wenn sie darin unterstützt werden, die erforderlichen Verwaltungskapazitäten aufzubauen, die es für die Überwachung und Durchsetzung dieser Ziele braucht.

LITERATURVERZEICHNIS

European Environment Agency, 2024: Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2022 and inventory document 2024. First submission under the Enhanced Transparency Framework of the Paris Agreement, European Environment Agency (mit Auswertung der nationalen NIR)

WASTE TO ENERGY WASTE TO ENERGY CONSIDERATIONS FOR INFORMED DECISION-MAKING, 2018: Full Report; file:///C:/Users/Werner%20Bauer/Documents/20%20Jahre%20Deponierungsverbot%20im%20StMUV/WTEfull%20UNEP%20REport.pdf.

Weltbank 2026: „What a Waste 3.0“; https://www.worldbank.org/en/publication/what-a-waste.

Im Namen des Naturschutzes

Martin Eisenberger
Eisenberger & Offenbeck Rechtsanwalts GmbH, Umweltrecht, Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Vor 30 Jahren hat ein besonders geschützter Vogel den Ausbau einer Bundesstraße verhindert. Konsequenz daraus war möglicherweise der Erhalt dieser Art im Ennstal, sicher hat die Verhinderung des Ausbaus der ennsnahen Trasse aber mehr als 50 Menschen das Leben gekostet, die auf der alten Bundestraße den Verkehrstot gestorben sind. In den letzten 30 Jahren wurde der Naturschutz ein wichtiger Bestandteil der Erhaltung einer funktionierenden Umwelt, leider wird diese Materie jedoch in letzter Zeit immer öfter aus ideologischen Gründen missbraucht um Infrastrukturprojekte, Industrie- und Gewerbeanlagen und Abfallentsorgungsanlagen zu verhindern. Ob dies immer zum Wohle des Menschen geschieht ist zu hinterfragen.

1 DIE CRUX MIT DEM CREX

51 weiße Kreuze mahnen auf der B-320, der Ennstal Bundesstraße zwischen Weißenbach bei Liezen und Haus am Kaibling. Jedes einzelne symbolisiert einen Verkehrstoten in den letzten 20 Jahren, den ein kleiner, unscheinbarer Vogel, dessen wissenschaftlicher Name Crex Crex ist, auf dem Gewissen hat. Der Wachtelkönig war es nämlich, der in den 90er Jahren zur Verhinderung des Ausbaus dieser 80 km langen Straße zwischen Liezen und Radstadt maßgeblich beigetragen hat. Wobei man dem Vogel nicht wirklich einen Vorwurf machen kann. Verhindert wurde der Ausbau ja durch Menschen im Namen des Naturschutzes.
Die Crux mit dem Crex ist aber: Gesehen hat den Vogel kaum jemand. Fotos die sein Dasein im Ennstal nachweisen sind Mangelware. Er ist ja so scheu. Zyniker - und deren gibt es im Bereich des Naturschutzes offenbar einige - werden argumentieren nicht der Vogel, sondern der Mensch sei schuld, wenn er den Verkehrstot stirbt. Faktum ist aber: wäre die B-320 ordentlich ausgebaut worden, würden viele dieser weißen Kreuze nicht stehen. Offenbar hat aber auch schon vor mehr als 30 Jahren der Ruf eines Vogels ausgereicht medial genügend Aufmerksamkeit zu erregen, damit etwas verhindert werden kann.

Verhinderung ist nämlich das erste Gebot von vermeintlichen Naturschützern. Dabei heiligt der Zweck die Mittel. Beispiele, bei denen ein besonders schützenswertes Tier den Fortschritt hintanhält, die Aufrechterhaltung des Wohlstandes gefährdet oder gar Menschenleben kostet sind mittlerweile Legende. Der Alpensalamander, der den Bau eines Pumpspeicherkraftwerkes auf der Koralm verhindert. Hervorgezaubert im letzten Moment vor der endgültigen Genehmigung. Oder der Alpenbock, ein kleiner grau schwarz gefleckter Käfer, der wie durch ein Wunder erstmals im Grazer Becken gesichtet wird. Wobei auch hier kein direkter Blickkontakt dokumentiert ist, sondern die von einem Naturschützer als typisch bezeichneten Bohrlöcher samt frischen Sägespänen ausreichen sollen, um die Erweiterung eines dringend benötigten, bestehenden Schotterabbaus zu verhindern. Oder der Triel, ein weiterer unscheinbarer Vogel, der mittlerweile bei jedem Ausbau eines Infrastrukturprojektes in Niederösterreich von Naturschützern als Verzögerer wenn nicht gar als Verhinderer auserkoren wurde. Pikant für den Trielbestand ist, dass dieser Vogel bevorzugt in solchen Gebieten lebt, die zuvor vom Menschen geschaffen wurden, nämlich in ausgekiesten Schottergruben. So wie bei diesem Beispiel kommt es sehr häufig vor, dass überhaupt erst der Eingriff des Menschen zur Verbreitung einer besonders geschützten Tier- und Pflanzenart führt. Diese Liste könnte jedenfalls mit einer Vielzahl an Amphibien, Käfern, Schmetterlingen, Vögeln und anderem Getier aber auch Pflanzen fortgesetzt werden.

All diesen Tieren und Pflanzen ist eines gemein. Sie stehen in den Anhängen II und IV der FFH Richtlinie der EU. Anhang II umfasst jene Tier- und Pflanzenarten von gemeinschaftlichem Interesse, für deren Erhaltung besondere Schutzgebiete auszuweisen sind. Anhang IV jene, die streng geschützt werden müssen. Damit ist es aber, was den Schutz der Natur betrifft, noch nicht getan. In Österreich sind dazu auch noch die neun Landesnaturschutzgesetze, Richtlinien, wie die RVS 04.03.13, RVS 04.03.11 oder RVS 04.03.15, die rote Liste gefährdeter Biotoptypen Österreichs und allfällige Biotoptypenkataloge der Bundesländer, wie etwa der Biotoptypenkatalog der Steiermark, zu berücksichtigen. Wie diese ganzen Gesetze, Normen, Richtlinien und Listen anzuwenden sind, respektive in Verfahren von Amtssachverständigen angewendet werden, ist jedoch schwer bis kaum nachvollziehbar.

Die Landesnaturschutzgesetze haben sich im letzten Jahrzehnt zum Sargnagel vieler Projekte entwickelt. So hat etwa das Steiermärkische Naturschutzgesetz 2017 die Aufgabe den Schutz und die Pflege der belebten und unbelebten Natur einschließlich der vom Menschen gestalteten Kulturlandschaft zu regeln. Ziel ist es, die Natur in allen ihren Erscheinungsformen und Wechselwirkungen als Daseinsgrundlage aller Lebewesen nur so weit in Anspruch zu nehmen, dass sie für nachfolgende Generationen unter Berücksichtigung der Erholungswirkung und nachhaltiger Nutzung des Naturraumes erhalten bleibt. Der Schutzzweck des Gesetzes wird so definiert, dass bei allen Vorhaben mit erwartbaren Auswirkungen auf Natur und Landschaft darauf Bedacht zu nehmen ist, dass durch das Vorhaben der Naturhaushalt in seinem Wirkungsgefüge oder der Landschaftscharakter nicht nachteilig beeinträchtigt werden oder das Landschaftsbild nicht nachteilig verunstaltet wird. Und nach dem Stmk. Naturschutzgesetz liegt eine nachhaltige Beeinträchtigung des Naturhaushaltes insbesondere dann vor, wenn durch den Eingriff seltene oder gefährdete Tier- und Pflanzenarten bzw. Pilze, deren Lebensräume oder Lebensgrundlagen in ihrer Vielfalt oder Häufigkeit geschädigt werden. Verboten sind alle absichtlichen Formen des Fangens oder der Tötung; jede absichtliche Störung, jede absichtliche Zerstörung oder Entnahme von Eiern sowie jede Beschädigung oder Vernichtung der Fortpflanzungs- oder Ruhestätten.

Das Steiermärkische Naturschutzgesetz ist also praktisch immer anzuwenden. Einzig für ein paar wenige Ausnahmen gilt dieses Gesetz nicht. Das sind Bundesheereinsätze, Einsätze des Katastrophenschutzes, der Polizei und des Rettungsdienstes und das Ausbringen von gentechnisch veränderten Organismen; dafür gibt es die Bestimmungen des Stmk. Gentechnikvorsorgegesetzes.

Und dann gibt es noch eine Ausnahmebestimmung in diesem Gesetz, die man nicht in den Gesetzestext aufnehmen hätte müssen, nämlich die Tatsache, dass dieses Landesgesetz die Zuständigkeiten des Bundes nicht berührt und daher die Benutzbarkeit von Flächen und bestehenden Anlagen, die den Zwecken des Bergbaues oder des Eisenbahn-, Luft-, und Straßenverkehrs dienen, durch das Stmk. Naturschutzgesetz nicht eingeschränkt werden darf. Nun könnte man meinen, dass damit für Infrastrukturprojekte, für deren Genehmigung die Bundeszuständigkeit gilt, der Naturschutz obsolet ist und damit kein „Problem“ entstehen kann. Diese Annahme ist aber verfehlt. Bei solchen Infrastrukturprojekten werden dann nämlich nicht die Landesnaturschutzgesetze und die Biotoptypenkataloge der Länder strapaziert, sondern die FFH Richtlinie und deren Anhang IV. Wird ein Tier das oder eine Pflanze, die in dieser Liste vorkommen gefunden, greift zwar nicht das Landesnaturschutzgesetz, aber dafür die EU-Richtlinie (FFH Richtlinie), die bei Projekten mit Bundeszuständigkeit anzuwenden ist.

2.1 Der Naturschutz und das Abfallrecht

Auch im Bereich des Abfallrechts kommt es immer öfter vor, dass besonders schützenswerte Tiere oder Pflanzen die Verzögerung oder gar die vollständige Verhinderung eines Projektes bewirken. In Verfahren zur Genehmigung von AWG-Betriebsanlagen sind Kraft einer Verfassungsbestimmung die naturschutzrechtlichen Bestimmungen mitanzuwenden. Biotopkartierungen sind also als Vorarbeit für eine Betriebsanlagengenehmigung verpflichtend vorzunehmen. Da Anlagen, die dem Zweck der Abfallbehandlung dienen in den überwiegenden Fällen abseits von Siedlungsgebieten errichtet werden (müssen), steht einer Genehmigung praktisch immer ein besonders schützenswertes Tier, eine besonders schützenswerte Pflanze oder gleich ein gefährdeter Biotoptyp im Weg. An ein paar Beispielen aus der Praxis soll das Problem dargestellt werden.

2.2 Bodenaushubdeponie in einer Lehmgrube

In einem abgeschiedenen Waldstück entstand bis vor etwa 30 Jahren eine Grube, in der zuvor Lehm abgebaut wurde. In den letzten 30 Jahren wurde dieser von Menschenhand geschaffene Bereich für die Weidehaltung von Ziegen genutzt. Um die Regenabflussverhältnisse zu regulieren wurde in der Mitte des Grundstückes ein künstlicher Teich angelegt, der sich im Laufe der Jahrzehnte zu einem Biotop entwickelt hat. Aufgrund des noch immer dichten Untergrundes – für die Errichtung einer Bodenaushubdeponie ideale Basisdichtungsverhältnisse – haben sich auch bei Starkregen kleine natürliche Bachläufe und Vernässungsstellen gebildet. Diese und die Tatsache, dass sich unter den feuchten Grundverhältnissen Amphibien und ganz besonders die streng geschützte Gelbbauchunke sehr wohl fühlen, haben zu einem negativen Naturschutzgutachten geführt, das die Errichtung dieser Bodenaushubdeponie auf einem an sich idealen Platz gefährdet. Es steht zu befürchten, dass nicht einmal Ausgleichsmaßnahmen und die Schaffung von Ersatzlebensräumen zu einem positiven Gutachten führen werden. Das Verfahren ist in erster Instanz noch nicht abgeschlossen.

2.3 Erweiterung einer bestehenden Massenabfall- und Reststoffdeponie:

Eine bestehende Deponie soll, weil ihre genehmigte Kapazität zu Neige geht, erweitert werden. Im Zuge des Erweiterungsprojektes wurde festgestellt, dass der Girlitz, ein zur Familie der Kanarienvögel gehörender Zugvogel, den offenen und den bereits rekultivierten Teil der Deponie als Nahrungsquelle für sich beansprucht. Samen von Gräsern, die auf der Deponie wachsen, sind das bevorzugte Futter dieses Vogels. Im Zuge des Genehmigungsverfahrens ist sogar die Versagung der Erweiterung im Raum gestanden - und zwar mit dem Argument, dass der Girlitz durch den Weiterbau und den Betrieb der Deponie gestört werden könnte und eine Abwanderung/Vergrämung zu befürchten sei. Faktisch müsse nach Meinung des Naturschutzes der Vogel also vor dem geschützt werden, was ihm überhaupt die Existenz an diesem Ort ermöglicht. Der Antrag wurde unter Vorschreibung von massiven Auflagen zum Schutz des Vogels bewilligt.

2.4 Bodenaushubdeponie in einer ausgekiesten Schottergrube

In Kärnten, östlich von Klagenfurt wurde bis vor 30 Jahren ein Kiesvorkommen in einem Gebiet genutzt, das hauptsächlich aus Land- und forstwirtschaftlichen Flächen besteht. Nach der Auskiesung ist diese rund 2 Hektar große Fläche als Schottergrube in einer an sich flachen Landschaftsstruktur zurückgeblieben. Bereits vor rund 25 Jahren hat die Gemeinde den Beschluss gefasst das Gebiet im Flächenwidmungsplan als „Abfallbehandlungsstätte – Bodenaushubdeponie“ auszuweisen. Der Grundstückseigentümer selbst hat keine Maßnahmen ergriffen und die Natur hat das gemacht, was sie immer tut, wenn der Mensch keine Landschaftspflege betreibt, sie hat sich verselbstständigt. Im vorliegenden Fall in Form der Ausbildung eines Karbonatrotföhrenwaldes auf einem Drittel der Fläche, ein nach den Bestimmungen des Kärntner Naturschutzgesetzes besonders geschützter Biotoptyp. Es gibt in Kärnten nur knapp 6000 ha dieses Waldtypes. Die Tatsache, dass die ehemalige Kiesgrube im Flächenwidmungsplan sogar als Bodenaushubdeponie ausgewiesen ist und der Standort für einen Karbonatrotföhrenwald nach Ansicht des naturschutzfachlichen Amtssachverständigen absolut „atypisch“ ist, hat trotzdem dazu geführt, dass die Behörde die Bewilligung der Errichtung einer Bodenaushubdeponie auf einem dafür ausgewiesenen Standort wegen 0,8 ha Wald versagt hat. Das Verfahren ist derzeit beim VwGH anhängig.

2.5 Bodenaushubdeponie in einer ausgekiesten Schottergrube

In Kärnten, östlich von Klagenfurt, wurde bis vor 30 Jahren ein Kiesvorkommen in einem Gebiet genutzt, das hauptsächlich aus Land- und forstwirtschaftlichen Flächen besteht. Nach der Auskiesung ist diese rund 2 Hektar große Fläche als Schottergrube in einer an sich flachen Landschaftsstruktur zurückgeblieben. Bereits vor rund 25 Jahren hat die Gemeinde den Beschluss gefasst das Gebiet im Flächenwidmungsplan als „Abfallbehandlungsstätte – Bodenaushubdeponie“ auszuweisen. Der Grundstückseigentümer selbst hat keine Maßnahmen ergriffen und die Natur hat das gemacht, was sie immer tut, wenn der Mensch keine Landschaftspflege betreibt: sie hat sich verselbstständigt. Im vorliegenden Fall in Form der Ausbildung eines Karbonatrotföhrenwaldes auf einem Drittel der Fläche, ein nach den Bestimmungen des Kärntner Naturschutzgesetzes besonders geschützter Biotoptyp. Es gibt in Kärnten nur knapp 6000 ha dieses Waldtypes. Die Tatsache, dass die ehemalige Kiesgrube im Flächenwidmungsplan sogar als Bodenaushubdeponie ausgewiesen ist und der Standort für einen Karbonatrotföhrenwald nach Ansicht des naturschutzfachlichen Amtssachverständigen (ASV) absolut „atypisch“ ist, hat trotzdem dazu geführt, dass die Behörde die Bewilligung der Errichtung einer Bodenaushubdeponie auf einem dafür ausgewiesenen Standort wegen 0,8 ha Wald versagt hat. Das Verfahren ist derzeit beim VwGH anhängig.

2.6 Begradigung einer Schafweide

Ein Landwirt im oberen Ennstal hat mit einer Schafweide aufgrund massiver Vernässungen ein Bewirtschaftungsproblem. Plan war, die Weide zu drainagieren und mit reinem Bodenaushub bester Qualität von Bauvorhaben aus der Region zu begradigen, um sie besser bewirtschaften zu können. Der von der Genehmigungsbehörde beigezogene naturschutzfachliche ASV hat bei einer Begehung der Schafweide jedoch eine in diesem Gebiet zwar nicht sehr seltene aber doch besonders geschützte Pflanzenart, das Knabenkraut entdeckt. Konsequenz aus dieser Entdeckung war in einem ersten Schritt die Versagung der Agrarstrukturverbesserung dieser seit Jahrzehnten, wahrscheinlich sogar seit Jahrhunderten genutzten Schafweide. Erst massive Einschnitte in das Projekt – rund ein Drittel der Weide musste im Urzustand belassen werden – haben zu einer positiven Stellungnahme des Naturschutzes geführt. Dies, obwohl die Schafe das Knabenkraut jedes Jahr aufs Neue nicht als besonders schützenswerte Pflanze, sondern als Futter erkennen.

2.7 Bodenaushub zur Verfüllung eines Grabens

Eine Baufirma hat vor mittlerweile sieben Jahren geplant, einen Graben mit reinem Bodenaushub zu verfüllen. Ursprünglich als Rekultivierungsmaßnahme (Agrarstrukturverbesserung) geplant wurde man von der Behörde dazu verpflichtet, das Projekt als Bodenaushubdeponie genehmigen zu lassen. Im Zuge des Bewilligungsverfahrens wurde auf dem Gelände die besonders geschützte Zauneidechse aufgefunden. Großräumige Maßnahmen der Absammlung und Umsiedelung wurden vorgeschrieben. Gleichzeitig wurde die Auflage der Errichtung eines Lärmschutzwalls zum Schutz der Anrainer vorgeschrieben. Dieser Lärmschutzwall ist auch als Ersatzlebensraum für die abgesammelten Eidechsen vorgesehen. Im Zuge des Genehmigungsverfahrens wurde auch ein ASV für den Schutz des Orts- und Landschaftsbildes beigezogen. Dieser hat in dem vorgeschriebenen Lärmschutzwall dann eine Beeinträchtigung des Orts- und Landschaftsbildes festgestellt und seine Entfernung nach Fertigstellung der Deponie beauflagt. Damit würde aber der Ersatzlebensraum der Zauneidechse zerstört. Die Bewilligung des Projektes wäre nach mehr als siebenjähriger Verfahrensdauer beinahe an diesem „Dilemma“ gescheitert. Die Bodenaushubdeponie wurde in der Zwischenzeit genehmigt und als Kompromiss wurde vereinbart, dass ein Teil des Lärmschutzwalls unter neuerlicher Umsiedelung der Zauneidechsen entfernt und ein Teil zum Wohle des Naturschutzes bestehen bleibt.

3 ZUSAMMENFASSUNG

Nun ist Umweltschutz ohne Zweifel ein wichtiger Puzzlestein um den Fortbestand der Spezies Mensch auf dem Planeten Erde zu sichern. Der Naturschutz ist jedoch nur ein klitzekleiner Bestandteil dieses Puzzles. Von den Jüngern dieser Ersatzreligion werden die FFH Richtlinie und die darauf basierenden Naturschutzgesetze aber regelmäßig so dargestellt, als ob das Überleben unserer Spezies, ja sogar des ganzen Planeten davon abhängen, dass ein Käfer, ein Schmetterling, eine Echse oder der zumindest im Ennstal zu trauriger Berühmtheit gelangte Crex Crex in gerade jenem Gebiet gerettet werden muss, in dem etwas zum Wohle, aber auch zum Schutz des Menschen geschaffen werden soll.

Der Glaube an den Naturschutz, und dieser Gefahr ist jede Religion ausgesetzt, hat in letzter Zeit auch immer wieder einmal in Extremismus umgeschlagen. Dann werden Hände, Füße oder der gluteus maximus in an Selbstverstümmelung grenzender Art auf Straßen festgeklebt oder an Bäume gekettet. Gepaart mit dem Getöse in der Öffentlichkeit, lieber selbst zu leiden ja sogar zu sterben als es zuzulassen, das Tier und Pflanze Schaden zugefügt wird. Der Rechtsstaat wird angezweifelt, wenn er den eigenen Anschauungen entgegensteht, aber bis zum Exzess ausgenützt, wenn damit der Glaube durchgesetzt werden kann.

Die Spezies Mensch hat bisher aber nicht deshalb überlebt, weil sie alles verhindert hat, sondern deshalb, weil sie durch Fortschritt Wohlstand geschaffen hat. Und Fortschritt bedeutet Veränderung und damit Wandel. Ohne Wandel würden wir noch immer in Höhlen und auf Bäumen leben, es gäbe keine Kulturlandschaften und viele der wunderbaren Naturschönheiten würden ohne unseren Eingriff auf dieser Erde nicht existieren. Es muss die Frage gestellt werden dürfen, ob es wichtiger ist, den Wohlstand des Menschen zu bewahren, Strom für Heizung und Licht zu haben oder gar Menschenleben zu retten oder stattdessen den Lebensraum eines Tieres an einer ganz bestimmten Stelle aufrecht zu erhalten. Jeder rationale Mensch, dem die Erhaltung seiner Spezies wirklich ein Anliegen ist, muss über diese Frage nicht lange nachdenken.

KONTAKT

Hon. Prof. Dr. Martin Eisenebrger LL.M
kanzlei@umweltrecht.at
0316 764455
Eisenberger & Offenbeck Rechtsanwälte GmbH
www.umweltrecht.at

Die Herausforderungen der neuen EU-Altfahrzeugeverordnung an die Recyclingindustrie

Peter Hodecek
Scholz Austria GmbH, EU-Angelegenheiten, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die Abgeordneten des Europäischen Parlaments haben am 18. Juni 2026 Einigung über den zuvor mit dem Rat abgestimmten Kompromisstext für eine Verordnung über Anforderungen an die kreislauforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und die Entsorgung von Altfahrzeugen erzielt. Mit den neuen Vorschriften werden zwei bestehende Richtlinien ersetzt und es wird sichergestellt, dass neue Fahrzeuge mit Blick auf deren Wiederverwendung, Recycling und Verwertung konzipiert werden.
Mit der neuen Verordnung werden Maßnahmen für den gesamten Lebenszyklus von Fahrzeugen eingeführt, von der Konstruktion und Herstellung bis hin zur Behandlung von Altfahrzeugen, mit dem Ziel, einerseits den Umweltschutz zu verbessern und andererseits das reibungslose Funktionieren des Binnenmarkts zu gewährleisten. Ein Schwerpunkt liegt darauf, das anhaltende Problem der „Fahrzeuge mit unbekanntem Verbleib“ durch verbesserte Rückverfolgbarkeits- und Kontrollmaßnahmen einer für die Recyclingindustrie wichtigen Lösung zuzuführen. Der endgültige Text hebt außerdem die wesentliche Rolle der europäischen Recyclingindustrie bei der Lieferung hochwertiger sekundärer Rohstoffe hervor.

Der Beitrag setzt auf den Stand der Diskussion Ende Juni 2026 auf.

1 EINLEITUNG

Bereits am 13. Juli 2023 hat die Europäische Kommission (COM) den Entwurf einer Neufassung des europäischen Rechtsrahmens für Altfahrzeuge vorgelegt. Die neue Regelung soll die über 25 Jahre alte Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge ersetzen und unionsweit als unmittelbar in allen Mitgliedstaaten geltende Verordnung den gesamten Lebenszyklus von Fahrzeugen durch strengere Recycling- und Designvorgaben (z.B. in Form verbindlicher Mindestrezyklatanteile für bestimmte in Fahrzeugen verwendete Materialien) nachhaltiger gestalten sowie den Export von Altfahrzeugen regulieren.

Nach intensiven, mehr als zwei Jahre andauernden Verhandlungen beschloss das Europaparlament am 9. September 2025 weitreichende Änderungen zum Vorschlag der Kommission für eine neue EU-Altfahrzeugverordnung. Am 12. Dezember 2025 wurde darüber eine vorläufige Einigung über den Vorschlag der Kommission für eine europaweit geltende und einheitliche Verordnung über Altfahrzeuge zwischen dem Europäischen Parlament und dem Rat erzielt. In der Plenarabstimmung am 18. Juni 2026 beschloss das Europaparlament mit 437 Ja-Stimmen, 112 Nein-Stimmen und 20 Enthaltungen endgültig die neue Verordnung. Der endgültig abgestimmte Kompromissvorschlag der neuen Altfahrzeugeverordnung umfasst insgesamt 289 Seiten.

2 DIE WESENTLICHSTEN BESTIMMUNGEN

2.1 Anwendungsbereich

Mit der neuen Verordnung wird der Anwendungsbereich der früheren Richtlinien erheblich ausgeweitet, um mehr Fahrzeugklassen abzudecken und so einen größeren Anteil an Fahrzeugen und Bauteilen bzw. Ersatzteilen in der EU für die Anforderungen der Kreislaufwirtschaft zu erfassen.

Darüber hinaus werden auch die Behandlungsanforderungen (Sammlung, Beseitigung von Schadstoffen, obligatorische Entfernung von Teilen) auf alle normalen schweren Nutzfahrzeuge (z. B. Lastkraftwagen), Motorräder und Fahrzeuge mit besonderer Zweckbestimmung (sowohl leichte als auch schwere Nutzfahrzeuge) ausgeweitet.

2.2 Kreislauforientierte Konstruktion und Rezyklatanteil

Die neue Verordnung soll sicherstellen, dass Neufahrzeuge so konstruiert werden, dass sie das Recycling, die Wiederverwendung und die Wiederaufarbeitung von Teilen und Bauteilen erleichtern. Ein Kernelement ist die Einführung verbindlicher Zielvorgaben für den Rezyklatanteil, insbesondere von Kunststoffen, in Neufahrzeugen. Diese Zielvorgaben für recycelte Kunststoffe werden schrittweise über einen Zeitraum von zehn Jahren eingeführt:

- 15 % in 6 Jahren und
- 25 % in 10 Jahren.

Um sicherzustellen, dass wertvolle Materialien in der Kreislaufwirtschaft der EU verbleiben, müssen mindestens 20 % dieses recycelten Kunststoffs aus einem geschlossenen Recyclingkreislauf stammen (d. h. aus Altfahrzeugen zurückgewonnen werden).

Auf Grundlage einer Machbarkeitsstudie, die innerhalb eines Jahres nach Inkrafttreten der Verordnung abgeschlossen werden soll, muss die Kommission im Wege eines delegierten Rechtsakts künftige Ziele für andere Materialien wie recycelten Stahl, Aluminium, Magnesium und kritische Rohstoffe einführen. Der Schwerpunkt liegt nach wie vor darauf, sicherzustellen, dass diese Ziele durch die Verwendung von Verbraucherabfällen erreicht werden.

2.3 Erweiterte Herstellerverantwortung

Hersteller können entscheiden, ob sie ihre Pflichten der erweiterten Herstellerverantwortung individuell oder kollektiv als Mitglieder einer Organisation für Herstellerverantwortung, die die Verantwortung in ihrem Namen übernimmt, erfüllen möchten. Die Mitgliedstaaten können jedoch verlangen, dass ein Hersteller von einer Organisation für Herstellerverantwortung vertreten wird. In solchen Fällen werden die Hersteller von dem Mitgliedstaat nicht verpflichtet, von einer bestimmten Organisation für Herstellerverantwortung vertreten zu werden, da hinsichtlich der Anzahl der Organisationen für Herstellerverantwortung, die in einem Mitgliedstaat ansässig sein dürfen, Flexibilität herrschen muss.

Die Hersteller sollen einen Teil der Kosten für die Sammlung und Behandlung von Altfahrzeugen tragen, die in Verbindung mit der Erfüllung der Verpflichtungen, mit denen eine hochwertigere Qualität von aus Fahrzeugen gewonnenen Sekundärrohstoffen gewährleistet werden soll. Die genaue Höhe der Kosten solcher Vorgänge, die von den Herstellern getragen werden sollen, sind unter Berücksichtigung der Einnahmen der zugelassenen Behandlungsanlagen und anderer Abfallwirtschaftsunternehmen aus dem Verkauf gebrauchter Ersatz- oder Bauteile und von Sekundärrohstoffen aus Altfahrzeugen bestimmt werden. Zu diesem Zweck sollen die zuständigen Behörden in Zusammenarbeit mit den Herstellern und den Abfallwirtschaftsunternehmen die durchschnittlichen Kosten der Sammlung, des Recyclings und der Behandlung sowie die Höhe der finanziellen Beiträge überwachen, die die Hersteller zahlen, um sicherzustellen, dass die Kosten gerecht auf alle interessierten Wirtschaftsteilnehmer verteilt werden.

2.4 Status und Rückverfolgbarkeit von Altfahrzeugen

Rund 3,5 Millionen Fahrzeuge verschwinden jedes Jahr spurlos in der EU und werden illegal ausgeführt, demontiert oder entsorgt. Um dem Problem der „Fahrzeuge mit ungewissem Verbleib“ und der illegalen Demontage wirksam entgegenzutreten sieht die Verordnung neue Kriterien für die Unterscheidung zwischen Gebrauchtfahrzeugen und Altfahrzeugen vor.

Es werden klare Kriterien festgelegt, wann ein Fahrzeug als Abfall – d. h. als Altfahrzeug – einzustufen ist. Sobald ein Fahrzeug diese Kriterien erfüllt, muss es von einer zugelassenen Verwertungsanlage behandelt werden und kann nicht rechtmäßig ausgeführt oder als Gebrauchtfahrzeug weiterverkauft werden.

Ein Fahrzeug gilt nunmehr als Altfahrzeug, wenn es eines oder mehrere der folgenden Kriterien erfüllt:

- Es wurde zerlegt oder zur Wiederverwendung seiner Teile demontiert,
- durch einen Fahrzeugbrand wurde der Motorraum oder der Fahrgastraum vollständig zerstört ist,
- das Fahrzeug wurde bis über das Armaturenbrett in Wasser eingestaut (z.B. durch ein Hochwasserereignis),
- eine oder mehrere der folgenden Fahrzeugkomponenten können aus technischer Sicht weder repariert noch ersetzt werden:
    - Reifen und Räder, Federung, Lenkung, Bremsen und deren Steuerungskomponenten,
    - Sitzbefestigungen und -gelenke,
    - Airbags, Gurtstraffer, Sicherheitsgurte und deren periphere Betätigungskomponenten oder
    - die Fahrzeugkarosserie und das Fahrgestell,
- die Struktur- und Sicherheitskomponenten des Fahrzeugs weisen irreparable technische Mängel auf, die einen Austausch unmöglich machen,
- das Fahrzeug wurde zur Behandlung an einer Sammelstelle oder einer genehmigten Behandlungseinrichtung abgegeben oder
- das Fahrzeug wurde von einer Versicherung aufgrund der technischen Begutachtung durch einen Kfz-Sachverständigen als Totalschaden eingestuft.

Wenn keines der vorgenannten Kriterien zutrifft, wird das Fahrzeug nach folgenden Kriterien beurteilt:

- Das Fahrzeug wurde im öffentlichen Raum abgestellt und verlassen und/oder eine Identifizierung ist nicht möglich, insbesondere die Fahrzeugidentifikationsnummer (FIN),
- Es ist während der Lagerung, des Transports, des Be- und Entladens nicht ausreichend vor Beschädigungen geschützt,
- Die Kosten für die Instandsetzung des Fahrzeugs, um einen technischen Zustand zu erreichen, der für die Erteilung einer Verkehrssicherheitsbescheinigung ausreicht, übersteigen zuzüglich seines aktuellen Wertes seinen geschätzten Marktwert nach der Instandsetzung,
- Das Fahrzeug wurde bis unterhalb des Armaturenbretts in Wasser eingestaut, wodurch der Motor oder die Elektrik beschädigt wurden,
- Kraftstoff oder Kraftstoffdämpfe sind ausgetreten, wodurch Brand- und Explosionsgefahr besteht,
- Gas ist aus dem Flüssiggassystem ausgetreten und birgt Brand- und Explosionsgefahr,
- Betriebsflüssigkeiten (Kraftstoff, Bremsflüssigkeit, Frostschutzmittel, Batteriesäure, Kühlflüssigkeit) sind ausgetreten und bergen die Gefahr der Wasserverschmutzung,
- Das Fahrzeug wurde zerlegt oder demontiert oder
- eine oder mehrere Türen bzw. andere Fahrzeugöffnungen sind zugeschweißt oder mit Isolierschaum verschlossen.

Mit der Einigung wird auch ein strenger Rahmen für die Eigentumsübertragung durch Wirtschaftsteilnehmer geschaffen. Bei der Übertragung durch Privatpersonen wird ein risikobasierter Ansatz verfolgt. Es ist nunmehr – auch – eine Dokumentation für jene Situationen erforderlich, bei welchen bisher die Wahrscheinlichkeit am größten war, dass Fahrzeuge in der Union als „unbekannten Verbleibs“ einzustufen waren bzw. sind, z. B. wenn

- das Fahrzeug von einer Versicherungsgesellschaft zu einem wirtschaftlichen Totalschaden erklärt wird oder
- der Verkauf über eine Online-Plattform abgeschlossen wird und ausschließlich ohne physische Übergabe des Fahrzeugs zwischen Verkäufer und Käufer erfolgt.

3 BEDEUTUNG UND HERAUSFORDERUGNEN FÜR DIE RECYCLINGINDUSTRIE

Jedes Jahr fallen in der EU mehr als 6 Millionen Altfahrzeuge an – Fahrzeuge, die das Ende ihrer Lebensdauer erreichen und als Abfall zu behandeln und zu verwerten sind. Jedoch „verschwinden“ in der EU jährlich 3 bis 4 Millionen Fahrzeuge, d. h. sie werden abgemeldet, ohne dass den Behörden Angaben zu ihrer endgültigen Bestimmung – wie die Verschrottung in einer zugelassenen Verwertungsanlage oder die Ausfuhr – übermittelt werden.

Dessen ungeachtet ist die Automobilindustrie einer der ressourcenintensivsten Sektoren in der EU und einer der größten Verbraucher von Primärrohstoffen wie Stahl (über 7 Mio. Tonnen/Jahr), Aluminium (rund 2 Mio. Tonnen/Jahr), Kupfer (0,2 bis 0,3 Mio. Tonnen/Jahr bzw. 6 % des gesamten EU-Verbrauchs) und Kunststoffen (6 Mio. Tonnen/Jahr). Recycelte Materialien werden jedoch in der Produktion kaum verwendet.

Die Verhinderung der illegalen Verbringung von Altfahrzeugen aus der EU sowie die Erhöhung des Rezyklatanteils – insbesondere von Metallen und Kunststoffen – in der europäischen Automobilproduktion sind deshalb von zentraler Bedeutung für die europäische Recyclingindustrie.

3.1 Verwertungsbestätigung

Zugelassene Behandlungsanlagen müssen nunmehr dem letzten Fahrzeughalter bei Anlieferung des Altfahrzeugs eine elektronische Verwertungsbestätigung ausstellen. Diese ist den zuständigen Behörden des Mitgliedstaats, einschließlich der in Artikel 14 benannten Behörden, elektronisch zu übermitteln. Die zugelassene Behandlungsanlage übermittelt dem letzten Fahrzeughalter und jedem Wirtschaftsakteur, der im Auftrag des Fahrzeughalters handelt, eine Kopie der elektronischen Benachrichtigung.

Wird das Altfahrzeug, für das in einem Mitgliedstaat eine Verwertungsbestätigung ausgestellt wurde, in einem anderen Mitgliedstaat zugelassen, so unterrichten die zuständigen Behörden des ausstellenden Mitgliedstaats die zuständigen Behörden des Zulassungsmitgliedstaats darüber, dass für das betreffende Fahrzeug eine Verwertungsbestätigung ausgestellt wurde.

Die zuständigen Fahrzeugzulassungsbehörden löschen die Zulassung eines Altfahrzeugs erst nach Erhalt der Verwertungsbestätigung für dieses Fahrzeug. Verwertungsbestätigungen, die in einem EU-Mitgliedstaat ausgestellt wurden, werden in allen anderen Mitgliedstaaten der EU anerkannt.

3.2 Behandlungspflichten

Die neue Verordnung enthält zahlreiche und umfassende Vorgaben zur Behandlung und Verwertung von Altfahrzeugen bzw. bestimmter Fahrzeugkomponenten. Anhang VII Teil C enthält eine Liste von 23 verpflichtend vor einer Behandlung eines Altfahrzeugs manuell, halbautomatisch oder automatisiert zerstörungsfrei zu demontierender Bauteile.

Eine zugelassene Behandlungsanlage ist jedoch nicht verpflichtet, alle 23 in Anhang VIII / Teil C gelisteten Teile und Komponenten zu entfernen, wenn sie nachweist, dass Nachzerkleinerungstechnologien die in Anhang VIII / Teil C aufgeführten Teile und Komponenten ebenso effizient trennen kann wie manuelle, halbautomatische oder vollautomatische Demontageverfahren und, dass die in Anhang VIII / Teil G angeführten Kriterien und Grenzwerte eingehalten werden.

Davon ausgenommen sind jedenfalls folgende unbedingt vor einem Shredderprozess verpflichtend zu demontierenden Fahrzeugkomponenten bzw. -bauteile:

- Batterien von Elektrofahrzeugen, einschließlich ihrer Batteriemanagementsysteme, Bordladegeräte, Gehäuse oder sonstiger Komponenten (sofern vorhanden),
- Batterien für leichte Verkehrsmittel (Light Means of Transport (LMT)-Batterien),
- Starter-, Beleuchtungs- und Zündbatterien gemäß EU-Batterieverordnung 2023/1542,
- Gerätebatterien gemäß EU-Batterieverordnung 2023/1542,
- Elektromotoren, einschließlich ihrer Gehäuse und zugehöriger Steuergeräte, Verkabelung und sonstiger Teile, Komponenten und Materialien,
- Katalysatoren,
- mindestens 70 % der gesamten Glasfläche von Windschutzscheiben, Heck- und Seitenscheiben aus Glas, einschließlich Dachverglasungen,
- Felgen,
- Reifen,
- direkt zugängliche Teile des Infotainmentsystems und
- Scheinwerfer und Rückleuchten, einschließlich ihrer Aktuatoren.

Zugelassene Behandlungsanalgen haben dies spätestens am ersten Tag des Monats, der drei Jahre dem Inkrafttretungstermin folgt, sicherzustellen.

3.3 Gebrauchte Ersatzteile

Aus Altfahrzeugen oder bei Reparatur- und Wartungsvorgängen entfernte Teile und Bauteile, die für die sofortige Wiederverwendung oder eine weitere Wiederaufarbeitung oder Überholung durch sachkundige Unternehmer geeignet sind, gelten nicht als Abfall. Um die Abfallhierarchie einzuhalten und die kreislauforientierte Verwendung von Ersatzteilen zu fördern, wird die Weitergabe dieser Teile und Bauteile, mit Ausnahme von Batterien, zwischen Wirtschaftsteilnehmern nicht eingeschränkt.

Aus Altfahrzeugen entfernte Teile und Bauteile sind von einer zugelassenen Behandlungsanlage ordnungsgemäß zu kontrollieren, zu reinigen und erforderlichenfalls zu testen, damit sie ohne weitere Vorbehandlung umgehend wiederverwendet werden können oder andernfalls für eine weitere Wiederaufarbeitung oder Überholung geeignet sind.

Teile und Bauteile, die nicht für die Wiederverwendung, Wiederaufarbeitung oder Überholung geeignet sind, sind als Abfall einzustufen, und ihre Ausfuhr unterliegt der Verordnung (EU) 2024/1157 des Europäischen Parlaments und des Rates.

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die bestehenden Vorschriften haben in den letzten 26 Jahren zu einer besseren Sammlung von Altfahrzeugen geführt und das Recycling von Altfahrzeugen deutlich verbessert. Bei den meisten der rezyklierten Materialien handelt es sich jedoch um Metallabfälle, die geschreddert und nicht ausreichend sortiert und verwertet wurden bzw. werden; demgegenüber werden nur 19 % der Kunststoffe aus Altfahrzeugen recycelt.

Gemäß der neuen Altfahrzeugeverordnung der EU müssen Fahrzeuge in Zukunft so konstruiert werden, dass sie leichter demontiert werden können. Die Hersteller müssen klare und detaillierte Anweisungen für das Entfernen und Ersetzen von Teilen sowohl während der Verwendung als auch am Ende der Lebensdauer bereitstellen.

Darüber hinaus wird das Spektrum der von der neuen Altfahrzeugeverordnung umfassten Fahrzeuggruppen deutlich erweitert. fallen Lastkraftwagen, Busse und Motorräder nicht unter die bestehenden Rechtsvorschriften.

LITERATURVERZEICHNIS

Europäische Kommission (2025). Übergang zu einer stärker kreislauforientierten Automobilindustrie – Einigung zu Altfahrzeugen Brüssel, Belgien

Aktuelles zur UVP in der Abfallwirtschaft

Christoph Cudlik & Patrick Petschinka
Schönherr Rechtsanwälte GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die UVP ist in der Abfallwirtschaft nicht nur eine Frage abstrakter Schwellenwerte. Sie entscheidet oft darüber, wie ein Vorhaben geplant, eingereicht und genehmigt werden kann – und wie lange der Weg zur Genehmigung dauert. Dabei betrifft die Frage nach einer allfälligen UVP-Pflicht nicht nur Großvorhaben und Neuerrichtungen, sondern auch Änderungen und Erweiterungen bestehender Behandlungsanlagen und Deponien. Selbst wenn ein Vorhaben für sich genommen unter den Schwellenwerten des UVP-G bleibt, kann eine UVP-Pflicht entstehen, wenn der Schwellenwert gemeinsam mit anderen Vorhaben in der Umgebung erreicht wird. Diese sog. „Kumulation“ hat durch die jüngere Rechtsprechung des VwGH deutlich an Bedeutung gewonnen. Für Projektwerber in der Abfallwirtschaft bedeutet das: Die Frage nach einer allfälligen UVP-Pflicht sollte nicht erst am Ende der Planung gestellt werden, sondern bereits bei Standortwahl, Projektzuschnitt und Genehmigungsstrategie.

1 AUSGANGSPUNKT

Das Umweltverträglichkeitsprüfungsverfahren („UVP-Verfahren“) ist das umfangreichste Genehmigungsverfahren in Österreich. Aufgabe der Umweltverträglichkeitsprüfung („UVP“) ist es, unter Beteiligung der Öffentlichkeit sämtliche Umweltauswirkungen eines Vorhabens fachübergreifend festzustellen und zu bewerten – und zwar vor der behördlichen Genehmigung. Das UVP-Verfahren ist dabei als konzentriertes Genehmigungsverfahren ausgestaltet: Es vereint alle relevanten Materiengesetze (z.B. Abfallwirtschaftsgesetz, Wasserrechtsgesetz, Gewerbeordnung) zu einem einzigen Verfahren vor einer einzigen Behörde mit dem Ergebnis eines einzigen Bescheids.

Für Unternehmen stellt sich damit eine entscheidende Vorfrage: Fällt ihr abfallwirtschaftliches Vorhaben überhaupt unter das Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVP-G)? Die Antwort ergibt sich aus dem Zusammenspiel mehrerer Faktoren, darunter der konkrete Vorhabenstyp, die einschlägigen Schwellenwerte und zunehmend auch aus der Frage, welche anderen „Vorhaben" sich in der Umgebung des geplanten Standorts befinden. Nicht nur neue Großprojekte, sondern regelmäßig auch Änderungen und Erweiterungen bestehender Behandlungsanlagen und Deponien rücken verstärkt in den Fokus der UVP (Schmelz & Schwarzer, 2024).

Für Unternehmen ist die Frage nach einer allfälligen UVP-Pflicht daher eine zentrale Weichenstellung der Projektentwicklung. Wird ein Vorhaben dem UVP-Regime unterworfen, ändern sich nicht nur Zuständigkeit und Verfahrensablauf, sondern regelmäßig auch der Verfahrensumfang. Umgekehrt kann eine frühzeitige Klärung der Frage helfen, den Projektzuschnitt, die Standortwahl und die Einreichstrategie realistisch zu planen.

2 UVP-PFLICHT BEI ABFALLWIRTSCHAFTLICHEN VORHABEN

Ob ein Vorhaben UVP-pflichtig ist, richtet sich insb nach Anhang 1 zum UVP-G. Dieser ist in drei Spalten gegliedert: Spalte 1 und 2 enthalten Vorhaben, die jedenfalls einer UVP zu unterziehen sind – entweder in einem (regulären) UVP-Verfahren (Spalte 1) oder in einem vereinfachten Verfahren (Spalte 2). In Spalte 3 finden sich Vorhaben, die nur unter besonderen Voraussetzungen (insbesondere in schutzwürdigen Gebieten) UVP-pflichtig sind; hier hat ab den angegebenen Schwellenwerten eine sog „Einzelfallprüfung“ der Umweltauswirkungen zu erfolgen.

Vereinfacht gesagt sind anhand von Anhang 1 UVP-G drei Fragen zu beantworten: Um welche Art von Vorhaben handelt es sich? Ab welcher Größe ist es UVP-relevant? Und führt dies sofort zu einer UVP oder zunächst „nur“ zu einer Einzelfallprüfung?

Für die Abfallwirtschaft stehen drei Vorhabenskategorien im Mittelpunkt: Deponien und Behandlungsanlagen für gefährliche Abfälle (Z 1), Deponien und Behandlungsanlagen für nicht gefährliche Abfälle (Z 2) sowie Anlagen zur Lagerung von Abfällen (Z 3). Die dabei verwendeten Begriffe – etwa „gefährliche Abfälle“, „Behandlung“ oder „Deponie“ – orientieren sich weitgehend am Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002). Darüber hinaus können abfallwirtschaftliche Vorhaben auch unter andere Vorhabenskategorien des Anhang 1 zum UVP-G fallen. Eine UVP-Pflicht kann schließlich auch unterhalb der Schwellenwerte entstehen, wenn ein Vorhaben gemeinsam mit anderen Vorhaben in der Umgebung die Schwellenwerte erreicht („Kumulation“).

2.1 Tatbestände der Abfallwirtschaft in Anhang 1 zum UVP-G

Z 1 – Anlagen zur Behandlung gefährlicher Abfälle:

Die Z 1 erfasst Deponien und Behandlungsanlagen für gefährliche Abfälle:

- Deponien für gefährliche Abfälle sind jedenfalls – ohne Mengenschwelle – UVP-pflichtig.
- Anlagen zur biologischen, physikalischen oder mechanisch-biologischen Behandlung gefährlicher Abfälle lösen ab einer Kapazität von mindestens 20.000 t/a eine UVP-Pflicht aus.
- Sonstige Anlagen zur thermischen oder chemischen Behandlung gefährlicher Abfälle sind ebenfalls – ohne Mengenschwelle – UVP-pflichtig; ausgenommen sind Anlagen zur ausschließlich stofflichen Verwertung.
- Für Änderungen von sonstigen Anlagen zur thermischen oder chemischen Behandlung gefährlicher Abfälle mit einer Kapazität von bis zu 10.000 t/a ist ab einer Kapazitätsausweitung um mindestens 5.000 t/a eine Einzelfallprüfung durchzuführen; auch hier sind Anlagen zur ausschließlich stofflichen Verwertung ausgenommen.

Diese Tatbestände sind Spalte 1 zugeordnet und daher stets dem regulären UVP-Verfahren zu unterziehen.

Z 2 – Anlagen zur Behandlung nicht gefährlicher Abfälle:

Die Z 2 erfasst Deponien und Behandlungsanlagen für nicht gefährliche Abfälle:

- Bei Deponien richten sich die Schwellenwerte primär nach dem Deponietyp gemäß Deponieverordnung 2008 (DVO 2008). Erfasst werden Inertabfall-, Baurestmassen-, Reststoff-, Massenabfall- und Untertagedeponien. Keiner UVP-Pflicht unterliegen hingegen Bodenaushubdeponien. Die Schwellenwerte der erfassten Deponietypen variieren von ab 250.000 m^3 bis zu ab 1.000.000 m^3.
- Sonstige Anlagen zur Behandlung von nicht gefährlichen Abfällen sind ab einer Kapazität von mindestens 35.000 t/a oder 100 t/d UVP-pflichtig. Auch hier sind Anlagen zur ausschließlich stofflichen Verwertung ausgenommen; darüber hinaus – und anders als nach Z 1 – auch Anlagen zur mechanischen Sortierung.
- Anlagen zur Aufbereitung von Baurestmassen oder von Bodenaushub unterliegen ab einer Kapazität von mindestens 200.000 t/a der UVP-Pflicht; ausgenommen sind auch hier Anlagen zur ausschließlich stofflichen Verwertung oder mechanischen Sortierung.

Die Tatbestände der Z 2 sind – als einzige der drei abfallwirtschaftlichen Ziffern – auf alle drei Spalten aufgeteilt. Die Verfahrensart hängt daher maßgeblich vom konkreten Deponietyp bzw. der Anlagenart ab.

Z 3 – Anlagen zur Lagerung von Abfällen:

Die Z 3 umfasst schließlich Anlagen zur Lagerung von Abfällen, wobei es sich anders als bei der Deponierung lediglich um eine vorübergehende Lagerung handelt. Der UVP-Pflicht unterliegen:

- Anlagen zur Lagerung von Alt-Kraftfahrzeugen – einschließlich Einrichtungen zum Zerteilen – mit einer Gesamtlagerkapazität von mindestens 10.000 t,
- Anlagen zur Lagerung von Eisenschrott und Alteisen mit einer Gesamtlagerkapazität von mindestens 30.000 t,
- Anlagen zur Lagerung von gefährlichen Abfällen mit einer Gesamtlagerkapazität von mindestens 20.000 t und
- Anlagen zur Lagerung von nicht gefährlichen Abfällen mit einer Gesamtlagerkapazität von mindestens 200.000 t.

Sämtliche Tatbestände der Z 3 sind der Spalte 2 (vereinfachtes Verfahren) oder Spalte 3 (schutzwürdige Gebiete) zugeordnet. In schutzwürdigen Gebieten gelten niedrigere Schwellenwerte.

Zusammenfassend reicht die Bandbreite von der UVP-Pflicht ohne Schwellenwert für Deponien für gefährliche Abfälle bis hin zu differenzierten Kapazitätsgrenzen für Behandlungs- und Lagerungsanlagen. Für Projektwerber ergibt sich daraus die Notwendigkeit, bereits in der Planungsphase eine genaue Zuordnung des Vorhabens zu den einzelnen Tatbeständen und Spalten vorzunehmen.

2.2 Andere Vorhabenskategorien

Die Prüfung der UVP-Pflicht darf sich nicht auf die abfallwirtschaftlichen Tatbestände der Z 1 bis 3 des Anhang 1 zum UVP-G beschränken. Dieser enthält eine ausführliche Liste an Vorhabenskategorien der unterschiedlichsten Sektoren, wovon einige auch bei abfallwirtschaftlichen Vorhaben einschlägig sein können.

So sind etwa spezielle Abfallbehandlungsanlagen, wie Anlagen zur Endlagerung schwach- oder mittelradioaktiver Abfälle (Z 7) oder Anlagen zur Beseitigung oder Verwertung von Tierkörpern oder tierischen Abfällen (Z 82) zwar ebenfalls vom UVP-G erfasst, fallen aber unter andere Vorhabenskategorien. Berührungspunkte könnten sich etwa auch mit Rodungen, Stromleitungen, Industrie- und Gewerbeparks oder den Tatbeständen zur chemischen Industrie ergeben.

Für Projektwerber bedeutet das: Insbesondere bei komplexen oder multifunktionalen Anlagen ist sorgfältig zu prüfen, ob neben Z 1 bis 3 des Anhang 1 zum UVP-G auch andere Tatbestände verwirklicht werden.

2.3 Kumulationsprüfung

Erreicht ein Vorhaben des Anhang 1 zum UVP-G die festgelegten Schwellenwerte nicht, ist zu prüfen, ob die Schwellenwerte allenfalls gemeinsam mit anderen Vorhaben erreicht werden (Kumulationstatbestand nach § 3 Abs 2 UVP-G). Werden die Schwellenwerte aufgrund Kumulation erreicht, hat die Behörde im Einzelfall festzustellen, ob aufgrund der Kumulation mit erheblichen schädlichen, belästigenden oder belastenden Auswirkungen auf die Umwelt zu rechnen ist. Bejahendenfalls besteht eine UVP-Pflicht (Handig 2025).

Die Regelung verfolgt einen doppelten Zweck: Zum einen soll die missbräuchliche Aufteilung eines Vorhabens, das den Schwellenwert eines UVP-pflichtigen Tatbestands überschreitet, in mehrere für sich nicht UVP-pflichtige Teilprojekte verhindert werden. Zum anderen soll – unabhängig von einer Missbrauchsabsicht – auch die kumulative Wirkung gleichartiger Vorhaben auf die Umwelt erfasst werden.

Zu berücksichtigen sind bei der Kumulationsprüfung nach § 3 Abs 2 UVP-G „andere gleichartige und in einem räumlichen Zusammenhang stehende Vorhaben, die bestehen oder genehmigt sind, oder Vorhaben, die mit vollständigem Antrag auf Genehmigung bei einer Behörde früher eingereicht […] oder früher beantragt wurden". Die Kumulationsprüfung verlangt damit drei Voraussetzungen:

- sachlicher Zusammenhang: Die zu berücksichtigenden Vorhaben müssen „gleichartig" sein;
- räumlicher Zusammenhang: Sie müssen in einem räumlichen Zusammenhang mit dem geplanten Vorhaben stehen;
- zeitlicher Zusammenhang: Sie müssen bereits bestehen, genehmigt sein oder zumindest früher eingereicht worden sein.

Nach dem UVP-G ist keine Einzelfallprüfung erforderlich, wenn das geplante Vorhaben eine Kapazität von weniger als 25 % des Schwellenwerts aufweist (sog. „Bagatellschwelle"). IdR kommt es daher zur Kumulationsprüfung, wenn alle drei Voraussetzungen erfüllt sind und das geplante Vorhaben die Bagatellschwelle überschreitet.

Die Kumulationsprüfung verläuft zweistufig: In einem ersten Schritt werden die Kapazitäten des geplanten Vorhabens mit jenen der zu kumulierenden Vorhaben addiert (Schwellenwertberechnung). Wird der einschlägige Schwellenwert erreicht, folgt in einem zweiten Schritt die Einzelfallprüfung, in der die Behörde feststellt, ob aufgrund der kumulativen Auswirkungen mit erheblichen Umweltbelastungen zu rechnen ist.

Lange Zeit wurden als „gleichartige Vorhaben" im Sinne der Kumulationsprüfung nur solche Vorhaben angesehen, deren Schwellenwerte sich ohne Umrechnung zusammenrechnen ließen. So konnte etwa ein Gewerbepark (Schwellenwert: 25 ha) mit einem Logistikzentrum (Schwellenwert: 10 ha) ohne Weiteres kumuliert werden, weil beide auf die Flächeninanspruchnahme in derselben Einheit abstellen.

Im Jahr 2015 sprach der EuGH in der Rechtssache *Marktgemeinde Straßwalchen* (EuGH 11.02.2015, C-531/13) aus, dass die Pflicht zur Prüfung kumulativer Auswirkungen „nicht allein auf gleichartige Projekte beschränkt" sei. Der österreichische Verwaltungsgerichtshof (VwGH) griff dies 2019 in der Entscheidung zum *Windpark Koralpe* auf und hielt fest, dass auch Vorhaben, die unter eine andere Z des Anhang 1 zum UVP-G fallen – im konkreten Fall ein Pumpspeicherkraftwerk in der Nähe eines Windparks –, bei der Einzelfallprüfung nicht unberücksichtigt bleiben dürfen (VwGH 17.12.2019, Ro 2018/04/0012). Im Dezember 2023 bestätigte der VwGH diese Linie zum *Hotel Grand Semmering* und erstreckte sie auch auf Änderungsvorhaben (VwGH 21.12.2023, Ra 2023/04/0109).

Den letzten Schritt setzte der VwGH im August 2024 in der Entscheidung zur *Baurestmassendeponie Fisching* (VwGH 29.08.2024, Ra 2022/07/0025; s auch 30.09.2025, Ra 2024/07/0212): Das geplante Vorhaben – eine Baurestmassendeponie mit einem Gesamtvolumen von 830.000 m^3 – lag unter dem einschlägigen Schwellenwert von 1.000.000 m^3 nach Z 2 des Anhang 1 zum UVP-G. Im räumlichen Umfeld befanden sich jedoch zahlreiche weitere Vorhaben: eine stillgelegte Baurestmassendeponie, eine stillgelegte Bodenaushubdeponie, ein Sand- und Kiesabbau, zwei Zwischenlager für mineralische Baurestmassen und Betonabbruch sowie eine Verhüttungsanlage. Der VwGH erstreckte seine weite Auslegung der Kumulation nun auch auf die der Einzelfallprüfung vorgelagerte Schwellenwertberechnung: Es sei kein der Kumulation entgegenstehendes Hindernis, dass die Schwellenwerte der umliegenden Vorhaben in unterschiedlichen Maßeinheiten angegeben sind – eine Zusammenrechnung sei vielmehr auch dann möglich, wenn sich die Maßeinheiten unter Ermittlung eines zusätzlichen Faktors, etwa der Dichte eines Materials, umrechnen lassen. Konkret könne etwa beim Sand- und Kiesabbau, dessen Schwellenwert in ha angegeben ist, anhand der Grabungsfläche und Grabungstiefe das Volumen des

Aushubmaterials in m^3 berechnet und so mit dem Schwellenwert der Deponie zusammengerechnet werden.

Durch diese Entwicklung in der Rechtsprechung wurde der Kreis der in eine Kumulationsprüfung einzubeziehenden Vorhaben erheblich erweitert. Für die Abfallwirtschaft bedeutet das: Eine Kumulation kann sich mit Vorhaben unterschiedlichster Sektoren ergeben, und zwar nicht nur bei Neuerrichtungen, sondern regelmäßig auch bei Änderungen und Erweiterungen. Entsprechend ist die bereits bisher nicht triviale Beurteilung, welche Vorhaben in eine Kumulationsprüfung einzubeziehen sind, definitiv nicht einfacher geworden. Eine große Zahl von Vorhabenstypen bleibt allerdings nach wie vor eindeutig nicht miteinander kumulierbar, weil sich deren Maßeinheiten auch unter Einbeziehung eines Umrechnungsfaktors nicht sinnvoll umrechnen lassen. Man denke etwa an Megawatt und Hektoliter oder Verkehrsbelastung und Bettenanzahl.

Zu berücksichtigen ist, dass die Europäische Kommission im April 2024 ein Vertragsverletzungsverfahren gegen Österreich – unter anderem – wegen unzureichender Umsetzung der Kumulationsbestimmungen der UVP-Richtlinie eingeleitet hat. Es verwundert daher nicht, dass der Kumulationstatbestand nach § 3 Abs 2 UVP-G zu den umstrittensten Punkten in den aktuell laufenden Verhandlungen zur UVP-G-Novelle zählt. Angesichts der dynamischen Rechtsprechung des VwGH, des offenen Vertragsverletzungsverfahrens und einer noch ausstehenden Befassung des EuGH dürfte die Rechtsentwicklung in diesem Bereich noch nicht abgeschlossen sein.

3 SCHLUSSFOLGERUNG

Die UVP ist in der Abfallwirtschaft kein Randthema der Projektplanung, sondern eine zentrale Weichenstellung für Standortwahl, Projektzuschnitt und Genehmigungsstrategie. Von der Zuordnung zu den Tatbeständen über die Schwellenwertberechnung bis hin zur Kumulationsprüfung ergeben sich Weichenstellungen, die über Genehmigungsstrategie, Kosten und „Time-to-Permit“ entscheiden. Projektwerber in der Abfallwirtschaft sind daher gut beraten, die UVP-Pflicht frühzeitig und umfassend in ihre Planung einzubeziehen.

Die wesentlichen Praxistipps lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Tatbestandszuordnung und Schwellenwertberechnung sorgfältig vornehmen: Die Prüfung der UVP-Pflicht setzt eine exakte Zuordnung des Vorhabens zu den Tatbeständen und Spalten des Anhang 1 zum UVP-G voraus – bei Neuerrichtungen ebenso wie bei Änderungen und Erweiterungen. Der Blick darf sich dabei nicht auf die abfallwirtschaftlichen Tatbestände der Z 1 bis 3 beschränken: Insbesondere bei komplexen oder multifunktionalen Anlagen ist zu prüfen, ob auch andere Vorhabenskategorien verwirklicht werden. Bei Änderungsvorhaben ist besondere Vorsicht geboten: Hier ist die Summe der innerhalb der letzten fünf Jahre genehmigten Kapazitätsausweitungen heranzuziehen (§ 3a Abs 5 UVP-G). Was für sich genommen unter dem Schwellenwert liegt, kann im Fünf-Jahres-Rückblick die Schwelle überschreiten.
- Kumulationsprüfung proaktiv mitdenken: Der Standort und seine Umgebung sind bereits in der Vorprojektphase systematisch auf kumulationsrelevante Vorhaben zu untersuchen, und zwar über die eigene Branche hinaus.
- Standortwahl als strategische Entscheidung begreifen: Die Wahl des Standorts ist nicht nur eine technische und wirtschaftliche, sondern letztlich auch eine genehmigungsrechtliche Frage. So erhöht ein Standort in der Nähe bestehender Industrie- und Entsorgungsanlagen das Risiko der Kumulationsproblematik, und zwar unabhängig davon, ob das eigene Vorhaben den jeweiligen Schwellenwert des Anhang 1 zum UVP-G für sich genommen erreicht.

- Feststellungsverfahren als Planungsinstrument nutzen: Das Feststellungsverfahren nach § 3 Abs 7 UVP-G schafft Rechtssicherheit und kann – frühzeitig eingeleitet – Überraschungen in späteren Genehmigungsphasen vermeiden. Projektwerber sollten dieses Instrument gezielt einsetzen, gerade wenn die UVP-Pflicht nicht eindeutig ist, etwa bei Schwellenwerten im Grenzbereich oder einer unklaren Kumulationslage.
- Kommunikationsstrategie entwickeln: Projektwerber sollten von Anfang an eine Kommunikationsstrategie mit Behörden, Umweltorganisationen und Nachbarn entwickeln. Frühzeitige Information und Dialog können Konflikte entschärfen und Verfahren beschleunigen.
- Rechtsentwicklung beobachten: Gerade die Rechtsprechung zur Kumulation hat sich in den letzten Jahren erheblich weiterentwickelt. Angesichts des offenen Vertragsverletzungsverfahrens der Europäischen Kommission und der laufenden Verhandlungen zur UVP-G-Novelle ist die Rechtsentwicklung in diesem Bereich noch nicht abgeschlossen. Projektwerber sollten daher nicht nur die aktuelle Rechtslage kennen, sondern auch die Dynamik der Rechtsprechung und Gesetzgebung im Blick behalten.

Zusammengefasst erfordert die UVP in der Abfallwirtschaft eine frühzeitige und vorausschauende Planung. Wer Standortwahl, Projektzuschnitt, mögliche Änderungen und Erweiterungen sowie die Kumulation mit Vorhaben in der Umgebung von Beginn an mitdenkt, kann verlässlicher planen, Genehmigungsrisiken besser einschätzen und den Weg zur Genehmigung beschleunigen.

LITERATURVERZEICHNIS

Bundesgesetz über die Prüfung der Umweltverträglichkeit (Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000 – UVP-G 2000), BGBl. Nr. 697/1993, Wien

Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002), BGBl. I Nr. 102/2002, Wien

Handig, N., Umrechnung bei der Kumulation im UVP-G?, Wirtschaftsrechtliche Blätter 2025, 189, Verlag Österreich, Wien

Schmelz, C., Schwarzer, S. (2024) UVP-G^2, MANZ Verlag, Wien

KONTAKT

RA Christoph Cudlik
c.cudlik@schoenherr.eu
+43 1 53437 50104
Praxisgruppe Regulatory
Schönherr Rechtsanwälte GmbH
www.schoenherr.eu

Auswirkungen der Novellierung der Grenzwerteverordnung für den Verwertungsorientierten Rückbau

Uliana Moroz[1], Arne M. Ragossnig[1] & Simon Muralt[1]
[1)] RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Wien / St. Veit a. d. Glan, Österreich

KURZFASSUNG: Die Recyclingbaustoffverordnung hat unter anderem zum Ziel, durch das Ausschleusen von Schadstoffen die bessere Eignung von Abbruchabfällen für die Herstellung von Recycling-Baustoffen und eine gesteigerte Akzeptanz der Verwendung dieser zu erreichen. In Hinblick auf das Schadstoffpotential ist im verwertungsorientierten Rückbau insbesondere Asbest im Zusammenhang mit dem ArbeitnehmerInnenschutz und die damit verbundenen rechtlichen Vorgaben der Grenzwerteverordnung 2025 relevant. Die Herabsetzung der technischen Richtkonzentration für Asbest auf 10.000 [F/m³] (ab 21. Dezember 2029 2.000 [F/m³]) sowie die Verschärfung der Meldepflicht von Asbestarbeiten stellt hier eine der weitreichendsten regulatorischen Neuerungen der GKV 2025 dar. Dies resultiert in einer deutlichen Ausweitung der betroffenen Berufsgruppen, deren Tätigkeiten von nun an künftig stärker anhand der konkreten Asbestexposition bewertet werden. Ausgehend von der schwer umsetzbaren Ausnahmenregelung, wird auch die Unterschreitung des niedrigeren Grenzwertes für eine Asbestsanierung ohne Schwarzbereich rechtssicher schwer umzusetzen sein. Mit der daraus resultierenden erhöhten Bedeutung messtechnischer Nachweise für verpflichtende Freimessungen, werden sich zwangsläufig auch die finanziellen Relationen verschieben, da neben den eigentlichen Sanierungsaufwendungen, zusätzliche wirtschaftliche Aufwände durch Messdienst- und Gutachterleistungen hinzukommen.

1 EINLEITUNG - SCHNITTSTELLE VERWERTUNGSORIENTIERTER RÜCKBAU UND GRENZWERTEVERORDNUNG

In Österreich bildet die Recyclingbaustoffverordnung (RBV) das rechtliche Fundament für die Sicherstellung eines geordneten und verwertungsorientierten Rückbaus. So definiert die Verordnung konkrete Pflichten bei Abbruchtätigkeiten sowie Vorgaben zur Trennung und Behandlung von Abbruchabfällen, um eine Abfallbewirtschaftung im Sinne der Abfallhierarchie – mit entsprechendem Vorrang des ReUse und der Verwertung vor der Beseitigung – sicherzustellen. Darüber hinaus enthält die RBV Kriterien für die Herstellung und das rechtssichere Abfallende von Recycling-Baustoffen. (BMLFUW, 2016)

Eine weitere zentrale Zielsetzung der RBV besteht darin, neben der Vorbereitung zur Wiederverwendung und dem Recycling von Abbruchabfällen, auch die Schadstoffbelastung anfallender Abfälle zu reduzieren. Durch das systematische Ausschleusen von Schadstoffen kann somit eine bessere Eignung von Abbruchabfällen für die Herstellung von Recycling-Baustoffen erreicht werden. Vorgaben von Qualitätskriterien und Einsatzbereichen tragen zudem zu einer hohen Umweltqualität und einer hohen Akzeptanz für die Verwendung von Recycling-Baustoffen bei.

Den soeben genannten Zielen des verwertungsorientierten Rückbaus stehen jedoch die Schadstoffbelastung historischer Bauprodukte und der damit einhergehende ArbeitnehmerInnenschutz im Zuge der Schadstoffentfrachtung und Rückbautätigkeiten gegenüber. An dieser Schnittstelle greift unter anderem die Grenzwerteverordnung 2025 (GKV, 2025), deren kürzliche Novellierung neue Herausforderungen für den verwertungsorientierten Rückbau mit sich bringt. (BMAW, 2025)

Die Sicherstellung der Erreichung der Ziele der RBV unter Berücksichtigung der Aspekte des ArbeitnehmerInnenschutz erfolgt durch Schad- und Störstofferkundungen, Rückbaukonzepte hinsichtlich Schad- und Störstoffentfernung sowie vorbereitender Maßnahmen zum Rückbau. Ergänzend tragen auch die Bestätigung des Freigabezustands für den maschinellen Abbruch sowie die Sicherstellung der Einhaltung entsprechenden Trennpflichten im Zuge von Rückbaubegleitungen bei. Im Bereich der Schadstoffentfrachtung beziehungsweise von Sanierungsmaßnahmen vor dem verwertungsorientierten Rückbau kommt es zu einer Schnittstelle zwischen dem ArbeitnehmerInnenschutz und dem verwertungsorientierten Rückbau für die die Änderungen der GKV 2025 jedenfalls eine hohe Relevanz haben.

2 ASBEST IM LICHTE DES VERWERTUNGSORIENTIERTEN RÜCKBAUS

In Hinblick auf das Schadstoffpotential, hat im verwertungsorientierten Rückbau insbesondere Asbest im Zusammenhang mit dem ArbeitnehmerInnenschutz und die damit verbundenen rechtlichen Vorgaben der GKV 2025 eine hohe Tragweite. In Österreich untersagte seit 1990 die damals gültige Asbestverordnung – bis auf wenige Ausnahmen – insbesondere im Hochbau die Inverkehrsetzung asbesthaltiger Produkte ab 01. Jänner 1994. Erst seit 01. Jänner 2004 gibt es ein generelles Asbestverbot gem. der Chemikalienverbotsverordnung (ChemVerbotsV, 2003). Somit ist bei rückzubauenden Gebäuden, welche bis in die frühen 1990er-Jahre erbaut wurden, grundsätzlich von der Möglichkeit eines Asbestvorkommen auszugehen. (BMAW, 2025) (UMWELTBUNDESAMT, 2008) (BMLFUW, 2003)

Im Rahmen von Rückbau-, Abbruch- und Sanierungsvorhaben zeigt die Praxis, dass vor allem Asbest besonders im Fokus von Schadstoffsanierungen steht. Auch wenn in Gebäuden aus den entsprechenden Baujahrzehnten grundsätzlich das gesamte Spektrum an eingebauten asbesthaltigen Bauteilen weitaus größer und vielfältiger sein kann, konzentrieren sich erfahrungsgemäß – in Abhängigkeit von der Bauweise, Gebäudefunktion und Nutzungshistorie sowie bauliche Modifikationen im Laufe der Zeit – die Asbestvorkommen auf folgende Bauteile:

- Fliesenkleber,
- Kunststoffbodenbeläge (Cushion Vinyl, Floor Flex),
- Asbestzementhaltige Kleinbauteile in Stahlbetonbauten wie Abstandshalter und verlorene Schalungen,
- Spritzasbest,
- Faserzementplatten (wie Fassaden- und Dachdeckung),
- Haustechnik (wie Brandschotts, Flanschdichtungen etc.),
- Fugenkitt,
- Dichtschnüre und
- Speicherheizgeräte.

Ergänzend anzumerken ist, dass sich der Rückbau asbesthaltiger Bauprodukte je nach ursprünglichem Anwendungsbereich und Einbauart unterschiedlich auswirkt. So stellt im Lichte des verwertungsorientierten Rückbaus ein asbesthaltiger Fliesenkleber auf einer Ziegelwand eine größere Herausforderung dar als der Ausbau von Bauteilen wie asbesthaltigen Nachtspeicherheizgeräten oder Dichtschnüren an Ofentüren. Neuerdings rücken auch Gipsplattenabfälle in den Fokus fachlicher Diskussionen, da die verwendeten Spachtelmassen potenziell asbesthaltig sein können (RAGOSSNIG, 2026). Vor allem ist dies bei Rückbau- oder Sanierungsvorhaben von Trockenbauwänden, Vorsatzschalen oder abgehängten Decken zu bedenken.

Um die Qualität von Recycling-Baustoffen und eine sichere Entsorgung von Abbruchabfällen zu gewährleisten, gibt das österreichische Abfallrecht sowohl stoffliche Qualitätsziele als auch konkrete Handlungsanleitungen für den Umgang mit Asbest vor. So stellt Asbest eine der in § 7 (1) RBV angeführten Verunreinigungen dar, welche in Ausgangsprodukten für die Herstellung von Recyclingbaustoffen „weitgehendst zu vermeiden“ ist, da ansonsten ein Recyclingverbot für die

Herstellung von Recycling-Baustoffen aus den jeweiligen grundsätzlich dafür zugelassenen Abfällen besteht. (BMLFUW, 2016)

Auch der Bundesabfallwirtschaftsplan 2023 (BAWP 2023) beinhaltet spezifische, rückbaurelevante Vorgaben zum Umgang von asbesthaltigen Abfällen. In diesem Rahmen legt der BAWP 2023 Trennvorgaben (gemäß Trennschema) sowie Recyclingverbote für Bauschutt oder Beton fest, welche durch asbesthaltigen Abstandshaltern oder auch asbesthaltige Putze, Spachtelmassen und Fliesenkleber (PSF) kontaminiert sind. (BMK, 2023)

Unabhängig von der Art des asbesthaltigen Bauprodukts, steht der ArbeitnehmerInnenschutz beim Umgang mit Asbest bei allen Rückbaumaßnahmen gleichermaßen im Mittelpunkt. Die maßgebliche Rechtsvorschrift hierfür stellt die GKV 2025 dar. Insbesondere für den Bereich des Umgangs mit asbesthaltigen Fliesenklebern und Kunststoffbelägen sowie Rohren aus Asbestzement im Rahmen des verwertungsorientierten Rückbaus erscheinen die gegenständlichen Änderungen der GKV 2025 von hoher Relevanz.

3 NEUERUNGERN DER GKV 2025

Die GKV 2025 regelt eigens im 4. Abschnitt (§21 bis §27) Sonderbestimmungen für Asbest, wobei sich die für den verwertungsorientierten Rückbau wesentlichen Neuerungen hauptsächlich aus §22 „Meldung von Asbestarbeiten“ ergeben. Darüber hinaus stellt die Herabsetzung der technischen Richtkonzentration (TRK) für Asbest eine der weitreichendsten regulatorischen Neuerungen der GKV 2025 dar: Seit 31. Dezember 2025 gilt der neue Grenzwert (TMW) von 10.000 [F/m³] (ab 21. Dezember 2029 dann 2.000 [F/m³]) anstatt den vormals geltenden 100.000 [F/m³]. (BMAW, 2025)

Mit der Novellierung wird auch der vormals in Absatz 2 des §22 GKV 2024 definierte Grenzwert von 15.000 [F/m³] für „gelegentlichen Expositionen geringer Höhe“ hinfällig. Im Zuge dessen entfallen auch die dort taxativ angeführten Tätigkeiten, bei denen – unter bestimmten Voraussetzungen – ebendieser Grenzwert als eingehalten angesehen wurde, weswegen eine Ausnahme von der Meldung von Asbestarbeiten galt. Insbesondere für die nachfolgend angeführten Tätigkeiten ändert sich nun die rechtliche Situation grundlegend, da eine Meldung derartiger Arbeiten an das zuständige Arbeitsinspektorat erforderlich und die Einhaltung des TRK-Wertes auch entsprechend nachzuweisen ist:

> „*4. Ausbau, insbesondere von Dichtschnüren von Standardheizkesseln, von asbesthältigem Material aus Elektrospeicherheizgeräten, von asbesthaltigen Flachdichtungen, von asbesthaltigem Material bei Pumpen, Schiebern und sonstigen Armaturen, von asbesthaltigen Kupplungsscheiben, Scheibenbremsbelägen, Trommelbremsbelägen bei Kraftfahrzeugen sowie von Fensterrahmen und Türen mit asbesthaltigem Fugenkitt,*
> *5. zerstörungsfreier Ausbau von Asbestzement-Rohrleitungen, sowie*
> *6. Entfernen von einzelnen Asbestzement-Platten sowie von Vinyl-Asbestplatten (Flexplatten).*“ (BMAW, 2024)

Obwohl die Gesetzgebung mit §22 (4) GKV 2025 weiterhin eine Ausnahmeregelung bei „gelegentlichen Exposition geringer Höhe“ zulässt, verschärfen sich die Rahmenbedingungen in der Praxis erheblich, da nun der zuvor erwähnte strengere TRK-Grenzwert (TMW) von 10.000 [F/m³] verbindlich heranzuziehen ist. Weitere zentrale Neuerungen der GKV 2025 sind neben der Ermächtigung von ArbeitgeberInnen für Abbruch- oder Asbestsanierungsarbeiten (§26 GKV 2025), die Schaffung eines eigenständigen Unterweisungsregimes (§ 25a GKV 2025) sowie erweiterte Meldepflichten (§22 (1) GKV 2025). (BMAW, 2025)

4 AUSWIRKUNGEN AUF DIE PRAXIS

Hinsichtlich der in §22 (4) GKV 2025 verankerten Ausnahmeregelung für „gelegentlichen Expositionen geringer Höhe“ ist anzumerken, dass die GKV 2025 selbst weder auf die Begriffe „gelegentlich“ sowie „gelegentliche Exposition“ näher eingeht. Zur präzisen Auslegung müssen daher die offiziellen Erläuterungen des Arbeitsinspektorats sowie der AUVA herangezogen werden. Demnach umfasst der Ausdruck „gelegentlich“ „*Tätigkeiten mit Asbest, die nicht regelmäßig durchgeführt werden und deren Zweck nicht ausschließlich auf den Umgang mit Asbest ausgerichtet ist“*. (ARBEITSINSPEKTORAT, 2026)

Darüber hinaus konkretisiert die AUVA eine „gelegentliche Exposition“ zeitliche Tätigkeit, welche nur vorliegt, wenn diese maximal zwei Tage pro Monat, an nicht aufeinanderfolgenden Tagen und maximal 20 Tage pro Jahr durchgeführt wird. (AUVA, 2026)

Unter Berücksichtigung dieses Sachverhalts zeigt sich deutlich, dass diese Ausnahme für Arbeiten und Tätigkeiten im Zuge eines verwertungsorientierten Rückbaus von asbestbelasteten Gebäudebestand, nicht oder nur sehr schwer herangezogen werden kann, da diese häufig auftreten oder nicht eindeutig als kurzzeitig und gelegentlich einzuordnen sind. Auch die angeführten von der Ausnahmeregelung betroffenen Arbeitsvorgänge (§22 (4) GKV 2025), wie „*kurze, nicht aufeinander folgende Wartungsarbeiten, bei denen nur an nicht brüchigen Materialien gearbeitet wird*“ sowie die „*Entfernung von unbeschädigten Materialien, in denen die Asbestfasern fest in einer Matrix gebunden sind, wobei diese Materialien nicht beschädigt werden*“ lassen sich schwer mit der üblichen Ausgestaltung solcher Tätigkeiten im Zuge eines verwertungsorientierten Rückbaus vereinen. (BMAW, 2025)

Die Anwendung der als Ausnahmeregelung ausgelegten „gelegentlichen“ Arbeiten bei „gelegentlicher Exposition geringer Höhe“ wird jedenfalls durch den strengeren Grenzwert, aber zusätzlich auch durch den Wegfall der im Rückbau und Sanierung relevanten, vormals aufgezählten Tätigkeiten für Ausnahmen der Meldepflicht verschärft. Während früher bestimmte Tätigkeiten aufgrund der gesetzlichen Aufzählung eher pauschal als gering exponierend kategorisiert werden konnten, verlangt die neue Rechtslage eine differenzierte Einzelfallbewertung. Jede Tätigkeit muss nun individuell auf ihr tatsächliches Gefährdungspotenzial hin überprüft werden.

In der Praxis wird das Ausmaß der tatsächlichen Freisetzung von Asbestfasern an die Umgebung nicht ausschließlich von der Art und dem Maß der Asbestverunreinigung des asbestkontaminierten Bauprodukts bestimmt. Neben den materialbedingten Ausgangsfaktoren wird die Faserfreisetzung auch maßgeblich von der konkreten Vorgehensweise im Zuge der Sanierungs- und Rückbaumaßnahmen beeinflusst. So lässt sich die Intensität der Faserfreisetzung durch die Wahl der Arbeitsverfahren und die Handhabung des anfallenden Asbestabfalls maßgeblich steuern und minimieren (beispielsweise durch eine sorgsame und staubarme Entfernung, Befeuchtungsmaßnahmen sowie vorsichtiges Befüllen des Big Bags). Die Exposition der in den Rückbau involvierten Personen kann darüber hinaus durch den konsequenten Einsatz von weitergehenden Schutzmaßnahmen (Schwarzbereiche, Unterdruckhaltung, persönliche Schutzausrüstung) weitergehend reduziert werden.

Wo früher mithilfe von Testmessungen – beispielsweise bei Sanierung von asbesthaltigen Fliesenklebern – eine Asbestsanierung ohne Schwarzbereich unter Anwendung der alten Ausnahmeregelung möglich war, ist es nun deutlich schwerer dies unter Berücksichtigung der rechtlichen Neuerungen in der Praxis rechtssicher umsetzen (eine Hürde, die sich mit dem ab 21. Dezember 2029 geltenden Grenzwert von 2.000 [F/m³] nochmals verschärfen wird). ArbeitgeberInnen müssen nun belastbar begründen, warum eine Tätigkeit nicht meldepflichtig und warum keine Überschreitung des TRK-Wertes zu erwarten ist. Folglich wird die nachweisorientierte Gefährdungsbeurteilung zunehmend an Bedeutung gewinnen. Aufgrund der schwer umsetzbaren Ausnahmenregelung und dem Bestreben Rechtssicherheit zu erreichen, ist davon auszugehen,

dass sich der Fokus künftig auf die standardmäßige Einrichtung eines Schwarzbereichs und den damit erforderlichen verpflichtenden Freimessungen verlagert. Dadurch verschieben sich auch die finanziellen Relationen, da der Aufwand für gutachterliche Tätigkeiten bei kleineren Sanierungsbereichen womöglich die eigentlichen Kosten der Schadstoffsanierung übersteigt.

5 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Gegenüberstellung der GKV 2024 mit der novellierten Fassung der GKV 2025 verdeutlicht, dass die Änderungen im Asbestabschnitt weit über eine technische Anpassung an die Richtlinie (EU) 2023/2668 hinausgehen. Zusätzlich bewirken nämlich diese Neuerungen eine deutliche praktische Ausweitung der arbeitsschutzrechtlichen Anforderungen und verfolgen somit einen eigenständigen, vorsorgeorientierten Ansatz. (BMAW, 2024) (BMAW, 2025)

Insbesondere die Neuerungen gem. §22 GKV 2025 bezüglich der Absenkung des Grenzwerts auf 10.000 [F/m³] und der Wegfall der alten Tätigkeitsliste in Kombination mit der zeitlichen Begrenzung der gelegentlichen Exposition resultieren in einer deutlichen Ausweitung der betroffenen Berufsgruppen. Damit verschiebt sich die Asbestproblematik aus dem Bereich spezialisierter Sanierungsfirmen hin zu einer umfassenderen Verantwortung für eine weitaus größere Anzahl an Betriebe, welche im Gebäudebestand, bei Instandhaltung, Reparatur, Entsorgung oder Deponierung aber vor allem im Zuge des verwertungsorientierten Rückbaus mit asbesthaltigen Materialien in Berührung kommen können. Die erweiterten Meldepflichten (§22 GKV 2025) sowie die neu geforderte Gefahrenermittlung und -beurteilung bezüglich Asbest durch ArbeitgeberInnen (§22a Abs. 1 GKV 2025) führen – unabhängig von den Vorgaben der RBV – zu einer stärkeren Bedeutung von Schad- und Störstofferkundungen bezüglich der Identifikation von Asbestvorkommen. (BMAW, 2025)

Durch den Wegfall der aufgelisteten Tätigkeiten im Rahmen der alten Ausnahmeregelungen für die Meldepflicht, müssen diese künftig stärker anhand der konkreten Expositionssituation bewertet werden. Zudem wird auch die Unterschreitung des bestehenden niedrigeren – sowie zukünftig noch strengeren – Grenzwertes für eine Sanierung ohne Schwarzbereich rechtssicher schwer umzusetzen sein. Somit erhöht sich die Bedeutung messtechnischer Nachweise, was zwangsläufig – neben den eigentlichen Sanierungsaufwendungen – zu einem zusätzlichen wirtschaftlichen Aufwand durch Messdienst- und Gutachterleistungen führt.

LITERATURVERZEICHNIS

AUVA (2026). Umgang mit starkgebundenem Asbest (GKV 31.12.2025) - Wichtige Inhalte der Verordnung und Handlungsbedarf für Unternehmen. Abgerufen am 02. 07. 2026 von https://www.wko.at/stmk/gewerbe-handwerk/dachdecker-glaser-spengler/corr-guv-infoblatt-a4-hoch-extern-final-270326.pdf.

BUNDESMINISTERIUM FÜR ARBEIT, SOZIALES, GESUNDHEIT, PFLEGE UND KONSUMENTENSCHUTZ SEKTION AR-BEITSRECHT UND ZENTRAL-ARBEITSINSPEKTORAT (2026). Kommentierte Grenzwerteverordnung - (GKV-Novelle 2025) (letzte Änderung am: 19.06.2026). Abgerufen am 20. 06. 2026 von www.arbeitsinspektion.gv.at/Arbeitsstoffe/Grenzwerte/Kommentierte_Grenzwerteverordnung.html.

BUNDESMINISTER FÜR ARBEIT UND WIRTSCHAFT (BMAW) (2024). Änderung der Grenzwerteverordnung 2021, BGBl. II Nr. 330/2024. Wien.

BUNDESMINISTER FÜR ARBEIT UND WIRTSCHAFT (BMAW) (2025). Grenzwerte für Arbeitsstoffe sowie über gefährliche Arbeitsstoffe (Grenzwerteverordnung 2025 – GKV), StF: BGBl. Nr. 253/2001 i.d.g.F.

BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE (BMK) (2023). Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023 Teil 1. Wien.

BUNDESMINISTER FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (BMLFUW) (2003). Verordnung über weitere Verbote und Beschränkungen bestimmter gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Fertigwaren (Chemikalien-Verbotsverordnung 2003 – Chem-VerbotsV 2003), StF: BGBl. II Nr. 477/2003, i. d. g. F. Wien.

BUNDESMINISTER FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (BMLFUW) (2016). Verordnung über die Pflichten bei Bau- u. Abbruchtätigkeitendie Trennung und die Behandlung von bei Bau- und Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen, die Herstellung und das Abfallende von Recycling-Baustoffen (RBV), StF: BGBl. II Nr. 290/2016, i.d.g.F. Wien.

RAGOSSNIG, A. (2026). Beurteilung von Gipskartonabfällen im Zusammenhang mit dem Deponierungsverbot – ein erster Erfahrungsbericht. In Montanuniversität Leoben (Hrsg.), Konferenzband zur 18. Recy & DepoTech-Konferenz, Leoben.

UMWELTBUNDESAMT (2008). Reisinger, H.; Domenig, M. & Doujak, K.: Asbest – Materialien zur Abfallwirtschaft. Reports, Bd. REP-0177. Klagenfurt.

KONTAKT

DI Uliana Moroz
moroz@umweltkonsulenten.at
+43 1 349 10 10 13 / +43 664 883 08 174
Fachbereichsleitung Verwertungsorientierter Rückbau
RM Umweltkonsulenten ZT GmbH
https://umweltkonsulenten.at/

Ökomodulation und Recyclingfähigkeit im österreichischen Einwegpfandsystem – Kreislaufwirtschaft von der Theorie in die Praxis

Monika Fiala[1], Katharina Reuck[2] & Stephan Kern[3]
[1)] EWP Recycling Pfand Österreich gGmbH, Geschäftsführung, Wien, Österreich
[2)] EWP Recycling Pfand Österreich gGmbH, Audit & Quality M., Wien, Österreich
[3)] wpa Beratende Ingenieure GmbH, Geschäftsführer/Projektleitung, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die zentrale Stelle des österreichischen Einwegpfandsystems (EWP) muss die Produzentenbeiträge nach § 10 Abs. 2 Pfandverordnung ökologisch differenzieren; unionsrechtlich folgt das Gebot aus Art. 8a Abs. 4 lit. b der Richtlinie 2008/98/EG und Art. 6 Abs. 8 PPWR (Verordnung (EU) 2025/40), deren delegierte Rechtsakte erst bis 2028 erwartet werden. Jede registrierte Gebindeart wird je Bestandteil (Hauptkörper, Verschluss, Etikett) anhand messbarer Parameter in den Dimensionen Sortierung, Recycling at Scale und technisches Recycling bewertet. Den Maßstab bilden die gemessene Leistungsfähigkeit der zentralen Sortieranlage und die EN 18120, ergänzt um eine volumensklassenspezifische Materialeinsatz-Benchmark. Aus der massengewichteten Gesamtbewertung folgt eine Performanceklasse (A–D), die einen Zuschlag auf die Producer Fee bewirkt und somit recyclinggerechtes Design anreizt.

1 RAHMEN UND ZIELE DES ÖSTERREICHISCHEN EINWEG-PFANDSYSTEMS

Das österreichische Einweg-Pfandsystem umfasst Einwegkunststoffflaschen sowie Getränkedosen und dient der Erreichung hoher Sammelquoten sowie der Bereitstellung hochwertiger Recyclingmaterialien. Die Ziele des Einwegpfandsystems sind in der Pfandverordnung für Einweggetränkeverpackungen (PfandVO) klar festgelegt:

- das Erreichen der Sammelziele: mindestens 80% 2025 / min. 90% ab inkl. 2027,
- ein qualitativ hochwertiges Recycling von Verpackungsabfällen,
- der Wiedereinsatz von Kunststoff- und Metallrecyclaten in Getränkegebinden und
- die Vermeidung des Litterings von Einweggetränkeverpackungen aus Kunststoff und Metall.

Die Organisation Recycling Pfand Österreich gGmbH ist als zentrale Stelle für die organisatorische und operative Umsetzung dieses Systems verantwortlich. Zu ihren wesentlichen Aufgaben zählen das Pfand Clearing, die Koordination der Rücknahme, die Steuerung der Logistik- und Sortierprozesse sowie die Sicherstellung des Recyclingstroms.
Ein zentrales Ziel des Systems ist das hochwertige Recycling von Kunststoffflaschen, insbesondere die Ermöglichung von Bottle-to-Bottle-Recycling. Durch die getrennte Sammlung im Pfandsystem entstehen hochwertige, sortenreine Materialströme, die für die Herstellung neuer Getränkeverpackungen geeignet sind.
Zusätzlich wurde im österreichischen Pfandsystem eine Ökomodulation der Produzentenbeiträge (Producer Fee) eingeführt. Dabei werden alle im Pfandkreislauf befindlichen Verpackungen nach ihrer Recyclingfähigkeit bewertet und entsprechend eingestuft. Verpackungen mit geringer Recyclingfähigkeit führen zu einem Zuschlag auf die Produzentengebühr. So werden Anreize für Hersteller zur Verbesserung der Recyclingfähigkeit der Verpackungen geschaffen.

2 ÖKOMODULATION - RECHTLICHE EINORDNUNG

Nach Art. 8a Abs. 4 lit. b der Richtlinie 2008/98/EG idF (EU) 2018/851 sind Herstellerbeiträge in EPR-Regimen nach Möglichkeit produktgruppenbezogen und insbesondere nach Rezyklierbarkeit zu modulieren. Die ab 12.08.2026 anwendbare PPWR (Verordnung (EU) 2025/40) konkretisiert dies: Art. 6 iVm Anhang II führt Leistungsstufen ein (A ≥ 95 %, B ≥ 80 %, C ≥ 70 %); darunterliegende Verpackungen dürfen ab 01.01.2030 nicht mehr in Verkehr gebracht werden. Die

Gestaltungskriterien legt die Kommission nach Art. 6 Abs. 4 bis 01.01.2028 in delegierten Rechtsakten fest; nach Art. 6 Abs. 8 sind die Beiträge 18 Monate danach entsprechend zu modulieren. National wurde das Einwegpfand mit § 14c AWG 2002 eingeführt und durch die Pfandverordnung (BGBl. II Nr. 283/2023) ausgestaltet. Nach § 10 Abs. 2 letzter Satz PfandVO ist „eine Differenzierung der Produzentenbeiträge nach ökologischen Gesichtspunkten vorzunehmen"; ein negativer Beitrag ist nach § 10 Abs. 3 unzulässig. § 22 PfandVO schafft dazu auch schon die Datenbasis. Erstinverkehrsetzer sind verpflichtet jedes Gebinde mit Angaben zu Material, Abmessungen, Füllvolumen, Gewicht, Materialdicke und Farbe zu registrieren, sowie ein Muster zu übermitteln.

3 DAS MODELL

Bestehende Leitlinien zur recyclinggerechten Gestaltung beschreiben meist ein Stufenmodell. Bewertet werden die Möglichkeit der getrennten Erfassung im Sammelsystem, Erkennbarkeit der Sammelzuordnung für KonsumentInnen, Sortierbarkeit und Recyclierbarkeit (FH Campus Wien & Circular Analytics, 2024). Im Einwegpfandsystem sind die ersten beiden Stufen systembedingt erfüllt (Kennzeichnung und getrennte Erfassung nach § 6 PfandVO). Im Modell werden die beiden Stufen Sortierbarkeit und Recyclierbarkeit unter „Recyclingfähigkeit" bzw. „Verwertbarkeit" zusammengefasst (Abb.1). Das Kriterium wird unterteilt in die Prozessschritte Sortierbarkeit, Recycling at Scale und technische Recyclierbarkeit. Die Bewertung erfolgt je Gebinde auf Ebene der Bestandteile (Hauptkörper, Verschluss, Etikett) und angelehnt an die in der EN 18120 genannten Eigenschaften, grundsätzlich dreistufig (1,0 = keine Auswirkung auf den Prozessschritt; 0,5 = den Prozessschritt behindernd; 0 = den Prozessschritt verhindernd). Anlagenabhängige Parameter aus Messdaten werden mit Werten von 1 - 0 bewertet. Zusätzlich fließt der Materialeinsatz (BMLUK, 2022) je Gebinde ein.

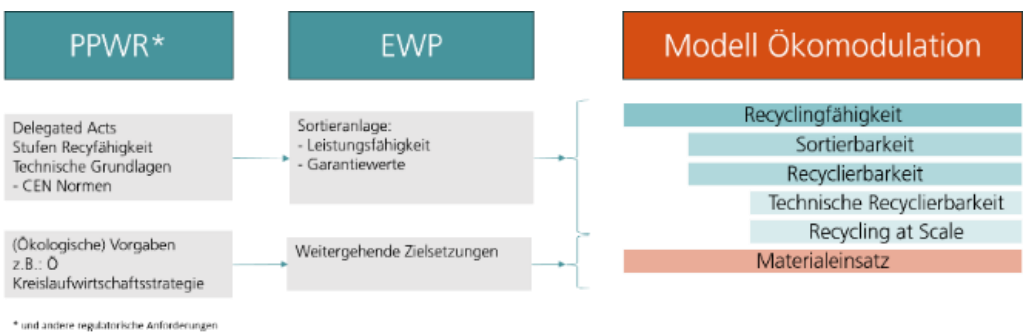


Abb. 1: Modell zur Ökomodulation im österreichischen Einwegpfandsystem (eigene Darstellung).

3.1 Recyclingfähigkeit

Die Recyclingfähigkeit $V_{Bestandteil}$ eines Bestandteils ergibt sich aus dem Zusammenwirken von Sortierung, Recycling at Scale und technischem Recycling. Die Bewertungen werden je Schritt multiplikativ verknüpft, sodass eine negative Bewertung nicht kompensierbar ist.
Abb. 2 zeigt die Zusammenhänge beispielhaft.

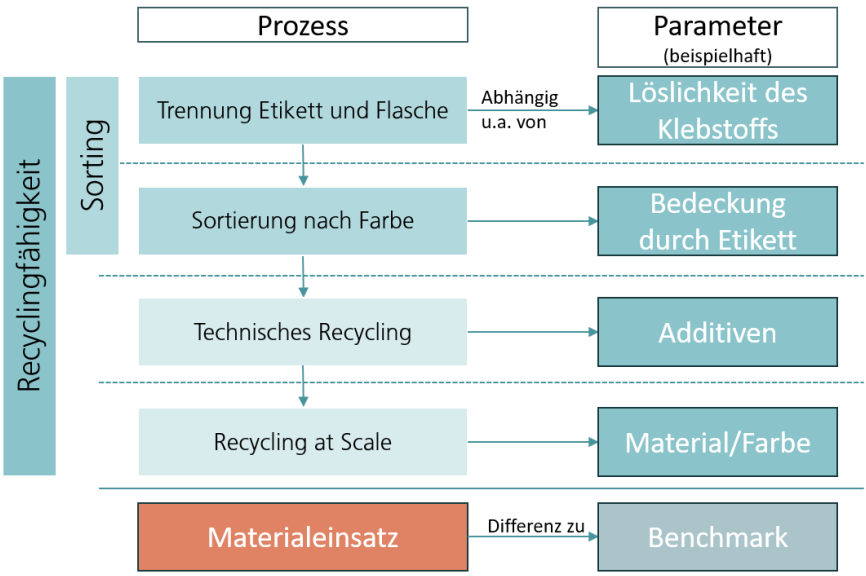


Abb. 2: Vereinfachte, beispielhafte Darstellung der Verwertungslogik (eigene Darstellung).

3.1.1 Sortierbarkeit

Den Maßstab für die Sortierbarkeit bilden nicht nur theoretische Referenzwerte, sondern die Eigenschaften der zentralen Sortieranlage der Recyclingpfand Österreich GmbH in Müllendorf (Burgenland). Relevant sind v. a. Parameter, die die Erkennung im NIR beeinflussen: Etiketten-Bedeckungsgrad, Farbe, metallisierte Materialien und Etiketten-Ablösbarkeit.

3.1.1.1 Einfluss des Etiketts auf die Sortierbarkeit und Wirksamkeit des Delabelers

Die meisten bekannten Modelle zur Bewertung der Recyclingfähigkeit stufen großflächige Sleeves und Etiketten mit Bedeckungsgrad >50 % (≤500 ml) bzw. >70 % (>500 ml) bei Flaschen als negativ für die Sortierung oder „zu prüfen“ ein (CEN, 2026), (FH Campus Wien & Circular Analytics TK GmbH, 2024), (Stiftung Zentrale Stelle , 2026). Die EWP-Sortieranlage in Müllendorf setzt daher ein Gerät zur Etikettenentfernung („Delabeler“) ein. Dieser „Delabeler“ befindet sich in der Anlage nach der NE/FE-Abscheidung und vor der NIR-Farbsortierung.
Um die spezifischen Eigenschaften der zentralen Sortieranlage, entsprechend zu berücksichtigen, wurde die Funktionsfähigkeit des Delabelers in Zusammenarbeit mit einem Team der Montanuniversität Leoben ermittelt. Der Test wurde nach Abschluss des 1. Quartals 2026 durchgeführt, da zu diesem Zeitpunkt erstmals repräsentative Massenströme aus dem Normalbetrieb der Anlage vorlagen.
Im Test wurde die Wahrscheinlichkeit W_k (1), dass eine Flasche einer bestimmten Volumensklasse (A < 500 ml, B = 500 ml, C > 500 ml) wegen hohen Bedeckungsgrades (>50 %) – und damit gestörter NIR-Erkennung – fälschlich der Fraktion „PET bunt“ zugeordnet wird, ermittelt.

$$Wk = Sk/Pk \quad (1)$$

W_k (1) ist der Quotient aus der je Volumensklasse falsch in die Buntfraktion gelangten Stückzahl S_k und der insgesamt zurückgenommenen Stückzahl P_k derselben Klasse.

- Grundgesamtheit der Rücknahme P_k
  Da alle retournierten Gebinde zentral in Müllendorf sortiert werden, entspricht die durchschnittliche Zusammensetzung des Inputstroms in die Sortieranlage den Informationen aus den Rücknahmedaten. Der größte Anteil der Gebinde mit Bedeckungsgrad >50 % entfällt auf die Klasse B. Nur etwa 10 % entfallen auf Klasse A und C. Aus den Rücknahmedaten wurde zudem das gewichtete Durchschnittsgewicht dieser Gebinde $M_{Bottlegew}$ ermittelt.
- Sortiertest und Ermittlung der falsch zugeordneten Flaschen S_k
  Im Sortiertest wurden ~ 5700 Gebinde aus mehreren Proben der Fraktion „PET bunt" sortiert. 46 % der sortierten Flaschen wurden ohne Etikett vorgefunden und waren korrekt in die Fraktion „PET bunt" sortiert. Etwa die Hälfte der sortieren Gebinde (48%) entfielen auf die Volumensklasse A und waren auch nach durchlaufen des „Delabelers" noch zu mehr als 50% mit einem Etikett bedeckt. Die restlichen 6 % waren den Volumensklassen ≥ 500 ml mit Bedeckungsgrad >50 % (B,C) zuzuordnen. In dem sortierten Material wurden keine Gebinde mit einem Bedeckungsgrad <50 % gefunden, die nicht der Fraktion „PET bunt" entsprachen.

Aus diesen Anteilen $VK_{\textit{-Anteil}}$ wurden die zu erwartenden Stückzahlen im Sortieroutput „PET bunt" S_k nach Formel (2) ermittelt. Dazu wird der Massenanteil an der „PET bunt"-Gesamtmasse des Sortieroutputs Q1 2026 ($M_{PETbuntSort}$) je Volumensklasse VK errechnet und durch die gewichtete Durchschnittsmasse der Einzelflaschen $M_{Bottlegew}$. dividiert.

$$S_k = (M_{PETbuntSort} * VK_{\text{-Anteil}}) / M_{Bottlegew} \quad (2)$$

- Ergebnisse
  Die so ermittelte Anzahl im Sortieroutput „PET bunt" wurde der tatsächlich zurückgenommenen Anzahl an Gebinden mit Etikettenbedeckungsgrad >50 % gegenübergestellt; daraus ergibt sich je Volumensklasse die Fehlzuordnungs-Wahrscheinlichkeit W_k (Tab. 1).

Tab. 1: Wahrscheinlichkeit einer falschen Zuordnung von Flaschen mit einem Bedeckungsgrad >50 % je Volumensklasse und Berücksichtigung im Bewertungsmodell

Volumensklasse	W_k
A < 500 ml	22,87 %
B = 500 ml	0,18 %
C > 500 ml	1,48 %

Im Bewertungsmodell wurden diese Werte als Einflussfaktor der Etikettengröße in Abhängigkeit vom Volumen $E_{\textit{i-Etikettengröße}}$ näherungsweise gem. Formel (3) berücksichtigt.

$$E_{i\text{-Etikettengröße}} \sim (1 - W_k) \quad (3)$$

3.1.2 Recyclierbarkeit

Die technische Recyclierbarkeit wird anhand von Sekundärrohstoff-Spezifikationen beurteilt. Dabei maßgeblich sind Additive, Klebemittel, Barrieren, Beschichtungen und Druckfarben. So verändern UV-Blocker etwa die PET-Viskosität während der Schmelze und mindern die Verarbeitungsqualität. Im Dosenrecycling verursachen PVC-Etiketten beispielsweise Komplikationen in der Schmelze.

3.1.3 Recycling at Scale

Mit „Recycling at Scale" (RaS) wurde eine dritte Bewertungsebene eingeführt: Anhand von Materialart und Farbe wird bewertet, ob für den entstehenden Sekundärrohstoff eine gleichwertige

Einsatzmöglichkeit am Markt besteht. Opake oder nicht den Zielfarben transparent, transparent (hell-)blau und transparent (hell-)grün entsprechende PET-Gebinde, sowie Getränkeverpackungen aus anderen Kunststoffen als PET gelten als RaS-negativ, da in Österreich kaum Bedarf an solchen Sekundärmaterialien für Lebensmittelkontaktverpackungen besteht.

3.2 Materialeinsatz

Der Materialeinsatz Mat_E jedes einzelnen Gebindes wird gegen eine Benchmark bewertet. Die Benchmark wird dabei für jedes Material und jedes Volumen aus der Gesamtmasse der anderen im System registrieren Gebinde berechnet. Die Abweichung folgt Gleichung (4); Unterschreitungen werden mit null bewertet, da das Model nur Zuschläge auf die Producer Fee ermittelt und negative Beträge gem. § 10 Abs. 3 PfandVO ausgeschlossen werden.

$$Mat_E = (Mat_{Ist} - Mat_{Bench}) / Mat_{Bench} \quad (4)$$

3.3 Gesamtbewertung

Die Bestandteilsbewertungen werden massenanteilig gewichtet und summiert. Diese Summe bildet den Verwertbarkeitsfaktor $V_{Verpackung}$ (5). Daraus ergibt sich die kombinierte Bewertung B nach Gleichung (6) für die gesamte Verpackung.

$$V_{Verpackung} = \Sigma\, m_i * (S_i * RaS_i * R_i) \quad (5)$$

$$B = g_V * V_{Verpackung} + g_M * (1 - Mat_E) \quad (6)$$

Die Recyclingfähigkeit der Verpackung $V_{Verpackung}$ fließt mit einem Gewichtungs-Faktor von g_V = 0,7 in die Kalkulation der Gesamtbewertung B ein. Der Materialeinsatz Mat_E wird mit dem Faktor g_M = 0,3 berücksichtigt. B teilt jede Verpackung in eine Performanceklasse in Anlehnung an Anhang II PPWR ein. Die festgelegten Performanceklassen weichen bei Klasse A (0,90 statt 0,95) bewusst von der Einteilung in der PPWR ab. Der daraus resultierende Zuschlag wird auf die Basis-Producer-Fee aufgeschlagen (Tab. 2).

Tab. 2: Performanceklassen und Zuschläge auf die Producer Fee (EWP, 2026)

Performanceklasse	Kombinierte Bewertung B	Zuschlag auf die Producer Fee
A	≥ 0,90	0 %
B	≥ 0,80 bis < 0,90	10 %
C	≥ 0,70 bis < 0,80	30 %
D	< 0,70	60 %

4 BERECHNUNGSMODELL UND UMSETZUNG IN DIE PRAXIS

Das Modell zur Berechnung der Ökomodulation ist als Kalkulationstool umgesetzt, welches direkt im EWP-Portal integriert ist und ein zentrales Element der Zulassung der Produkte zum Pfandsystem ist. Jeder Erstinverkehrsetzer ist verpflichtet alle abgefragten Spezifikationen seiner Gebinde anzugeben. Zu den Bewertungskriterien zählen Material, Füllvolumen und Einzelgewichte der jeweiligen Bestandteile, sowie die Farbe und die Abmessungen der Verpackung. Ergänzend werden auch Eigenschaften von Etikett, Klebstoff, Barriere und Verschluss abgefragt. Abgeleitete Größen, wie beispielsweise der Bedeckungsgrad, werden auf Basis dieser Eingaben automatisch berechnet.

Ein hinterlegtes Parameterset übernimmt anschließend die Zuordnung der erfassten Eigenschaften zu den jeweiligen Kompatibilitätsstufen. Gleichzeitig wird jeder Parameter jenem Prozessschritt zugeordnet (Sortierung, Recycling at Scale, techn. Recycling), der beeinflusst wird.
Als Ergebnis werden dem Erstinverkehrsetzer die Recyclingfähigkeit V je Bestandteil, die Abweichung vom Benchmark des Materialeinsatzes Mat_E, die Gesamtbewertung B, die daraus resultierende Performanceklasse, sowie die zugehörige Producer Fee einschließlich etwaiger Zuschläge detailliert ausgewiesen. Dadurch haben Erstinverkehrsetzer die Möglichkeit, nachvollziehbar zu erkennen, welche produktspezifischen Parameter die Bewertung beeinflussen, und wie die Recyclingfähigkeit gezielt verbessert werden kann. Damit ist die EWP die erste Institution in Österreich, die eine Ökomodulation nach ökologischen Kriterien nicht nur konzipiert, sondern auch eigenständig anwendet und durchführt.

5 KONTROLLKONZEPT

Das implementierte Kontrollkonzept umfasst die Verifizierung, der von den Produzenten bereitgestellten Daten, die für die Bewertung der Recyclingfähigkeit herangezogen werden. Die zugrunde liegenden Methoden wurden gemeinsam mit der Montanuniversität Leoben entwickelt. Somit ist jedes Bewertungskritierium, das zur Berechnung der Recyclingfähigkeit herangezogen wird, überprüf- und messbar.

6 FAZIT

Die Pflicht zur Ökomodulation der Produzentenbeiträge ist mit § 10 Abs. 2 PfandVO geltendes Recht; die unionsrechtlichen Bewertungsmaßstäbe der PPWR folgen erst ab 2028. Das entwickelte Modell bewertet jede Gebindeart bestandteilsbezogen anhand objektiv messbarer, physisch prüfbarer Parameter, orientiert sich an der EN 18120, sowie der Leistungsfähigkeit der Sortieranlage der EWP und ist über die Performanceklassen unmittelbar an die Leistungsstufen des Anhangs II PPWR anschlussfähig. Zu beachten ist, dass vor allem die anlagenabhängigen Parameter und deren Einfluss auf die Recyclingfähigkeit, insbesondere die Funktionsfähigkeit des „Delabers“, regelmäßig überprüft werden sollten. Produzenten sehen eindeutig und vor Inverkehrsetzung, wie ihre Verpackungen bewertet werden und können aufgrund der Detailansicht entsprechende Maßnahmen setzen.

LITERATURVERZEICHNIS

CEN. (2026). EN 18120-1:2026 – Packaging – Design for recycling of plastic packaging products. Brüssel.

DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION. (2025). Verordnung (EU) 2025/40 über Verpackungen und Verpackungsabfälle, ABl. L, 2025/40. Brüssel, Belgien.

EWP. (2026). Produzenten-Handbuch für Erstinverkehrsetzer (Getränkeproduzenten /Getränkeimporteure) von Ein-weggetränkeverpackungen aus Kunststoff oder Metall. Wien, Wien, Österreich.

FH Campus Wien & Circular Analytics TK GmbH. (2024). Circular Packaging Design Guidelines. Wien, Wien, Österreich.

Stiftung Zentrale Stelle . (2026). Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpa-ckungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG Konsultationsfassung. Osnabrück, Deutschland.

KONTAKT

DI Stephan Kern
Stephan.kern@wpa.at
0043 664 517 1139
wpa Beratende Ingenieure GmbH
www.wpa.at

Modulation der Teilnahmegebühren an Sammel- und Verwertungssystemen auf Basis des Produktpasses

Walter Hauer
[1)] Technisches Büro HAUER Umweltwirtschaft, Langenzersdorf, Österreich

KURZFASSUNG: Für Elektro- und Elektronikgeräte werden zunehmend Informationen zur Gestaltung und den enthaltenen Materialien sowie Reparatur und Verwertung verpflichtend. Diese Informationen könnten als Basis für nach Werthaltigkeit und Verwertbarkeit der Produkte differenzierte Entgelte an Sammel- und Verwertungsunternehmen dienen. Erfahrungen zeigen, dass bereits geringe monetäre Anreize sehr rasch zu gewünschten Anpassungen der Produktgestaltung führen. Notwendig wären entsprechende organisatorische Voraussetzungen und eine zentrale Datenbank mit Produktinformationen sowie eine zentrale Vorgabe für Bonifikationen bei entsprechend vorteilhafter Gestaltung.

1 EINFÜHRUNG

Für eine immer größer werdende Anzahl an Produkten wird das Führen eines Produktpasses verpflichtend. Der Produktpass enthält wichtige Informationen zu den verwendeten Materialien und auch zur Verwertung der Produkte nach der Nutzungsphase.

Je nach Ausgestaltung der Produkte wird ein Recycling erleichtert oder erschwert. Dies schlägt sich nicht zuletzt auch im Wert des nicht mehr verwendeten Produktes wieder. Nun wäre es vorteilhaft, die Teilnahmegebühren an diesen Wert anzupassen mit zwei Wirkungen:

- Gerechte Gebühren im Vergleich zur Werthaltigkeit des Produktes als Abfall
- Lenkungsmaßnahme, um Produkte recyclinggerechter zu gestalten

2 AKTUELLER STAND

Schon in der Gründungsphase von Sammel- und Verwertungssystemen in Österreich im Jahr 1993 bestanden die Ziele (ADL, aVa 1993):

- Gewichtsreduktion
- Trend zu Monomaterialien
- Vermehrter Einsatz von Sekundärrohstoffen

Weder die Sammelsysteme für Verpackungsabfälle noch jene für Elektro-Elektronik-Altgeräte haben bislang Maßnahmen ergriffen, um die genannten Ziele zu verfolgen bzw. um Anreize zu bieten, Produkte entsprechend zu gestalten. Dies, obwohl der Bedarf danach unübersehbar war und mittlerweile ein untätiger Zeitraum von mehr als dreißig Jahren entstand.
In der Zwischenzeit sind entsprechende Maßnahmen zumindest im Bereich Verpackungen auf Initiative der Europäischen Union erforderlich.

3 ERFORDERLICHE INFORMATIONEN FÜR EINE TEILNAHME AN EINEM SAMMEL- UND VERWERTUNGSSYSTEM

Bislang reicht es aus, die Masse eines Produktes anzugeben, um an einem Sammel- und Verwertungssystem für Elektro-Elektronikgeräte teilzunehmen. Dies bietet natürlich keinerlei Informationen über die rechtskonforme Gestaltung des Produktes. Auch über die Materialzusammensetzung wird nichts bekannt.
Künftig mit den Informationen eines Produktpasses sollte es erforderlich sein, für eine Teilnahme eines Produktes an einem Sammel- und Verwertungssystem (= Lizenzierung bzw. Entpflichtung) zumindest die folgenden Informationen zu erbringen:

- Bedienungsanleitung dem Produkt beiliegend gedruckt / auf der Homepage / mit Videounterstützung
- Reparaturanleitung verfügbar im Internet / mit Videounterstützung
- Ersatzteilliste im Internet verfügbar mit Angabe von Bezugsquellen
- Verwendete Materialien mit deren Masseanteilen für:
    - Bauteile Elektro-Elektronik
    - Gehäuse
    - Zubehör
    - Batterie / Akku
- CE-Konformitätserklärung

Auf Basis dieser Informationen könnten unterschiedliche Lizenzentgelte vorgeschrieben werden. Je einfacher ein Produkt zerlegbar, desto geringere Gebühren, je hochwertiger die Materialien, desto geringere Gebühren und vice versa.

Mit einer Verpflichtung zum Erbringen der erforderlichen Informationen wäre zugleich gesichert, dass nur jene Produkte lizenziert werden, die den europäischen Standards entsprechen. Wird ein Produkt dennoch auf den Markt gebracht, liegt nicht nur eine Verletzung der Beibringung der erforderlichen Informationen bzw. eine Verletzung der Vorgaben für Produktgestaltung sondern auch eine Verletzung der vorgeschriebenen Teilnahme an einem Sammel- und Verwertungssystem vor.

In Deutschland meldete die Bundesnetzagentur für das Jahr 2025 eine Anzahl von 7,7 Mio. Geräten, die wegen fehlender Konformität aktiv aus dem Verkehr gezogen wurden. Die Agentur gibt an, dass etwa die Hälfte der im stationären Handel angebotenen Geräte die Vorgaben nicht erfüllen (n-tv 2026). In Deutschland mussten alleine im November 2025 30 Mio. Produkte aus Online-Angeboten wegen unzulässiger Produktgestaltungen zurückgezogen werden (n-tv 2026-2).

Mit einer entsprechenden Konformität mit europäischen Richtlinien als Voraussetzung für eine Lizenzierung könnte hier weitgehend Abhilfe geschaffen werden. Zudem wären massive Anreize für eine recyclinggerechte Gestaltung von Geräten gegeben. Eine Möglichkeit zur Förderung von Reparaturen wären z.B. reduzierte Entgelte für Ersatzteile.

Im Bereich der bepfandeten Kunststoff-Getränkeflaschen haben monetäre Anreize zu einer besseren Verwertbarkeit der PET-Flaschen zu erstaunlich schnellen Reaktionen der Hersteller und Umstellungen in der Produktgestaltung geführt.

4 ORGANISATORISCHE VORAUSSETZUNGEN

In Österreich bestehen mehrere Sammel- und Verwertungssysteme sowohl für Verpackungen aus auch für Elektro- und Elektronikgeräte, die individuell die verschiedensten Produkte lizenzieren. Je nach Unternehmen haben sich verschiedene Schwerpunkte der Produktgruppen entwickelt. Ein System entpflichtet mehr hochwertige Kleingeräte mit Motoren, ein anderes System entpflichtet mehr einfache Produkte wie z.B. Lampen oder Wasserkocher. Beide Systeme bekommen aber einen Durchschnitt aller Produkte zur Verwertung zugewiesen. Somit kann kein System bei seinen Kunden eine Differenzierung der Entgelte vornehmen, da es ja den Durchschnitt aller Produkte erhält und eventuelle Vorteile in der Verwertung für „seine“ Produkte nicht lukrieren kann.

Es bedarf einer zentralen Stelle, die die gemeldeten Daten des Inverkehrsetzers aus dem Produktpass verwaltet und den Sammel- und Verwertungssystemen zur Verfügung stellt. Damit verknüpft ist auch die entsprechende Öko-Modulations-Einstufung. Die muss für alle Sammel- und Verwertungssysteme gleich sein. Das heißt, eine solche zentrale Stelle erstellt Kriterien und legt für bestimmte Kriterien Prozentsätze fest, um die sich ein durchschnittliches Entgelt zu erhöhen oder zu verringern hat. Die individuelle Kalkulation des Basis-Entgeltes könnte weiterhin bei den einzelnen Sammel- und Verwertungssystemen verbleiben.

Es wäre somit erforderlich, eine Trennung zwischen der Erhebung der individuellen Produkt-Informationen sowie der Einhebung der erforderlichen Finanzmittel und der operativen Tätigkeiten der Sammlung und Verwertung vorzunehmen. Die Erhebung der Informationen und deren Bereitstellung in einer Datenbank müsste von einer einzigen – möglichst neutralen – Institution erfolgen. Diese Institution hätte dann auch alle Informationen aus den Produktpässen und hätte somit auch die Aufgabe von entsprechenden Kontrollen. Diese Aufgabe könnte z.B. die Elektroaltgeräte-Koordinierungsstelle oder das Umweltbundesamt übernehmen. Die Sammlung und Behandlung gebrauchter WEEE, gegebenenfalls auch die Mitteleinhebung, könnte weiterhin im privatwirtschaftlichen Wettbewerb durch Sammel- und Verwertungsunternehmen erfolgen.

Das heißt, dass eine Trennung zwischen Informationserhebung und -bereitstellung in einer zentralen Stelle und operativen Tätigkeiten zur Kalkulation und Einhebung von Teilnahmeentgelten (Lizenztarifen) sowie der Sammlung und Verwertung zwingend erforderlich wäre. Derzeit fehlt der Teilbereich „Informationserhebung“.

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Erfahrungen aus dem Bereich Getränkeflaschen zeigen, dass bereits geringe Modulationen von Teilnahmegebühren an einem Sammel- und Verwertungssystem sehr rasch zu gewünschten Anpassungen in der Produktgestaltung führen. Trotz der hohen Komplexität der verschiedenen Elektro- und Elektronikgeräte bietet der Produktpass ausreichende Informationen, um solche Modulationen von Teilnahmegebühren (Eco-modulation) vorzunehmen und damit eine Veränderung der Produktgestaltungen zu bewirken. Notwendig ist eine zentrale Stelle zu Sammlung und Bereitstellung der entsprechenden Informationen und zur Vorgabe, welche Bonifikationen für welche Maßnahmen die Produkte erhalten. Die operativen Tätigkeiten der monetären Abwicklungen sowie der Sammlung und Verwertung könnte bei den Sammel- und Verwertungssystemen verbleiben.
Es wäre schade, würden die Informationen der Hersteller in den Produktpässen nicht für Lenkungsmaßnahmen für eine günstigere Produktgestaltung genutzt.

LITERATURVERZEICHNIS

ADL, aVa (1993): WKO und BMUJF (Hrsg.): ArthurDLittle, aVa: Aufbau eines Systems zur Sammlung und Verwertung von Verpackungsabfällen in Österreich, Endbericht Jänner 1993

Europäische Kommission (2024) Ökodesign-Verordnung 2024/1781 vom 13.06.2024

EY et.al. (2025) Ökomodellierung für Verpackungen

Fraunhofer (2025) Batteriepass & CO_2-Fußabdruck: Umsetzung mit Asset Administration Shell in der Produktion https://www.iese.fraunhofer.de/blog/batteriepass-umsetzung-mit-asset-administration-shell/

n-tv (2026) Bundesnetzagentur beschlagnahmt Millionen Elektrogeräte, https://www.n-tv.de/panorama/Bundesnetzagentur-beschlagnahmt-Millionen-Elektrogeraete-id30330525.html

n-tv (2026-2) Onlinehändler bieten Millionen Produkte trotz Verbots an, https://www.n-tv.de/wirtschaft/Onlinehaendler-bieten-Millionen-Produkte-trotz-Verbots-an-id30785438.html

Salewski, Ph. (2025) Digitale Produktpässe ab 2027: Das kommt auf Hersteller und Händler zu

KONTAKT

Ing. Mag. Walter Hauer
tbhauer@tbhauer.at
+43 664 4032739
www.tbhauer.at

Einfach nur „abfall-artig“

Torben Kraffczyk
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Die Kreislaufwirtschaft steht trotz politischer Harmonisierungsbestrebungen auf europäischer Ebene weiterhin unter dem Einfluss nationaler Regelungen, steigender regulatorischer Anforderungen und eines zunehmenden Wettbewerbsdrucks, der insbesondere mittelständische Recyclingunternehmen vor strategische Herausforderungen stellt. Um langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen diese Unternehmen verstärkt in Digitalisierung, innovative Recyclingtechnologien und Kooperationen investieren, während dezentrale Zusammenschlüsse und Partnerschaften an Bedeutung gewinnen.

1 EINLEITUNG

Trotz anhaltender politischer Bemühungen einzelner Mitgliedsstaaten der Europäischen Union artig die Einheitlichkeit der europäischen Kreislauswirtschaft herbeizuwünschen, gelten vielerlei Orts dezentrale Regeln, die vornehmlich durch eine ökonomische Interessenslage geprägt sind. Dabei geht es längst nicht mehr ausschließlich um die gezielte Umgehung europäischer abfallrechtlicher Vorgaben, sondern um eine Trendwende in der strategischen Ausrichtung von Recyclingunternehmen.

Der Mittelstand steht zwischen der Entscheidung von Expansion, Verbündung und Kapitulation. Steigende regulatorische Anforderungen zerren, strategische Entscheidungen im Ausbau von Recyclingtechnologien und -kapazitäten kosten, Innovationsgedanken stolpern da, wo der Zugriff auf wertvolle Stoffströme zunehmend von etablierten Marktführern und neuen Großakteuren kontrolliert wird (siehe auch Abb. 1 zu den aktuellen Herausforderungen in der Abfallwirtschaft).

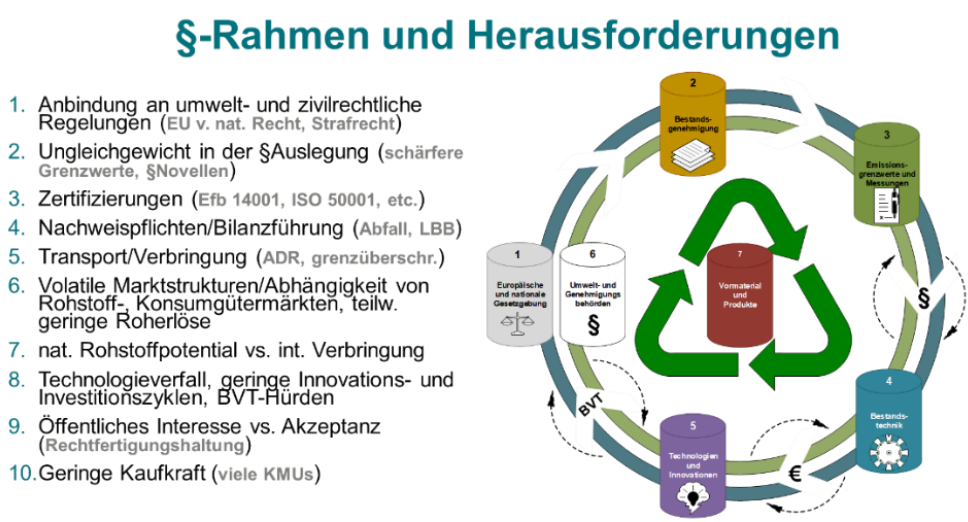


Abb. 1: Aktuelle Herausforderungen in der nationalen Abfallwirtschaft

Die kommenden fünf bis zehn Jahre werden damit zur strategischen Weichenstellung für den deutschen und österreichischen Recycling-Mittelstand. Während gesellschaftlich weitgehend Einigkeit darüber besteht, dass eine nachhaltige Zukunft ohne funktionierende Kreislaufwirtschaft

nicht denkbar ist, bleibt eine entscheidende Frage unbeantwortet: Wer trägt die Kosten – und wer profitiert von der Transformation?

2 DIE GRUNDORDNUNG DER ABFALLWITSCHAFT

Die Wurzeln vieler deutscher und österreichischer mittelständischer Abfallwirtschaftsbetriebe reichen in die Aufbruchsjahre der Nachkriegszeit zurück. Häufig begann die Unternehmensgeschichte mit dem ersten eigenen Lkw und der Entscheidung, eingesammelte Bau- und Abbruchabfälle nicht mehr ausschließlich zu transportieren, sondern selbst aufzubereiten und zu verwerten.
An diesem Grundprinzip hat sich bis heute wenig geändert – auch wenn sich die wirtschaftlichen, technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen grundlegend gewandelt haben.

Viele der noch heute prägenden Unternehmerpersönlichkeiten sind nicht nur Zeitzeugen, sondern zugleich Gestalter dieses Wandels. Ohne Wachstum, Risikobereitschaft und politisches Engagement wäre die Grundordnung der Abfallwirtschaft im deutschsprachigem Raum wohl wenig ambitioniert: im Grundsatz regelkonform, grundsätzlich profitabel. Recycling ist damit nicht nur ein umweltpolitisches Instrument, sondern vor allem ein funktionierendes Geschäftsmodell.

Während mittelständische Unternehmen ihre Wettbewerbsfähigkeit vor allem über regionale Marktkenntnis, Kundennähe und operative Flexibilität sichern, agieren internationale Konzerne auf europäischer Ebene und nehmen direkten Einfluss auf regulatorische Entwicklungen. Die Herausforderungen sind vergleichbar – die verfügbaren Ressourcen und strategischen Handlungsmöglichkeiten jedoch nicht.

Während Brüssel von einer harmonisierten europäischen Kreislaufwirtschaft träumt, dominiert vor Ort die Realität fragmentierter Regeln und knallharter ökonomischer Interessen. Was als Harmonisierung verkauft wird, entpuppt sich vielerorts als Schutzschirm nationaler Vorteile und industrieller Machtspiele.
Am Ende entscheidet daher nicht allein die regulatorische Konformität über den wirtschaftlichen Erfolg, sondern die Fähigkeit, ökologische Verantwortung mit unternehmerischer Wettbewerbsfähigkeit zu verbinden. Wirtschaftlicher Fortbestand bleibt die zentrale Voraussetzung – jedoch nicht um jeden Preis.

3 HERAUSFORDERUNGEN IM MITTELSTAND

Wenn das Paket an Auflagen größer wird, wird der Geldbeutel im Mittelstand enger geschnürt, denn jede neue Bestimmung birgt ein neues Risiko.
Im Rahmen regionaler Wachstumsstrategien und der langfristigen Sicherung bestehender Marktpositionen geht es längst nicht mehr ausschließlich um die Erfüllung europäischer Abfallvorgaben. Vielmehr steht die Branche vor einem grundlegenden strategischen Wendepunkt: Wachsen oder verschwinden, kooperieren oder übernommen werden?
Zwischen wachsendem Regulierungsdruck, kapitalintensivem Technologiewettrüsten und zunehmend umkämpften Stoffströmen geraten Innovationspotentiale unter Druck. Gleichzeitig erweitern etablierte Marktteilnehmer sowie branchenfremde Akteure ihren Einfluss auf die Wertschöpfungsketten der Kreislaufwirtschaft.

Die traditionellen Stärken des Mittelstands - ausgezeichneter Kundenservice mit hoher Reaktionsgeschwindigkeit, flache Hierarchien geprägt durch Unternehmergeist und Entscheidungsfreude, gesunder Wettbewerb im direkten Umfeld - stehen zunehmend neuen Herausforderungen gegenüber. Dazu zählen insbesondere der Fachkräftemangel bei technischen Spezialisten als auch im operativen Bereich, der Generationenwechsel mit ungelösten Nachfolgeregelungen

sowie wachsende Anforderungen von Großkunden hinsichtlich Klimaschutz, Nachhaltigkeit und transparenter Prozessstrukturen (siehe Abb. 2).
Ein zuverlässiger Service, die Spezialisierung auf einzelne Abfallströme sowie Verbindlichkeit und Vertrauen bilden weiterhin wichtige Erfolgsfaktoren. Sie allein reichen jedoch nicht mehr aus, um den zukünftigen Anforderungen des Marktes gerecht zu werden. Unternehmen, die regulatorische Entwicklungen unterschätzen, digitale Nachweis- und Dokumentationsprozesse vernachlässigen oder Digitalisierung lediglich auf administrative Prozesse beschränken, riskieren langfristig den Verlust ihrer Wettbewerbsfähigkeit (BDE, 2026).



Abb. 2: Spezielle Herausforderungen im Mittelstand der Abfallwirtschaft

4 DER WANDEL IM MITTELSTAND

In 2024 verzeichnete die österreichische Abfallwirtschaft ca. 3.000 Unternehmen mit über 31.000 Beschäftigten. Der überwiegende Teil dieser Unternehmen ist dem klein- und mittelständischen Bereich zuzuordnen. Im Vergleich zur Gesamtwirtschaft entwickelt sich die Branche überdurchschnittlich dynamisch – ein Trend, der auch in Deutschland weiterhin Bestand hat (FVERM, 2024). Trotz der bestehenden Herausforderungen eröffnet diese Entwicklung grundsätzlich positive Perspektiven.

Gleichzeitig ist organisches Wachstum kapitalintensiv. Der durch regulatorische Vorgaben forcierte Umstieg auf emissionsarme Technologien sowie die Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauchs werden zu entscheidenden Faktoren für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit. Für kleine und mittelständische Recyclingunternehmen gewinnen daher Innovationsfähigkeit, Anpassungsfähigkeit und strategische Partnerschaften zunehmend an Bedeutung.

Kooperationen und Zusammenschlüsse mittelständischer und familiengeführter Entsorgungsunternehmen stellen ein bewährtes Mittel dar, regionale Marktpositionen langfristig abzusichern und durch Netzwerke zusätzliche Skaleneffekte zu erzielen. Dort wo großindustrielle Unternehmen in der Kreislaufwirtschaft mit technologisch fortschrittlichen Lösungen und Skaleneffekten punkten, können aus bisherigen Marktbegleitern strategische Partner werden (BDE, 2026).

Regionale Standortvorteile, eigene Infrastruktur, gewachsene Netzwerke mit direktem Zugang zu mit politischen und behördlichen Ansprechpartnern sowie ein breites Dienstleistungsportfolio,

schaffen wirtschaftsstrategische Anreize für erfolgreiche Kooperationen. Ob in Form eines Joint Ventures, einer Arbeitsgemeinschaft oder eines Unternehmenszusammenschlusses umgesetzt, ist dabei zweitrangig. Entscheidend ist die Nutzung gemeinsamer Potenziale: die Bündelung administrativer Strukturen, die Verteilung kapitalintensiver Investitionsrisiken sowie die Zusammenführung fachlicher und operativer Kompetenzen (siehe dazu auch Abb. 3).

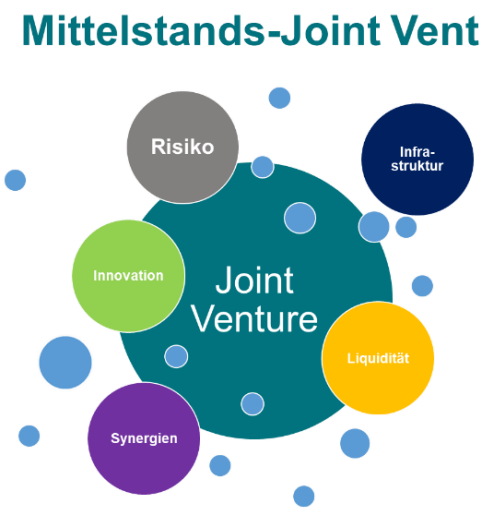


Abb. 3: Zusammenführung von Mittelstandskompetenzen

Während die größten Entsorgungsunternehmen Deutschlands beim anorganischen Wachstum zunehmend auf wettbewerbsregulatorische Grenzen stoßen, eröffnet sich für den Mittelstand eine strategische Chance. Durch aktive Beteiligung an Kooperationen und Zusammenschlüssen kann er seine Marktposition stärken und den langfristigen Fortbestand sichern.

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die kommenden fünf bis zehn Jahre werden maßgeblich darüber entscheiden, welche Rolle der deutsche und österreichische Recycling-Mittelstand in der zukünftigen Kreislaufwirtschaft einnehmen wird. Während gesellschaftlich weitgehend Konsens darüber besteht, dass eine nachhaltige Zukunft ohne leistungsfähige Recyclingstrukturen nicht denkbar ist, bleiben zentrale wirtschaftliche Fragen bestehen: Wer trägt die Kosten der Transformation – und wer profitiert von den entstehenden Wertschöpfungspotenzialen? Schafft der Mittelstand den Anschluss an eine Konsolidierung im Markt? Und wie groß ist die Bereitschaft die Zukunft gemeinsam strategisch zu gestalten?

LITERATURVERZEICHNIS

BDE. (2026). *Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft.* Düsseldorf: Prognos AG.
FVERM. (2024). *Branchenbild Abfallwirtschaft.* Wien: Industriewissenschaftliches Institut.

KONTAKT

Dr.-Ing. Torben Kraffczyk
office@simplywasted.de

Kreislaufwirtschaftsrechte für Sekundärrohstoffe!

Christine Bertl[1]
[1)] FH Technikum Wien, Chemical Engineering and Ecotoxicology, Wien, Österreich

Der folgende Text wurde ursprünglich am 15.05.2025 als *Policy Brief* (Bertl, 2025) verfasst und die Thematik mit Stand vom 27.06.2026 ergänzt.

KURZFASSUNG: Angesichts drängender globaler Krisen und der Endlichkeit natürlicher Ressourcen hat ein tiefgreifendes Umdenken hin zur Kreislaufwirtschaft bereits begonnen, wird jedoch auch durch eine regulatorische Benachteiligung von Sekundärrohstoffen gehemmt. Der vorliegende Beitrag identifiziert eine Lücke in der nationalen und EU-weiten Rechtslage und setzt mit der Forderung „Kreislaufwirtschaftsrechte für Sekundärrohstoffe!“ einen Impuls, um diese Ressourcen mit Privilegien auszustatten. Ziel ist es, deren Kreislaufführung attraktiver zu gestalten und ihren Wert rechtlich anzuerkennen. Basierend auf Visionen universeller Materialrechte und Dienstleistungskonzepten wird die Verschiebung vom Eigentum hin zum Nutzungsrecht sowie eine durchgehende Herstellerverantwortung thematisiert. Als zentraler Hebel dient die Weiterentwicklung des Abfallrechts hin zu einem stofflichen Ansatz mit transparenten Abfallende-Kriterien. Unter Einbeziehung des *Safe and Sustainable by Design*-Ansatzes, der Ökodesign-Verordnung und des Digitalen Produktpasses wird aufgezeigt, wie Sekundärrohstoffe rechtlich privilegiert werden können, um die Ressourceneffizienz und globale Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig zu stärken.

1 AUSGANGSPOSITION

1.1 Bedeutung von Sekundärrohstoffen in der Kreislaufwirtschaft

Als Sekundärrohstoff wird „Wertstoff; Werk-, Hilfs- oder Betriebsstoff, der durch Aufbereitungsvorgänge aus stofflichen Rückständen von Produktion oder Konsum gewonnen wird (Recycling)“ bezeichnet (Günther, 2018). Niedrige Rohstoff- und Nutzungskosten haben historisch zu hohem Primärressourcenverbrauch geführt. Der Ausweg wird in der Kreislaufwirtschaft als zentrales Element der globalen Nachhaltigkeitsziele gesehen. Die erste internationale Definition der Kreislaufwirtschaft, gemäß ISO 59004, beschreibt ein Wirtschaftssystem, das einen systemischen Ansatz verfolgt, um einen kontinuierlichen Fluss von Ressourcen zu gewährleisten. Dieser wird durch Rückgewinnung, Erhalt oder Wertsteigerung der Ressourcen erreicht. Ressourcen werden sowohl im Hinblick auf Bestände als auch auf Flüsse betrachtet, wobei der Zufluss von Primärressourcen so gering wie möglich gehalten werden soll. Dabei erweitert die ISO die klassischen R-Strategien auf Maßnahmen wie „Source“ (Nachhaltige Rohstoffauswahl), „Cascade“ (Kaskadennutzung), „Re-mine“ (Rückgewinnung von Wertstoffen aus z.B. Deponien). Der Kreislauf der Ressourcen soll so weit wie möglich geschlossen werden, um Abfälle, Verluste und die Freisetzung aus dem Wirtschaftssystem zu minimieren. (International Organization for Standardization, 2024) Auf Kreislaufwirtschaft basierte Systeme betonen den Mehrwert von Produkten, vermeiden Abfall und halten Ressourcen innerhalb der Wirtschaft in einem fortlaufenden Zyklus von Nutzen und Wiederverwertung. Das setzt einen Systemwandel der gesamten Wertschöpfungskette voraus: von der Produktgestaltung über neue Geschäfts- und Marktmodelle, Methoden zur Umwandlung von Abfall in wiederverwendbare Ressourcen bis hin zu veränderten Konsummustern. Eine funktionierende Kreislaufwirtschaft strebt kontinuierlich nach Innovationen in der Technologie, in organisatorischen, gesellschaftlichen und finanziellen Aspekten sowie in der Politik (Europäische Kommission, 2014).

Mit dem quantitativen Ziel der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie, die Zirkularitätsrate bis 2030 auf 18 % zu steigern, sollen Ressourcen so lange und so effizient wie möglich im Kreislauf gehalten, stofflich verwertet und Abfälle minimiert werden. Der Clean Industrial Deal sieht Potential zur z.B. Sicherung der Versorgung mit kritischen Rohstoffen in einer höheren EU-Zirkularitätsrate und setzt diese als EU-Benchmark mit 24 % bis 2030 an (Europäische Kommission, 2025). Obwohl die Zirkularitätsrate in Österreich steigt, 2024 mit einem vorläufigen Wert von 15,2 %, zeigt sich unser verschwenderischer Umgang mit Ressourcen ebenfalls im Ressourcenverbrauch und -produktivität wider (EEA, 2026).

1.2 Ressourcenverbrauch und Ressourcenproduktivität

Österreich verzeichnet im europäischen Vergleich einen hohen Ressourcenverbrauch. Der Material-Fußabdruck (MF) lag 2017 bei 290 Millionen Tonnen, bzw. 33 Tonnen pro Kopf. Laut dem aktuellen Fortschrittsbericht zur Österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie, sank im Jahr 2024 dieser Wert auf vorläufig 19,6 Tonnen pro Kopf. (BMLUK, 2026) Dies ist der tiefste Stand seit 2015. Bis 2050 soll der Material-Fußabdruck nachhaltig auf ein Drittel, nämlich auf 7 Tonnen pro Kopf und Jahr sinken, was eine Reduktion des konsumbasierten Rohstoffverbrauchs um etwa 64,3 % bedeutet. Zudem stellt die Reduktion des Einsatzes von Primärstoffen auf 25 % bis 2030 eine weitere Herausforderung für die Wirtschaft dar und unterstreicht die Bedeutung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen. (Bundesministerium für Klimaschutz, 2022) Der inländische Materialverbrauch (Domestic Material Consumption, DMC) ist die Summe aus den im Land gewonnenen Primärmaterialien, plus der physischen Importe und abzüglich der physischen Exporte und ist seit seinem Höchststand im Jahr 2021 etwa 16 % gesunken. Er betrug vorläufig 15,7 Tonnen pro Kopf im Jahr 2024 (BMLUK, 2026). Das Ziel bis 2030 ist eine Reduktion des DMC auf 14 Tonnen pro Kopf jährlich (BMK, 2022). Folglich kann das durch eine signifikante Steigerung der Materialeffizienz oder dem konsequenten Ersatz von Primär- durch Sekundärstoffe erreicht werden. Diese Steigerung ist zudem die Grundvoraussetzung für das Erreichen der politischen Zielvorgabe einer höheren Ressourcenproduktivität.
Die Ressourcenproduktivität wird berechnet, indem das Bruttoinlandsprodukt durch den inländischen Materialverbrauch geteilt wird. Sie zeigt an, wie effizient eine Volkswirtschaft ihre Ressourcen nutzt, also wie viel Bruttoinlandsprodukt mit dem Verbrauch einer bestimmten Menge an Materialien erzeugt werden kann. Während der Wert zur Ressourcenproduktivität für 2022 noch bei 2,5 lag, konnte Österreich seine Ressourcenproduktivität im Jahr 2023 deutlich auf 2,8 kaufkraftbereinigte BIP-Einheiten je kg steigern. Österreich konnte damit den 10. Platz im EU-27-Ranking halten und liegt damit leicht über dem EU-27-Durchschnitt. Dass hier noch Luft nach oben ist, zeigt sich, dadurch, dass das Ziel von 50 % Steigerung im Vergleich zum Jahr 2015 noch nicht erreicht wurde (BMBWF, 2024; BMK, 2022).

1.3 Abfallende-Verordnung und „stofflicher Ansatz“

Der Erste Hauptsatz der Abfallwirtschaft drückt aus: „Jedes Produkt wird Abfall – es ist nur eine Frage der Zeit“ (Pomberger, 2024).
Eine Sache wird zu Abfall, sobald sich eine Besitzerin/ein Besitzer ihrer entledigen will oder entledigt hat (Republik Österreich, 2002/2024). Das österreichische Abfallrecht wurde entworfen, um Schadstoff aus dem Stoffkreislauf zu entfernen, mit dem Ziel davon potenziell ausgehende schädliche Einwirkungen auf die Umwelt zu verhindern. Besonders kritisch für die Kreislaufwirtschaft ist hier die Abfallende-Verordnung für die Recycling- und Abfallwirtschaft. Das Abfallende ist ein rechtlicher Begriff, der den Zeitpunkt markiert, ab dem ein Material oder Produkt nicht mehr als Abfall betrachtet wird, sondern als Sekundärrohstoff, der in die Produktion zurückgeführt oder anderweitig genutzt werden kann. Für den Eintritt des Abfallendes müssen bestimmte Kriterien erfüllt sein. Die rechtliche Grundlage findet sich auf EU-Ebene in Artikel 6 der Abfallrahmenrichtlinie (ARRL) und auf nationaler Ebene in § 5 des österreichischen Abfallwirtschaftsgesetzes (AWG) 2002.

Hier ist zu betonen, dass das Abfallende nicht automatisch eintritt, nur weil die ursprüngliche Entledigungsabsicht des ersten Eigentümers wegfällt. Diese Theorie („Contrarius actus") wurde von der höchstgerichtlichen Judikatur zurückgewiesen, und die Abfalleigenschaft geht erst durch eine zulässige Verwertung verloren. (Kasper, 2024) Denn nach Rechtsprechung des Verwaltungsgerichtshofs (VwGH) haftet die subjektive Abfalleigenschaft dem Material fortan an, wenn auch nur irgendein Vorbesitzer (nicht zwingend dem aktuellen Eigentümer) eine Entledigungsabsicht hatte. Das bedeutet, dass ein nachfolgender Besitzer den Stoff nicht einfach durch seinen eigenen Willen zu einem „Nicht-Abfall“ erklären kann, selbst wenn sie bzw. er ihn als wertvolle Ressource betrachtet. Mit Abfall-Status bleiben die Besitzerin bzw. der Besitzer für die ordnungsgemäße Behandlung und Übergabe an befugte Sammler verantwortlich.
Um diese rechtliche Kette zu durchbrechen und ein Material wieder rechtssicher in den Wirtschaftskreislauf zurückzuführen, bedarf es eines formalen Übergangs. Somit stellt das Abfallende die entscheidende Schnittstelle zwischen Abfall und Produkt dar und ist ein kritisches Bindeglied in der Kreislaufwirtschaft. Denn das Abfallende schließt den Kreis.
Während nach ARRL und der Judikatur des EuGH bereits das Vorhandensein produktähnlicher Eigenschaften nach einer Behandlung zum Verlust der Abfalleigenschaft ausreichen kann, ist das Abfallende im österreichischen Recht komplexer geregelt. Es kann gemäß § 5 AWG 2002 durch eine nationale Abfallende-Verordnung eintreten, oder, in Ermangelung einer solchen Verordnung, wenn sogenannte „Altstoffe" (getrennt gesammelte oder vorbehandelte Abfälle zur Verwertung) oder daraus gewonnene Stoffe unmittelbar als Substitution von Rohstoffen oder daraus erzeugten Produkten verwendet werden. Das österreichische Recht hat explizit keine Einzelfallentscheidungen zum Abfallende im Sinne des Art 6 Abs 4 ARRL vorgesehen.
Dass hier eine rechtliche Veränderung unumgänglich ist, ist absehbar. Konkrete Anknüpfpunkte bietet hier die Kundmachung der Änderung der ARRL durch die Richtlinie (EU) 2025/1892.

1.4 Ist die Definition eines Abfallendes überhaupt sinnvoll?

Die strikte rechtliche Auslegung führt dazu, dass der Einsatz von Sekundärrohstoffen gegenüber Primärressourcen systematisch benachteiligt wird. Der Weg zum Produktstatus ist oft hürdenreich und risikobehaftet, selbst wenn die Materialien technisch vollkommen geeignet wären. Um diese Hürden zu überwinden, ist die konsequente Beurteilung nach „stofflichen Ansatz“ zielführend. Diesem liegt zugrunde, dass die Eignung eines Stoffes für eine neue Anwendung primär anhand seiner materiellen und technischen Eigenschaften im Verhältnis zu den Anforderungen der geplanten Verwendung bewertet wird. Erfüllt ein Sekundärrohstoff dieselben Standards wie ein Primärrohstoff, entfällt die objektive Rechtfertigung, ihn weiterhin als Abfall zu behandeln. Die Forderung nach einem Kreislaufwirtschaftsrecht für Sekundärressourcen sucht neue Wege, Stoffe im Kreislauf zu halten, um die sichere und nachhaltige Verwendung von Rohstoffen zu verlängern.

2 WIRKSAME MASSNAHMEN

2.1 Materialrechte umdenken

In einem „Materialien haben Rechte“-System würde das Konzept des Eigentums an Materialien durch ein Nutzungsrecht ersetzt, wobei die Verantwortung für die Materialien beim Hersteller verbleibt. Dies fördert die Kreislaufwirtschaft, da Hersteller angehalten werden, Produkte so zu designen und zu bauen, dass ihre Bestandteile am Ende des Lebenszyklus leicht wiederverwendet, recycelt oder sicher zurückgeführt werden können. Im Idealfall wird das Material unbegrenzt verfügbar gemacht.
Der niederländische Architekt Thomas Rau und die Ökonomin Sabine Oberhuber publizierten bereits Konzepte, die eine Basis für die Forderung nach Rechten für Sekundärrohstoffe bietet. Ihr innovatives Konzept von „Material as a Service” (MaaS), bei dem Materialien als

Nutzungsrechte statt als Eigentum betrachtet werden, verschiebt die Sicht auf den Umgang mit Ressourcen: Anstatt Materialien zu veräußern, werden lediglich deren Nutzungsrechte bereitgestellt, während die Hersteller als Eigentümer die Verantwortung über den gesamten Lebenszyklus tragen. Indem die Hersteller für den Erhalt dieser Rechte verantwortlich bleiben, wird das Prinzip „Circular by Design" zur ökonomischen Notwendigkeit, um Produkte am Ende ihres Lebenszyklus effizient wiederverwenden oder als hochwertige Sekundärrohstoffe zurückgewinnen zu können. (Oberhuber & Rau, Material Matters, 2016) Eines ihrer erfolgreichsten Good Practices ist das Geschäftsmodell „Light as a Service" (LaaS), bei dem das Unternehmen Philips nur die Leistung des Lichts verkauft und nicht das Produkt selbst. Der Anbieter übernimmt die Verantwortung für das End-of-Life-Management, also einschließlich Wiederverwendung, Aufbereitung und Recycling. (Signify Holding, 2026) So wird der Übergang der ausgedienten Materialien aus Beleuchtungsprodukten zu hochwertigen Sekundärrohstoffen aktiv gefördert und vereinfacht. Die im LaaS-Modell zurückgewonnenen Materialien, wie Metalle aus ausgedienten LED-Leuchten, können durch geeignete Verfahren aufbereitet werden, um als Sekundärrohstoffe in die Produktion zurückgeführt zu werden (z.B. durch Metalleinschmelzen in Lichtbogenöfen).
Die Autorin und der Autor denken den linearen Lebenszyklus eines Materials weiter, indem sie verlangen, dass für Rohstoffe Rechte in Form von „The Universal Declaration of Material Rights", in Anlehnung auf die UN-Menschenrechte, festgelegt werden sollen. Sie finden darin einen Weg, die Beziehung zwischen Menschen und Erde wieder ins Gleichgewicht zu bringen und einen Start zum Umdenken, wie Menschen Ressourcen nutzen. (Oberhuber & Rau, Material Matters, 2016)

2.2 Ökodesign-Verordnung als Richtlinie für Kreislaufwirtschaftsrechte

Die Ökodesign-Verordnung stellt eine praktische Richtlinie für die mögliche Gestaltung von Kreislaufwirtschaftsrechten dar (Europäische Union, 2024). Nachfolgende Forderungen können daraus abgeleitet werden: Sekundärrohstoffe sollen das Recht auf Anerkennung als wertvolle Ressourcen erhalten, die für die Herstellung neuer Produkte genutzt werden können. Dies umfasst das Recht auf ein nachhaltiges und ressourcenschonendes Design, das eine einfache Rückgewinnung, Reparatur und Wiederverwendung ermöglicht. Ebenso sollte das Recht bestehen, dass der Anteil von Sekundärmaterialien in Produkten erhöht wird und dass Materialien, die nachweislich wiederverwertbar sind, bevorzugt eingesetzt werden. Sekundärrohstoffe sollten außerdem das Recht auf Minimierung von Schadstoffen und Reduktion ihrer Umweltauswirkungen während des gesamten Lebenszyklus besitzen. Als Wegweiser für vorausschauende Entscheidungen bildet dabei das Konzept „*Safe and Sustainable by Design* (SSbD)" (Europäische Kommission, 2026). Das verlagert Verantwortung an den Beginn des Lebenszyklus (Designphase). Sekundärrohstoffe können nur dann ihre „Rechte" als vollwertige Ressourcen wahrnehmen, wenn sie nicht bereits durch das Produktdesign mit Schadstoffen belastet werden, die eine spätere Kreislaufführung technisch unmöglich oder rechtlich riskant machen. In weiterer Folge wäre es gar nicht möglich Produkte ohne Eigenschaften wie Recyclingfähigkeit und Reparierbarkeit zu produzieren, da Sekundärrohstoffe in einem Kreislaufsystem die gleichen Rechte wie Primärrohstoffe erhalten müssten. Das legt Voraussetzungen für eine echte Kreislaufwirtschaft, in der Materialien nach ihren technischen und materiellen Eigenschaften bewertet werden und ohne rechtliche Hindernisse wiederverwendet werden können.

2.3 Möglicher Hebel: Digitaler Produktpass

Unterstützende Instrumente wie der Digitale Produktpass (DPP), der aus der aktuellen Produktdesign-Verordnung hervorgeht, könnten notwendige Hebel sein, um relevante Informationen über die Materialien bereitzustellen, die für Recycling und weitere Nutzung notwendig sind. (Halmschlager, 2023) Die Verantwortung für das Management zugesetzter Schadstoffe sollte zudem nicht nur beim Recyclingunternehmen liegen, sondern konsequent im Sinne von SSbD bereits beim Hersteller in der Designphase ansetzen.

Das bietet zugleich die Möglichkeit Konsument*innenrechte auszubauen, um die Nachfrage nach zirkulären und nachhaltigen Produkten und Dienstleistungen zu fördern. Für informierte Kaufentscheidungen ist es entscheidend, dass Informationen über Produkte, deren Inhaltsstoffe, Eigenschaften und die ökologischen sowie sozialen Bedingungen entlang der Lieferkette transparent, qualitätsgesichert und rechtlich verbindlich bereitgestellt werden. Digitale Produktpässe und die Weiterentwicklung von Gütesiegeln wie dem Österreichischen Umweltzeichen und dem EU-Ecolabel können hierbei unterstützen. So kann der „stoffliche Ansatz“ greifen.

3 ZUSAMMENFASSUNG

Die Forderung nach Kreislaufwirtschaftsrechten für Sekundärrohstoffe lenkt den Blick auf den inhärenten Wert von Materialien, verlangt die Herstellerverantwortung über den gesamten Lebenszyklus und erzwingt die Überwindung regulatorischer und wirtschaftlicher Benachteiligungen von Sekundärrohstoffen. Hinzu kommt, dass der Einsatz von Sekundärrohstoffen deutlich stärker geregelt ist als der von Primärrohstoffen. Wie aus dem Rechtsinstrument des Abfallendes hervorgeht, ist es für Unternehmen oft einfacher und risikoloser, Primärrohstoffe einzusetzen und auf Kreislaufführung zu verzichten. Dies führt dazu, dass Materialien eher der Entsorgung zugeführt und so dem Stoffkreislauf entzogen werden, selbst wenn sie technisch geeignet wären. Das steht den österreichischen Zielen der Kreislaufwirtschaftsstrategie entgegen. Das Abfallwirtschaftsrecht muss weiterentwickelt werden, um den Einsatz von Sekundärrohstoffen zu fördern und gleichzeitig Mensch und Umwelt zu schützen, ohne die Nutzung von Abfällen als Ressource unnötig zu erschweren.
Mit der Einführung von Kreislaufwirtschaftsrechten für Sekundärrohstoffe kann ein rechtsicherer und praktikabler Rahmen hin zum „stofflichen Ansatz“ weiterentwickelt werden. Eine Anlehnung die Prinzipien von *Safe and Sustainable by Design*, an die Kriterien der Ökodesign-Verordnung und Tools wie der Digitale Produktpass können eine Grundlage für eine transparente Primärrohstoffsubstitution im Sinne einer wettbewerbsfähigen Kreislaufwirtschaft schaffen.

4 GEDANKENEXPERIMENT AUS SEKUNDÄRROHSTOFF-SICHT

Abschließend wird zum Gedankenexperiment eingeladen. Wenn Sekundärrohstoffe „Rechte" beanspruchen, hätten sie im Kontext der wettbewerbsfähigen Kreislaufwirtschaft wohl Folgendes zu sagen: „Wir werden als Sekundärrohstoffe bezeichnet und stammen aus Produkten wie ausgedienten LED-Leuchten. Es ist technisch möglich, wertvolle Materialien wie Metalle durch thermochemische Prozessschritte zurückzugewinnen und wiederzuverwenden. Trotzdem stoßen wir oft auf bürokratische und rechtliche Hürden, die unsere Rückführung in die Wertschöpfungskette erschweren. Denn der Prozess des „Abfallendes“ ist oft strenger geregelt als der direkte Einsatz von endlichen Primärrohstoffen.
Der „stoffliche Ansatz“ besagt, dass wir basierend auf unseren Eigenschaften beurteilt werden sollten, um festzustellen, ob wir für neue Anwendungen geeignet sind. Wenn wir Rechte hätten, würden diese bedeuten, dass unser Potenzial als Ressource anerkannt wird, sobald wir die nötigen technischen und materiellen Standards erfüllen. Metallkonzentrat aus alten LED-Leuchten könnte unkompliziert als Sekundärrohstoff für die Herstellung neuer Produkte eingesetzt werden, wenn es nach qualitätsgesicherten Verfahren zurückgewonnen wurde.
Unsere Rechte auf Kreislaufwirtschaft würden bedeuten, dass wir auch von Unternehmen privilegiert und nicht benachteiligt werden. Technologien zur Rückgewinnung und Nutzung würden staatlich gefördert werden. Indem unser Weg vom Abfall zur Ressource erleichtert wird und wir nach unseren materiellen Eigenschaften beurteilt werden, könnten wir die Ressourcenproduktivität steigern und den Bedarf an Primärrohstoffen reduzieren.“

LITERATURVERZEICHNIS

Bertl, C. (2025). *Kreislaufwirtschaftsrechte für Sekundärrohstoffe! (Policy Brief).* https://www.researchgate.net/publication/392771111_Kreislaufwirtschaftsrechte_fur_Sekundarrohstoffe: ResearchGate.

BMBWF. (2024). Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung.*Österreichischer Forschungs- und Technologiebericht .* Wien: donaugrafik Schepelmann & Tettinger OG, 2440 Gramatneusiedl.

BMK. (2022). *Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft: Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie.* Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.

BMLUK. (2026). *Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie: Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft. Zweiter Fortschrittsbericht 2025.* Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft.

EEA. (2026). *European Environment Agency*. Abgerufen am 2026 von https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/circular-material-use-rate-in-europe#:~:text=The%20EU%20aims%20to%20double,material%20use%20rate%20by%202030

Europäische Kommission. (2014). *Hin zu einer Kreislaufwirtschaft: Ein Null-Abfallprogramm für Europa.* Brüssel: COM(2014) 398 final.

Europäische Kommission. (2025). *Der Deal für eine saubere Industrie: Ein gemeinsamer Fahrplan für Wettbewerbsfähigkeit und Dekarbonisierung.* Brüssel: Europäische Kommission.

Europäische Kommission. (2026). *Commission Recommendation on revising the European assessment framework for 'safe and sustainable by design' chemicals and materials.* Brüssel: Europäische Kommission.

Europäische Union. (2024). Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte. Amtsblatt der Europäischen Union. Abgerufen am 15. 05 2025 von https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=OJ:L_202401781

Eurostat. (2023). *Eurostat*. Abgerufen am 25. 06. 2026 von https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_cur__custom_13756252/default/table?lang=de

Günther, E. (2018). *Gabler Wirtschaftslexikon.* Abgerufen am 13. 05 2025 von https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/sekundaerstoff-44617/version-267923

Haas, F., Lattacher, W., Lichem-Herzog, C., & Schwarz, E. T. (2025). *Kreislaufwirtschaft - Ein Handbuch für die Praxis.* Graz, Kapfenberg und Klagenfurt: Digital Innovation Hub Süd (DIH Süd).

Halmschlager, V. (2023). *Status Quo: Der Digitale Produktpass - Kreislaufwirtschaftsorientierte Produktion.* Wien: Verein Industrie 4.0 Österreich – die Plattform für intelligente Produktion.

International Organization for Standardization. (2024). *Circular economy — Vocabulary, principles and guidance for implementation (ISO Standard No. 59004:2024).* Abgerufen am 26. 06. 2026 von https://www.iso.org/standard/80648.html

Kasper, T. (2024). *Dissertation: Möglichkeiten zur Gestaltung einer Abfallendebestimmung aus technisch-rechtlicher Sicht.* Leoben, Österreich: Montanuniversität Leoben.

Oberhuber, S., & Rau, T. (2016). *Material Matters.* Berlin: Econ, ISBN: 978-3-430-20268-8.

Oberhuber, S., & Rau, T. (2024). *Turntoo*. Abgerufen am 08. 01 2024 von https://turntoo.com/en/

Pomberger, R. (2024). *Potenziale und Grenzen der (abfallwirtschaftlichen) Kreislaufwirtschaft .* Leoben, Österreich: Montanuniversität Leoben.

Republik Österreich. (2002/2024). *Abfallwirtschaftsgesetz 2002 [AWG 2002].* Republik Österreich.

Rudolph, N., Kiesel, R., & Aumnate, C. (2020). *Einführung Kunststoffrecycling. Ökonomische, ökologische und technische Aspekte der Kunststoffabfallverwertung* (Bde. ISBN 978-3-446-45880-2). München: Hanser-Verlag.

Schürfer, M. (2019). *WEKA Business Medien GmbH*. Abgerufen am 08. 01. 2024 von https://www.materialfluss.de/beleuchtung-bodenreinigung-brandschutz/experten-prognostizieren-starkes-wachstum-fuer-light-as-a-service--laas-.htm

Signify Holding. (2026). Abgerufen am 2026 von https://www.signify.com/de-at/signify-services/managed-services/light-as-a-service

www.deal-magazin.com. (01. 11 2024). Abgerufen am 08. 01. 2024 von http://www.deal-magazin.com/news/129744/Madaster-gewinnt-den-Deutschen-Nachhaltigkeitspreis-2024

www.rau.eu. (05. 06 2023). Abgerufen am 08. 01. 2024 von https://www.rau.eu/wp-content/uploads/2015/03/Design-NL-pavilion-Expo-Osaka-Kansai-Japan-unveiled_AND.pdf

Abfallwirtschaft als Treiber der Kreislaufwirtschaft – Drei sokratische Lehrgespräche über Deutungshoheit

Ulrike Gelbmann[1], Martina Zimek[1] & Josef-Peter Schöggl[1]
[1)] Institut für Umweltsystemwissenschaften, Universität Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Unser Beitrag untersucht die Rolle der Abfallwirtschaft in der Kreislaufwirtschaft Österreichs und fragt, wer die Deutungshoheit über „Abfall“ und „Kreislaufwirtschaft“ besitzt. Dazu werden drei sokratische Dialoge mit fiktiven Vertreter:innen der Entsorgungswirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft geführt. Während die Entsorgungswirtschaft auf Recycling setzt, gestalten Politik und Verwaltung den Wandel durch Regulierung. Die Zivilgesellschaft fordert konsequente Abfallvermeidung sowie langlebige, reparierbare Produkte. Unsere Forschung zeigt, dass unterschiedliche Vorstellungen von Kreislaufwirtschaft zu Konflikten über nachhaltige Strategien führen. Recycling ist wichtig, aber nicht ausreichend. Eine funktionieren-de Kreislaufwirtschaft erfordert das Zusammenwirken von Wirtschaft, Politik und Gesellschaft.

1 EINLEITUNG

Die Abfallwirtschaft in Österreich gilt international als gut organisiert und leistungsfähig, v.a. im Bereich Recycling und Abfalltrennung (López-Portillo, Martínez-Jiménez, Ropero-Moriones, & Saavedra-Serrano, 2021; Marti & Puertas, 2021). Gleichzeitig ist sie eingebettet in politische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Interessenlagen, die bestimmen, wie „Abfall“ definiert wird, welche Lösungen als sinnvoll und welche Akteur:innen als legitimiert gelten, darüber zu sprechen. Gerade im Kontext des Überganges zur Kreislaufwirtschaft wird sichtbar, dass Begriffe wie Ressourcen-nutzung im täglichen Gebrauch umkämpft sind. Die zentrale Frage dieses Beitrags lautet daher: *Dient die Abfallwirtschaft mehr den Menschen, der Umwelt oder der Wirtschaft?* , oder: Wer bestimmt in Österreich, was Kreislaufwirtschaft ist? Diese Frage gliedert sich in folgende Unterfragen:

- Welche Ansichten über Abfall und Kreislaufwirtschaft dominieren in Österreich?
- Welche spezifischen Rollen spielen Entsorgungsunternehmen, Politik/öffentliche Verwaltung und zivilgesellschaftliche Akteur:innen im Abfallwirtschaftssystem?
- Welche Begriffe, Ansichten und Deutungsmuster strukturieren die Debatten und wie werden sie bewertet und legitimiert?

Diese Forschungsfragen leiten uns zu mehreren vorab getroffenen Annahmen für Österreich: So scheinen in erster Linie staatliche und wirtschaftliche Akteur:innen (v.a. das Umweltminis-terium) und diverse Entsorgungs-/Recyclingunternehmen (nachfolgend als Entsorgungsunter-nehmen bezeichnet) die Debatte um Kreislaufwirtschaft zu dominieren. Der Fokus liegt dabei stark auf technologischen Lösungen (Recycling) und weniger auf anderen Strategien, wie z.B. Abfallvermeidung. Kreislaufwirtschaft wird als wirtschaftskompatibles Konzept interpretiert. Kritische Perspektiven wie Postwachstum oder Zero Waste werden an den Rand gedrängt

2 METHODE

Methodisch nutzt unsere Untersuchung eine wissenssoziologische Diskursanalyse (Keller, 2011). Da diese derzeit noch nicht abgeschlossen ist, stellen wir unsere bisherigen Ergebnisse in drei sokratischen Lehrgesprächen dar. Die sokratische Methode (Keum, 2016) stellt Fragen, die den Kern einer Sache freilegen. Sokrates bringt die Menschen durch gezielte Fragen zum Nachdenken (Benson, 2011). Seine Methode will nicht überzeugen, sondern klären, indem Widersprüche offengelegt werden und die Gegenüber die eigenen Annahmen reflektieren. Diese

Form der Analyse eignet sich besonders für abfallwirtschaftliche Themen, die ja zugleich technisch, politisch und „moralisch“ sind. Denn zu klären, was als Abfall gilt oder was ein „Kreislauf“ ist, ist keine reine Sachfrage, sondern eine Frage von Haltung und Werten. Wir versetzen also Sokrates in die heutige Welt und lassen drei fiktive Beteiligte zu Wort kommen: je eine Person aus einem Entsorgungsunternehmen, aus der Politik und aus der Zivilgesellschaft. Jede:r von ihnen beansprucht für sich, den „richtigen“ Umgang mit Abfall zu kennen, doch im sokratischen Streitgespräch zeigt sich, wie unterschiedlich ihre Begriffe von Verantwortung, Nutzen und Sinn tatsächlich sind.

3 ERGEBNISSE

Wir unterscheiden drei zentrale institutionelle Akteur:innen: Zunächst sind da diejenigen, die seit Jahrzehnten uns als Bevölkerung „ent-sorgen“, indem sie uns die Sorge um die Bewältigung zunehmender Abfallmengen und -arten abnehmen: Kommunale und private Abfallunternehmen, Abfallwirtschaftsverbände oder die „Altstoff Recycling Austria” (ARA). An zweiter Stelle stehen Politik- und Verwaltungsorganisationen, Institutionen wie das "Umweltministerium” (BMLUK), das Umweltbundesamt und die abfallrechtlichen Verwaltungseinrichtungen der Länder. Zivilgesellschaftliche Einrichtungen umfassen NGOs wie Zero-Waste, ReUse Austria, Greenpeace, Global 2000. Für alle kommt nachfolgend stellvertretend ein „Avatar“ zu Wort.

3.1 Die Sicht der Entsorgungswirtschaft – Vom Ende her gedacht

Personen: *Sokrates - der Fragende, Erythros - Vertreter eines Entsorgungsunternehmens*
Sokrates: Erythros, du redest oft vom Wert eurer Arbeit. Was ist Zweck der Abfallwirtschaft?
Erythros: Wir halten Städte sauber, schützen die Umwelt und sorgen dafür, dass Materialien im Umlauf bleiben. Durch Digitalisierung können wir heute die Stoffströme besser überwachen, die Rückführung optimieren und Engpässe in der Verwertung frühzeitig erkennen.
Sokrates: Also verwaltet ihr das Ende der Dinge?
Erythros: Eher, was danach kommt. Abfall ist für uns kein Ende, sondern ein neuer Anfang. Wir recyceln, gewinnen also Rohstoffe effizient zurück (Saubermacher Dienstleistungs AG, 2026), erzeugen Energie, und achten auf gesetzliche Vorgaben.
Sokrates: Ihr seht also im Abfall eine Ressource. Doch wer bestimmt, wann etwas Abfall ist?
Erythros: Das Gesetz legt es fest, aber wir entscheiden in der Praxis, ob etwas recycelt, verbrannt oder deponiert wird. Digitalisierung hilft uns, Materialflüsse zu dokumentieren (Saubermacher Dienstleistungs AG, 2026), und die EU bestimmt Mindeststandards für Recyclingquoten und Schadstoffmanagement (Hennebert, Navazas, & Katrakis, 2024).
Sokrates: Dann entscheidet ihr also, was Abfall ist und wie Kreislaufwirtschaft definiert wird?
Erythros: Oder anders ausgedrückt: Wir bewerten das Material, nicht die Absicht.
Sokrates: Ihr beginnt mit dem Ende und schließt den Kreislauf von hinten her durch Technik.
Erythros: Das stimmt, wir denken technisch, also vom Recycling her. Rückgewinnung ist doch der Sinn der Kreislaufwirtschaft (Altstoff Recycling Austria AG, 2025)
Sokrates: Ist sie das wirklich? Oder ist das nur die lineare Wirtschaft mit Rückwärtsgang?
Erythros: (lächelt) Ohne uns würde der Abfall liegen bleiben. Wir sorgen für Ordnung.
Sokrates: Meint ihr Vermeidung oder Verwertung, wenn ihr über Kreislaufwirtschaft sprecht?
Erythros: Realistisch gesehen: an Verwertung. Vermeiden ist Aufgabe der Konsument:innen, der Politik und der Hersteller. (Tichy, Gerold, & Pomberger, 2026)
Sokrates: So haltet ihr den Strom der Dinge am Laufen, aber nicht im “Kreislauf“.
Erythros: Das mag sein. Aber wir schaffen Strukturen, die Kreisläufe möglich machen. Das Pfandsystem auf Einwegflaschen ist ein Beispiel: 81,5 % (Recycling Pfand Österreich, 2026) der Flaschen wurden 2025 zurückgegeben, bis 2027 sollen es 90 % sein (Recycling Pfand Österreich, 2025). Sie bilden das Material für neue Flaschen.

Sokrates: Aber es sind nicht dieselben Flaschen. Sie müssen unter Einsatz von Energie, erneuten Prozessen und langen Transportwegen zu neuen Flaschen verarbeitet bzw. wieder in den Umlauf gebracht werden. Ist das wirklich ein Kreislauf?
Erythros: Besser so, als sie zu verbrennen.
Sokrates: Ok. Aber WER bestimmt, was Kreislaufwirtschaft ist – ihr oder die, die sie fordern?
Erythros: Wir alle reden davon, aber jede:r meint etwas anderes. Für uns heißt Kreislaufw-irtschaft ganz klar: Materialien zurückführen (PET to PET Recycling Österreich GmbH, 2026) Für NGOs: weniger produzieren. Für die Politik: beides zugleich.
Sokrates: Dann ist der Kreislauf selbst zum Streitobjekt geworden.
Erythros: Ja! Und vielleicht hat niemand den ganzen Kreislauf im Blick.
Sokrates (nachdenklich): Wer den Kreis nur vom Ende her denkt, nennt Rücklauf Bewegung.
Erythros: (nickt) Vielleicht ist unser Kreislauf eher Durchfluss, doch immerhin mit Bewusstsein.

3.2 Die Sicht von Verwaltung und Politik – Zwischen Linie und Kreis

Personen: *Sokrates - der Fragende, Xylon - Hoher Verwaltungsbeamter*
Sokrates: Xylon, ich höre, dass Abfall der Spiegel der Gesellschaft ist. Was ist damit gemeint?
Xylon: Hm. Abfall zeigt, was wir wertschätzen und was nicht. Deshalb ist Abfallpolitik immer auch Gesellschaftspolitik. Gesetze wie das österreichische Abfallwirtschaftsgesetz (Abfallwirtschaftsgesetz, 2002) oder EU-Richtlinien (z.B. Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle, Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE)) legen fest, welche Materialien wie zu behandeln sind. Elektroaltgeräte, Verpackungen usw., alles hat klare Vorgaben (EAG-VO, 2005).
Sokrates: Und wer bestimmt jetzt, was Abfall ist?
Xylon: Juristisch gesehen: der Staat. Aber in der Praxis mischen viele mit, wie die Wirtschaft, Wissenschaft, Öffentlichkeit und auch NGOs (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft, 2023)
Sokrates: Also ist Abfall kein Naturzustand, sondern eine politische Konvention (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft, 2023, S. 19).
Xylon: Ganz genau. Wir definieren, wann ein Stoff als Abfall gilt und wann er wieder Produkt sein darf (§ 5 (Abfallwirtschaftsgesetz, 2002).
Sokrates: Und wie hängen Abfall- und Kreislaufwirtschaft dann aus eurer Sicht zusammen?
Xylon: Ein System, das Ressourcen so lange wie möglich im Gebrauch hält, etwa durch Recycling, Wiederverwendung, Reparatur (European Commission, 2020). Aber es geht auch um Steuerung, etwa durch Vorgaben zur Abfallvermeidung, Digitalisierung von Rücknahme-systemen, Monitoring von Recyclingquoten (EAG-VO, 2005).
Sokrates: Und wer bestimmt, dass gerade das „Kreislaufwirtschaft“ ist?
Xylon: (nachdenklich) Wir schaffen Gesetze, definieren Standards, aber der Sinn entsteht im Zusammenspiel von Wirtschaft, Bürger:innen und Umweltverbänden. Jede:r beansprucht, die „wahre“ Kreislaufwirtschaft zu vertreten.
Sokrates: Also ist der Begriff selbst politisch unklar?
Xylon: Man könnte sagen: ja. Für die Wirtschaft ist der Kreis geschlossen, wenn recycelt wird (Heras-Saizarbitoria, Boiral, & Testa, 2023). Für NGOs wiederum nur, wenn gar kein Abfall entsteht. Für uns in Verwaltung und Politik, wenn beides zugleich erreichbar scheint.
Sokrates: Dann seid ihr Mittler zwischen unterschiedlichen Wahrheiten.
Xylon: Oder zwischen unterschiedlichen Perspektiven.
Sokrates: Ist das Pfand auf Einwegflaschen ein Symbol eines Kompromisses?
Xylon: In gewisser Weise schon. Es zeigt, dass Regulierung wirkt. Milliarden an Flaschen kommen zurück (Recycling Pfand Österreich, 2025). Aber sie werden nicht als dieselben wiederverwendet. Das Pfand ist ein Anreiz, der Umweltschutz, Industrieinteressen und Konsumverhalten verbinden soll (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft, 2023).

Sokrates: Verändert das Einweg-Pfand auch das Denken der Menschen?
Xylon: Nein. Es will eine Brücke sein vom Alten zum Neuen. Aber einen Anstoß für eine Veränderung des Denkens liefert es wohl nicht, und es bleibt daher doch beim Alten.
Sokrates (nachdenklich): Wenn man zu lange auf Brücken verweilt, kommt man nicht voran.
Xylon: (lacht) In Politik und Verwaltung leben wir auf Brücken. Und die verbinden Welten.
Sokrates: Also bleibt ihr Architekten des Übergangs, zwischen Technik, Politik und Gesellschaft, ohne selbst zu wissen, wo der Kreislauf wirklich beginnt oder aufhört oder sich schließt.

3.3 Die Sicht der Zivilgesellschaft – Der Sinn des Maßes

Personen: *Sokrates - der Fragende, Hydata - Umweltaktivistin einer NGO*
Sokrates: Hydata, du kämpfst für eine neue Art des Wirtschaftens. Was bedeutet Kreislaufwirtschaft für dich?
Hydata: Kreislaufwirtschaft ist keine technische Kategorie, sondern eine Haltung. Es geht nicht nur um Recycling, sondern um die 6R: Refuse, Reduce, Reuse, Repair, Remanufacture, Refurbish (Potting, Hekkert, Worrell, & Hanemaaijer, 2017). Es soll gar keinen Abfall geben, den müssen wir vorab schon vermeiden. Und wenn er doch anfällt, da unvermeidbar, dann müssen wir Dinge wiederverwenden, reparieren oder aufbereiten, anstatt sie ‚nur' zu recyceln.
Sokrates: Wer entscheidet also, was Abfall ist?
Hydata: Die Industrie, denn sie entwirft Produkte mit kurzem Lebenszyklus, um Konsum zu fördern. Die Politik fördert dies häufig durch unzureichende Vorgaben (Global 2000, 2026).
Sokrates: Also entscheiden die industriellen Produzent:innen darüber, was Abfall ist?
Hydata: Genau. Solange das so bleibt, erscheint Abfall normal und unvermeidlich.
Sokrates: Und welche Rolle spielt der Begriff Kreislaufwirtschaft in diesem Zusammenhang?
Hydata: Die Industrie etikettiert alles als Kreislauf, was recycelt wird, sogar Einwegplastik. Für uns ist das Etikettenschwindel. Echter Kreislauf braucht Ansätze wie langlebige, reparierbare Produkte, ReUse, Second Hand, Aufarbeitung, also ein ganzheitliches (Um-)Denken.
Sokrates: Dann herrscht über den Begriff „Kreislauf" selbst keine Einigkeit?
Hydata: Genau. Für viele ist Kreislauf nur ein besserer Müllsack. Für uns ist er eine Ethik des Maßhaltens und des bewussten Konsumierens.
Sokrates: Aber manche sehen im Einweg-Pfand ein Beispiel für Fortschritt.
Hydata: Das Einweg-Pfand stabilisiert ein schlechtes System (Die Umweltberatung, 2025), statt es zu überwinden. Menschen denken: „Ich tue etwas Gutes, wenn ich Flaschen zurückbringe" und kaufen weiterhin Einwegprodukte. Das geht am eigentlichen Ziel vorbei (WWF, 2024).
Sokrates: Also bestätigt das Pfand den Konsum, anstatt ihn zu hinterfragen?
Hydata: Genau. Ohne Reflexion über Produktdesign, Reparaturkultur und Ressourcenschonung bleibt Recycling nur Technik (Global 2000, 2026).
Sokrates: Wer hat nun aus Ihrer Sicht recht: Wirtschaft, Politik oder Zivilgesellschaft?
Hydata: Vielleicht keiner von uns allen allein. Das Thema Kreislaufwirtschaft ist groß, jede:r sieht nur ein Stück. Und wenn wir den Begriff zu sehr ausdehnen, verliert er seine Kraft.
Sokrates: Dann ist aus ihrer Sicht der Missbrauch des Wortes selbst der größte Abfall.
Hydata: Das ist allerdings richtig. So gesehen, können auch Begriffe verschmutzen.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Am Ende ergeben sich drei Perspektiven, die wie bei einer Triangulation im Vermessungswesen aus unterschiedlichen Winkeln und „Flughöhen" auf die Kreislaufwirtschaft blicken:

- Die Entsorgungswirtschaft sieht als Kreislaufwirtschaft das, was technisch verwertet wird.
- Die Politik nennt Kreislaufwirtschaft das, was sich gesetzlich regeln lässt.
- Die Zivilgesellschaft sieht Kreislaufwirtschaft dort, wo erst gar kein Abfall entsteht.

Wir erhalten folglich drei Definitionen mit vielen Überlappungen, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Übersicht über Akteursgruppen

Akteursgruppe	**Aufgaben/Fokus**	**Beitrag zur Kreislaufwirtschaft**
Entsorgungs-unternehmen	Bereitstellung technischer Lösungen (Sammeln, Sortieren, Recycling, therm. Verwerten)	Technologische Innovation, Effizienzsteigerung, neue Geschäftsmodelle (z. B. Sekundärrohstoffmärkte)
Hoheitliche Verwaltung	Gesetzgebung, Überwachung, strategische Planung	Steuerung durch Regulierung, Förderungen, strategische Ziele
NGOs & Zivilgesellschaft	Bewusstseinsbildung/Sensibilisierung, Innovation, Vernetzung	Gesellschaftliche Akzeptanz, Pilotprojekte, soziale Innovation

Ein tragfähiger Kompromiss entsteht, wenn jede Seite ihre Perspektive relativiert:

- Die Abfallwirtschaft von der Verwertung zur Vermeidung. Dazu braucht es digitale Rückverfolgbarkeit und Rücknahmesysteme sowie Beratung zu Produktdesign.
- Politik/Verwaltung von der Verwaltung zur Gestaltung. Dazu braucht es Vorgaben zu Recycling, Einhaltung (inter)nationaler Normen und klare Leitbilder zur Abfallvermeidung.
- Zivilgesellschaft: Von Anklage zu Kooperation. Dazu braucht es die Sensibilisierung für Vermeidung, Förderung von Reparatur, und vor allem Offenheit für praktische Übergänge.

Wer letztlich die “wahre Definition“ bestimmt, bleibt offen. Vielleicht meint echte Kreislaufwirtschaft, Abfall nicht bequem nach unseren Ansprüchen zu definieren, sondern unsere Zugänge zu verändern. Denn nur wenn die Akteursgruppen zusammenarbeiten, entsteht die wechselseitige Einsicht: *Kreislaufwirtschaft ist kein technischer Prozess allein, sondern ein kultureller Vertrag zwischen Menschen, Dingen und Natur*. Entsorgungsunternehmen sind wichtige operative Akteur:innen, aber nicht automatisch Treiber:innen in systemischer Sicht. Ihr Selbstverständnis als „zentrale Akteur:innen“ ist daher zwar nachvollziehbar, doch analytisch begrenzt. Eine umfassende Kreislaufwirtschaft erfordert Koordination aller strategischen Akteur:innen entlang des gesamten Lebenszyklus. Österreich verfügt über gute Strukturen, braucht aber mehr Integration von Entsorgungswirtschaft, Produktpolitik und Konsumstrategien.

Der vorliegende Beitrag gibt in hoffentlich humorvoller Weise Einblick in unsere derzeitigen Forschungen. Die Ergebnisse unserer Diskursanalyse, bei der wir Veröffentlichungen aller drei Akteursgruppen wissenschaftlich überprüfen, liegen bei der Abgabe des Beitrages nicht voll-ständig vor. Wir hoffen, sie im Rahmen der Recy- und Depotech 2026 präsentieren zu können.

LITERATURVERZEICHNIS

Abfallwirtschaftsgesetz. (2002). *Bundesgesetz Über Eine Nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002)*.

Altstoff Recycling Austria AG. (March 2025). *UPCYCLE Als Meilenstein Der Kreislaufwirtschaft: Österreichs Erste Polyolefin-Aufbereitungsanlage Eröffnet*. Abgerufen am 23. 6 2026 von https://www.ara.at/news/upcycle-als-meilenstein-der-kreislaufwirtschaft-oesterreichs-erste-polyolefin-aufbereitungsanlage-eroeffnet

Benson, H. (2011). Socratic Method. In D. Morrison (Hrsg.), *The Cambridge Companion to Socrates* (S. 179–200). Cambridge: Cambridge University Press.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft. (2023). *Bundesabfallwirtschaftsplan*.

Die Umweltberatung. (2025). *Einwegpfand versus Mehrwegpfand*. Abgerufen am 23. 06 2026 von https://www.umweltberatung.at/einweg-mehrweg-pfand

European Commission. (2020). *A New Circular Economy Action Plan - For a Cleaner and More Competitive Europe*.

Global 2000. (2026). *Schöner ohne Müll*. Abgerufen am 23. 06 2026 von https://www.global2000.at/schoener-ohne-muell

Hennebert, P., Navazas, A., & Katrakis, E. (2024). A Risk-based Approach for Waste Management in the Modern Circular Economy: Propositions from the EU Recycling Industries. *Detritus*, 3-14.

Heras-Saizarbitoria, I., Boiral, O., & Testa, F. (2023). Circular economy at the company level: An empirical study based on sustainability reports. *Sustainable Development, 31*(4), 2307-2317.

Keller, R. (2011). *Wissenssoziologische Diskursanalyse.* Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. doi:10.1007/978-3-531-92058-0

Keum, T.-Y. (2016). WHY DID SOCRATES CONDUCT HIS DIALOGUES BEFORE AN AUDIENCE? *History of Political Thought, 37*(3), 411-437.

López-Portillo, M., Martínez-Jiménez, G., Ropero-Moriones, E., & Saavedra-Serrano, M. (December 2021). Waste Treatments in the European Union: A Comparative Analysis across Its Member States. *Heliyon, 7*(12). doi:10.1016/j.heliyon.2021.e08645

Marti, L., & Puertas, R. (May 2021). Influence of Environmental Policies on Waste Treatment. *Waste Management, 126*, 191–200. doi:10.1016/j.wasman.2021.03.009

PET to PET Recycling Österreich GmbH. (2026). *"Aus alt mach neu" – Der Recyclingprozess*. Abgerufen am 23. 6 2026 von https://www.pet2pet.at/de/recyclingprozess

Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain.* PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

Recycling Pfand Österreich. (2025). *Nach zehn Monaten Einweg-Pfandsystem: Über eine Milliarde Dosen und Flaschen retourniert*. Von https://www.recycling-pfand.at/presse/2025-10-30/nach-zehn-monaten-einweg-pfandsystem-ueber-eine-milliarde-dosen-und-flaschen-retourniert.html abgerufen

Recycling Pfand Österreich. (January 2026). *Das Österreichische Einweg-Pfandsystem – Die Jahresbilanz 2025.* EWP Recycling Pfand Österreich GmbH.

Saubermacher Dienstleistungs AG. (2026). *Forschung & Entwicklung*. Abgerufen am 23. 6 2026 von https://saubermacher.com/unternehmen/forschung-und-entwicklung/

Tichy, S., Gerold, E., & Pomberger, R. (2026). Nachhaltigkeit und Recycling. I. *Triple N, 8*, 4-5.

(2005). *Verordnung Über Die Abfallvermeidung, Sammlung Und Behandlung von Elektrischen Und Elektronischen Altgeräten (Elektroaltgeräteverordnung – EAG-VO).*

(2014). *Verordnung Über Die Vermeidung Und Verwertung von Verpackungsabfällen Und Bestimmten Warenresten (Verpackungsverordnung 2014).*

WWF. (2024). *Wo anfangen für mehr Mehrweg?* Abgerufen am 27. 06 2026 von https://www.wwf.de/themen-projekte/plastik/mehrweg/geeignete-produkte-fuer-mehrweg

Littering in Österreich 2025 – Aufkommen gelitterter und über öffentliche Abfallbehälter erfasster Abfälle

Peter Beigl[1], Benedikt Vay[1], Gudrun Obersteiner[1], Victoria Menedetter[2], Christian Pladerer[2] & Gerhard Fritz[3]
1) Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, BOKU University – Universität für Bodenkultur Wien, Wien, Österreich
2) pulswerk GmbH, Wien, Österreich
3) FHA – Gesellschaft für chemisch-technische Analytik GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Im Auftrag der VKS Verpackungskoordinierungsstelle gemeinnützige Gesellschaft mbH (VKS GmbH) wurde erstmals eine bundesweit repräsentative Erhebung und Hochrechnung von Aufkommen und Zusammensetzung gelitterter und über öffentliche Abfallbehälter erfasster Abfälle in Österreich durchgeführt. Auf Basis des Littering-Leitfadens (Beigl et al., 2022a) wurden 91 nach siedlungsstruktureller Schichtung zufällig ausgewählte Gemeinden mittels Fragebogenerhebung befragt und mittels Sortieranalysen beprobt. Die Hochrechnung ergibt ein bundesweites Litteringaufkommen (inklusive Inhalte öffentlicher Restmüllbehälter) von rund 91.000 Tonnen pro Jahr, wovon 83 % auf öffentliche Restmüllbehälter, 16 % auf manuelles Kehrgut und 0,7 % auf ehrenamtliche Flurreinigung entfallen; Städte tragen mit 75 % den weitaus größten Mengenanteil. Der SUP-relevante Massenanteil liegt je nach Sammelaktivität zwischen 7 % und 10 %, der Volumenanteil zwischen 22 % und 34 %. Die Ergebnisse liefern erstmals eine belastbare Datengrundlage für Bestandsaufnahme, infrastrukturelle Maßnahmen und finanzielle Abgeltung im Rahmen der erweiterten Produzentenverantwortung.

1 EINLEITUNG

Mit Art. 8 der Single-Use-Plastics-Richtlinie (RL 2019/904/EU, „SUP-RL") werden Hersteller bestimmter Einwegkunststoffartikel verpflichtet, die Kosten für Sammlung, Reinigung und Transport von im öffentlichen Raum entsorgten und gelitterten Abfällen im Rahmen einer erweiterten Herstellerverantwortung zu tragen. Eine belastbare Kostentragung setzt eine repräsentative Kenntnis von Aufkommen und Zusammensetzung dieser Abfälle voraus; eine methodisch abgesicherte, bundesweite Erhebung lag für Österreich bislang nicht vor.

Im Auftrag der VKS Verpackungskoordinierungsstelle gemeinnützige Gesellschaft mbH (VKS GmbH) hat ein Konsortium aus BOKU University, pulswerk GmbH und FHA – Gesellschaft für chemisch-technische Analytik GmbH zwischen Oktober 2024 und Mai 2025 erstmals eine bundesweit repräsentative Erhebung und Hochrechnung von Aufkommen und Zusammensetzung gelitterter und über öffentliche Abfallbehälter erfasster Abfälle in Österreich durchgeführt, einschließlich Entleerung öffentlicher Restmüllbehälter, manueller und mechanischer Kehrung sowie ehrenamtlicher Flurreinigung in ausschließlicher Verantwortung der Gemeinden. Der Beitrag stellt Untersuchungskonzept und Methodik (Abschnitt 2), die Ergebnisse zu Sammelmengen und Zusammensetzung sowie die Hochrechnung des bundesweiten Litteringaufkommens (Abschnitt 3) dar und schließt mit Schlussfolgerungen für die Praxis.

2 METHODIK

Die Methodik folgt dem Littering-Leitfaden (Beigl et al., 2022a) und macht auf Basis eines abfallseitigen Erhebungsansatzes Vorgaben zu Grundgesamtheit, Stichprobenplanung, Mengenerhebung, Sortieranalyse und Hochrechnung. Damit weicht diese Methodik von der deutschen Litteringanalyse mit inverkehrsetzungsseitiger Erhebung ab (Wilts et al., 2022).

2.1 Untersuchungskonzept und Grundgesamtheit

Die untersuchte Grundgesamtheit umfasst gelitterte sowie über öffentliche Abfallbehälter erfasste Abfälle im Sinne der SUP-RL – Entleerung öffentlicher Restmüllbehälter, manuelle und mechanische Kehrung sowie ehrenamtliche Flurreinigung – auf Flächen im öffentlichen Eigentum bzw. unter öffentlichem Management, deren Reinigung ausschließlich aus Bundes- oder Landesbudgets finanziert wird. Einzubeziehende Akteure sind ausschließlich Gemeinden, das Untersuchungsgebiet ist das gesamte Bundesgebiet, der Untersuchungszeitraum das Kalenderjahr 2023. Um Verzerrungen wie Volunteer- oder Non-Response-Bias zu minimieren, erfolgten eine siedlungsstrukturelle Schichtung der Gemeinden (städtisch, intermediär, ländlich, touristisch), eine darauf aufbauende geschichtete Zufallsauswahl sowie eine aktive Ansprache über die zuständigen Verbände (Vereinigung öffentlicher Abfallwirtschaftsbetriebe (VÖA), Arbeitsgemeinschaft Österreichischer Abfallwirtschaftsverbände (ARGE AWV)).

2.2 Mengengerüst und Gemeindeauswahl

Als Ausgangsbasis für die Stichprobenplanung diente das Mengengerüst aus einer aktuellen Online-Erhebung (Hauer, 2023). Für einen festgelegten Schwellenwert von 500 Tonnen erwartetem Aufkommen wurde jeweils eine Gemeinde gezogen; Städte über rund 40.000 Einwohner*innen wurden aufgrund des überschrittenen Schwellenwerts fix als Stichprobe einbezogen, in allen übrigen Schichten erfolgte eine gewichtete Zufallsauswahl mit einer Mindestanzahl von 20 Gemeinden je aufkommensschwacher Schicht. Insgesamt wurden so 91 Gemeinden mit 45% der österreichischen Bevölkerung in die Untersuchung einbezogen (Tabelle 1).

Tab. 1: Zu untersuchende Gemeinden nach Stadt-Land-Klassen und Abdeckung der Grundgesamtheit

Stadt-Land-Klasse	Gemeinden gesamt	Bevölkerung (Tsd.)	Gezogene Gemeinden	Abdeckung Bevölkerung
Städtisch (ST)	122	4.221	23	81%
Intermediär (IM)	801	2.771	28	16%
Ländlich (LA)	901	1.576	20	8%
Touristisch (TO)	269	522	20	24%
Summe	2.093	9.089	91	45%

Die Befragung der 91 Gemeinden erfolgte in zwei Durchgängen (Oktober–November 2024 und April 2025) mittels Online-Fragebogen (LimeSurvey), alternativ als PDF-Formular oder telefonisch.

2.3 Sortieranalysen: Fraktionskatalog und Probenahme

Die Zusammensetzung wurde für 18 Analysefraktionen in 12 Fraktionsgruppen mit bzw. ohne SUP-Relevanz gemäß Littering-Leitfaden ermittelt. Die Probenahme bei den teilnehmenden Gemeinden erfolgte durch geschultes Personal der FHA GmbH, der Transport mittels Miet-LKW. Die Sortieranalysen wurden in zwei Durchgängen (November 2024, Mai 2025) am Standort der MA 48 in Wien durchgeführt: Einzelproben wurden verwogen, manuell in die Zielfraktionen sortiert und erneut verwogen; fraktionsspezifische Volumina wurden mittels genormter Behälter geschätzt, Stückzahlen bei jeder fünften Einzelprobe erfasst. Insgesamt wurden 148 Einzelproben mit einer Gesamtmasse von 3.105 kg sortiert.

3 ERGEBNISSE

3.1 Erhobene Sammelmengen

80 der 91 angefragten Gemeinden beteiligten sich an der Mengenerhebung (Rücklaufquote 88%); sie decken 43 % der österreichischen Bevölkerung ab. Die Behälterdichte liegt im Mittel bei rund 19 öffentlichen Abfallbehältern pro 1.000 Einwohner*innen, mit niedrigeren Werten in Großstädten und höheren Werten in touristischen Gemeinden. Das spezifische Sammelvolumen bei öffentlichen Restmüllbehältern ist in Städten etwa um den Faktor 3 höher als in intermediären und touristischen Gemeinden. Manuelles Kehrgut wird nur von wenigen, überwiegend städtischen Gemeinden separat erfasst; die Sammelmenge steigt mit dem Grad der Verstädterung. Ehrenamtliche Flurreinigungsaktionen wurden in 69 der 80 Gemeinden dokumentiert, mit im Schnitt 12 Aktionen pro Jahr in Städten gegenüber 2 bis 3 Aktionen in sonstigen Gemeinden. Wiegedaten lagen für keine dieser Sammelaktivitäten flächendeckend vor, sodass die Mengen überwiegend auf Volumensschätzungen beruhen.

3.2 Zusammensetzung nach Massen- und Volumenanteilen

Der SUP-relevante Massenanteil nach Sammelaktivitäten liegt bei öffentlichen Restmüllbehältern je nach Stadt-Land-Klasse bei 8 bis 11 %, im manuellen Kehrgut bei 2 bis 8 % und bei ehrenamtlichen Flurreinigungen bei 7 bis 8 % ((Abbildung 1). Die Unterschiede zwischen städtischer und intermediärer bzw. touristischer Schicht sind signifikant. Die Volumenanteile liegen deutlich höher, zwischen 22 % und 34 %. Innerhalb der SUP-relevanten Fraktionen dominieren Getränkebehälter mit (aus Sicht vom Projektstart 2024) künftiger Bepfandung, gefolgt von Tüten- und Folienverpackungen ≤400 g, Getränkebechern und Lebensmittelverpackungen ≤400 g; Tabakprodukte mit Filter stellen den größten Stückanteil (rund 60 %), aufgrund des geringen Stückgewichts jedoch nur einen kleinen Massenanteil.

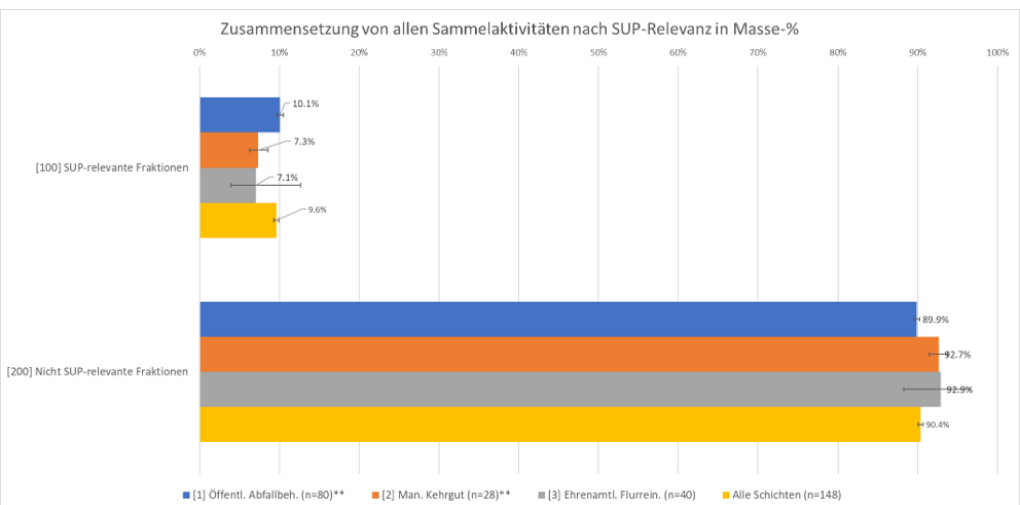


Abb. 1: Zusammensetzung von Litteringabfällen nach Sammelaktivitäten getrennt nach Fraktionen mit bzw. ohne SUP-Relevanz als Massenanteile

3.3 Hochrechnung des bundesweiten Litteringaufkommens

Die Hochrechnung erfolgte auf Basis der sozioökonomischen Schichtung der Gemeinden, der spezifischen Sammelvolumina nach Sammelaktivität und Stadt-Land-Klasse sowie einer eigens ermittelten Schüttdichte der Litteringfraktionen; Unschärfen wurden stochastisch berücksichtigt. Das bundesweite Litteringaufkommen beträgt demnach rund 91.000 Tonnen pro Jahr ± 15 % (Tabelle 2). Städte tragen mit 75 % den weitaus größten Mengenanteil, vor intermediären (19 %), touristischen (4 %) und ländlichen Gemeinden (3 %). Nach Sammelaktivität entfallen 83 % auf öffentliche Restmüllbehälter, 16 % auf manuelles Kehrgut und 0,7 % auf ehrenamtliche Flurreinigung.

Tab. 2: Litteringaufkommen in Österreich nach Stadt-Land-Klassen und Sammelaktivitäten (t/a)

Stadt-Land-Klasse	Öffentl. Restmüllbehälter	Manuelles Kehrgut	Ehrenamtl. Flurreinigung	Summe
Städte	55.494	12.349	210	68.053
Intermediär	15.162	1.664	226	17.053
Ländlich	2.762	31	145	2.937
Touristisch	2.748	408	37	3.192
Österreich	**76.166**	**14.452**	**618**	**91.235**

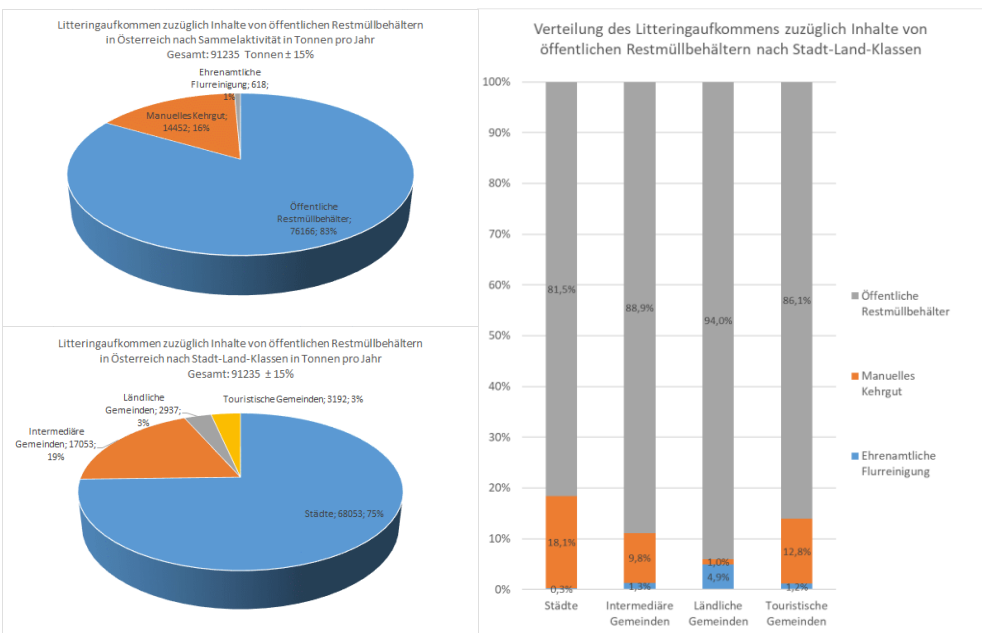


Abb. 2: Litteringaufkommen in Österreich im Überblick nach Sammelaktivitäten, Stadt-Land-Klassen und deren Verteilung (vgl. Abbildung 23 im Endbericht)

Die Zusammensetzung des Litteringaufkommens wurde hinsichtlich Massen- und Volumenanteilen analysiert, mit besonderem Augenmerk auf die Relevanz für die SUP-Richtlinie sowie auf die Packstofftypen innerhalb der SUP-relevanten Fraktionen. Wie aus den Abbildungen 3 und 4 hervorgeht, machen die SUP-relevanten Fraktionen in Summe je nach Sammelaktivität einen Massenanteil von 7 bis 10 Masse-% sowie einen Volumenanteil von 22 bis 34 Volumen-% aus.

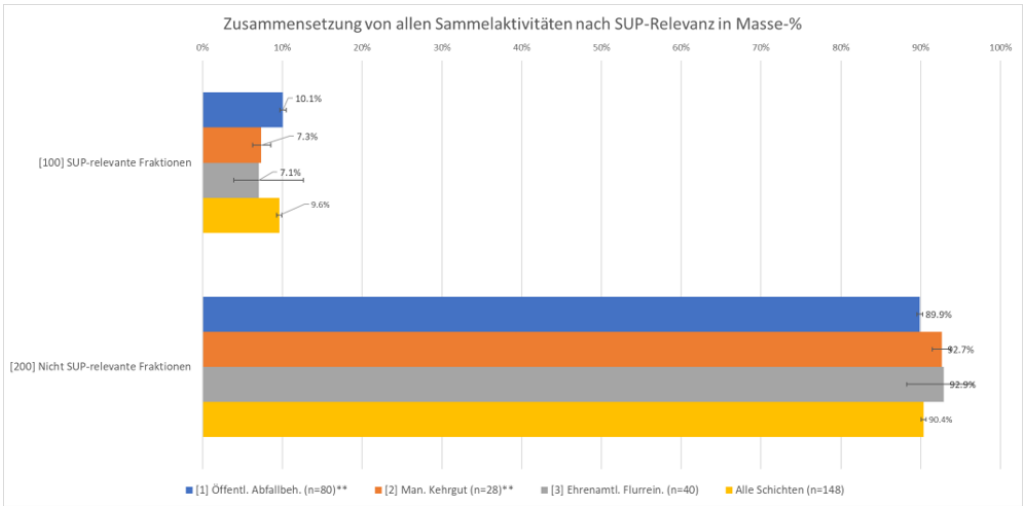


Abb. 3: Zusammensetzung nach Sammelaktivitäten getrennt nach Fraktionen mit bzw. ohne SUP-Relevanz als Massenanteile

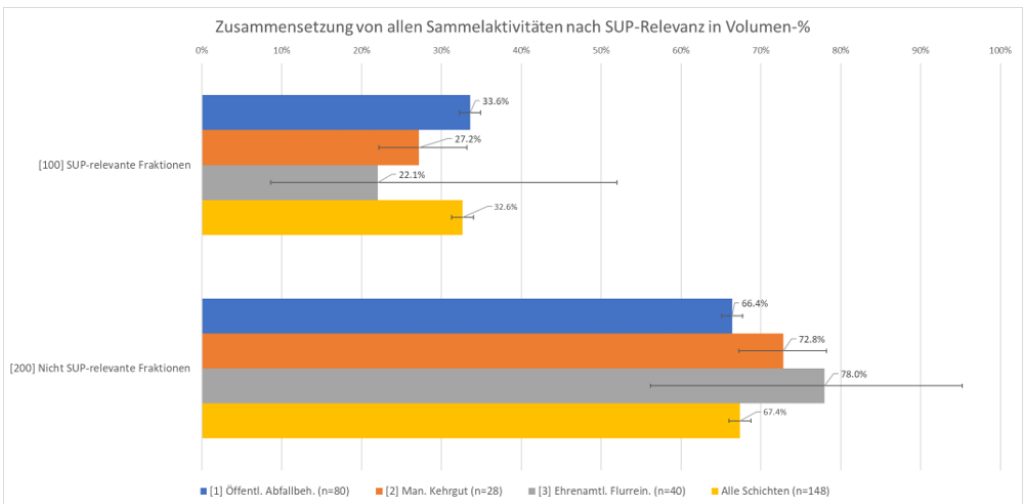


Abb. 4: Zusammensetzung nach Sammelaktivitäten getrennt nach Fraktionen mit bzw. ohne SUP-Relevanz als Volumenanteile

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Mit der vorliegenden Untersuchung liegt erstmals ein methodisch abgesichertes, bundesweit repräsentatives Mengengerüst für gelitterte und über öffentliche Abfallbehälter erfasste Abfälle in Österreich vor. Es bildet eine belastbare Grundlage für Bestandsaufnahme, Planung von Sammelinfrastruktur und finanzielle Abgeltung im Rahmen der erweiterten Produzentenverantwortung nach Art. 8 SUP-RL.

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich ableiten:

- Erstens ist das Litteringaufkommen mengenmäßig stark von Städten und der Entleerung öffentlicher Restmüllbehälter dominiert, während ehrenamtliche Flurreinigung nur einen geringen Mengenanteil, jedoch eine wichtige gesellschaftliche Funktion hat.
- Zweitens sind SUP-relevante Fraktionen massenbezogen ein kleinerer, aufgrund ihres höheren Volumenanteils und ihrer Sichtbarkeit im öffentlichen Raum jedoch praktisch relevanter Teil des Gesamtaufkommens.
- Drittens dominieren darunter Getränkebehälter, was auf mögliche Wechselwirkungen mit dem Einwegpfandsystem hinweist.

Für die Weiterentwicklung wird eine periodische Wiederholung der Erhebung sowie eine vertiefende Analyse einzelner SUP-Fraktionen als Grundlage für eine mögliche Ökomodulation der Herstellerbeiträge empfohlen.

LITERATURVERZEICHNIS

Beigl, P., Happenhofer, A., Ottner, R., Zafiu, C. & Obersteiner, G. (2022a). Littering-Leitfaden – Leitfaden zur Erhebung von Aufkommen und Zusammensetzung gelitterter und über öffentliche Abfallbehälter erfasster Abfälle. Studie im Auftrag des BMK. Wien.

Beigl, P., Allesch, A., Happenhofer, A. & Fritz, G. (2019, adapt. 2022b). Leitfaden für die Planung, Durchführung und Auswertung von Altpapiersortieranalysen. Bericht im Auftrag der ARGE Österreichischer Abfallwirtschaftsverbände u. a. Wien.

Hauer, W. (2023). Littering im Sinne der EU-Richtlinie 2019/904 Artikel 8: Erweiterte Produzentenverantwortung, Ermittlung von Kennzahlen hinsichtlich Aufwand und Kosten für Straßenreinigung. Studie im Auftrag des Österreichischen Gemeindebundes u. a.

Wilts, H., Reuter, R., Eckhardt, M., Kölmel, R., Birnstengel, B., Oexle, A. & Lammers, T. (2022). Erarbeitung eines Kostenmodells für die Umsetzung von Artikel 8 Absatz 2 und 3 der EU-Einwegkunststoffrichtlinie. Abschlussbericht im Auftrag des Umweltbundesamts, UBA-Texte 132/2022.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Mag. Peter Beigl
peter.beigl@boku.ac.at
+43 1 47654 81314
Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, BOKU University
https://boku.ac.at/lawi/abfk

Innovative Strategien zur Steigerung der stofflichen Verwertungsquoten von Sperrmüll

Robert-Balthasar Wudtke[1], Simon Ballüer[1], Yuwei Chang[1], Sreekar Babu Malli[1], Sangit Kadu[1] & Jantje Samtleben[1]
[1] Hochschule Nordhausen, Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe (ThIWert), Deutschland

KURZFASSUNG: Die Forschungsgruppe SeRo.inTech ist ein vom Freistaat Thüringen (Deutschland) gefördertes und vom Europäischen Sozialfonds Plus (ESF+) kofinanziertes Projekt. Es befasst sich mit Sperrmüll, gemischten Bauabfällen und Textilien im Rahmen der Kreislaufwirtschaft im Freistaat. Die Hochschule Nordhausen ist im Projekt für das Teilprojekt Sperrmüll verantwortlich. Im Jahr 2024 fielen in Thüringen etwa 80.000 Tonnen (38 kg pro Kopf) Sperrmüll an, von denen 15 % recycelt, 65 % verbrannt und 20 % deponiert wurden. Obwohl der Sperrmüll wertvolle Sekundärrohstoffe wie Holz, Metalle und Kunststoffe enthält, bleiben die Recyclingquoten aufgrund der hohen Materialheterogenität und des hohen Anteils an Verbundwerkstoffen niedrig, wodurch ein erhebliches Optimierungspotenzial besteht. Das Projekt entwickelt gemeinsam mit regionalen und nationalen Unternehmen praktische Lösungen unter Einsatz der im Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe (ThIWert) verfügbaren Technologien. Ziel ist es, die materialspezifische Sammlung, Sortierung und Aufbereitung zu verbessern, um die Effizienz sowie die Recyclingqualität von Sekundärrohstoffen zu steigern, und zugleich Potenziale zur Dekarbonisierung zu bewerten. Das Forschungsprojekt umfasst die Schwerpunkte Sammlung, Mobilisierung, Aufbereitung sowie das Recycling von Materialien die wirtschaftliche und rechtliche Analyse der Ergebnisse sowie die Bearbeitung der Fragestellung der Dekarbonisierung. Durch die Konzentration auf die genannten Schlüsselbereiche zielt das Ergebnis der Studie darauf, die Recyclingquoten und die Leistung im Bereich der Kreislaufwirtschaft zu verbessern, um Strategien zur Dekarbonisierung im Sperrmüllsektor zu unterstützen.

1 EINLEITUNG

Die Zusammensetzung von Sperrmüll variiert je nach Region in Deutschland. Nach Angaben des Umweltbundesamtes besteht Sperrmüll im Durchschnitt zu 25 – 50 % aus Holz, zu 10 – 20 % aus Metallen, zu 10 – 20 % aus hochkalorischen Materialien und aus inertem Feinmaterial (LUBN, 2023). In Deutschland umfassen die Behandlungsmethoden die Sammlung, Sortierung, Verwertung, energetische Verwertung und Deponierung von Sperrmüll. Der Sperrmüll wird in Deutschland von den kommunalen Abfallwirtschaftsbehörden getrennt gesammelt. Nach der Sammlung wird der Sperrmüll mechanisch und manuell sortiert und anschließend zur weiteren Verarbeitung zerkleinert. Metalle werden durch magnetische Trennung, Wirbelstromabscheidung und manuelle Sortierung zurückgewonnen, während Kunststoffe mittels Nahinfrarotspektroskopie (NIR) identifiziert werden. Holzfraktionen werden aufgrund des hohen Aufwands für die Gewinnung von reinem Material häufig der energetischen Verwertung zugeführt. Ebenso werden Matratzen, Teppiche und Sortierrückstände in thermische Behandlungsanlagen geleitet (ITWM, 2024).

Sperrmüll ist ein heterogener Abfallstrom mit geringer Verwertungsquote und komplexer Materialzusammensetzung, was zu Herausforderungen bei der effizienten Verwertung führt. Im Freistaat Thüringen war die Verbesserung der Rückgewinnung wertvoller Sekundärrohstoffe aus Sperrmüll ein wesentliches Ziel der laufenden Forschung im Rahmen des Projekts. Materialflussindikatoren wurden für Thüringen analysiert und bundesweit verglichen. Daten zu Sammelsystemen, Abfallzusammensetzung und Abfallaufkommen bildeten die Grundlage für die Entwicklung von Strategien zur Abfallmobilisierung und -verwertung. Die Ergebnisse zeigen ein erhebliches Potenzial für eine verbesserte Anfallorttrennung auf. In Zusammenarbeit mit dem Landkreis

Nordhausen und den Südharzwerken Nordhausen wurde ein einjähriger Pilotversuch zur getrennten Sammlung von Altholz aus Sperrmüll durchgeführt. Da Altholz etwa 50 % des Volumens des Sperrmülls ausmacht, ermöglichte die gezielte getrennte Sammlung eine effiziente Verwertung dieser Fraktion. Die wirtschaftliche Bewertung zeigt, dass durch eine angepasste Logistik und getrennte Sammlung die Gesamtentsorgungskosten stabil gehalten und zugleich die Recyclingquote verbessert werden kann (SD, 2025).

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Zusammensetzung der Materialien

In Deutschland umfasst der Sperrmüll eine Vielzahl großformatiger Gegenstände wie Polstermöbel, Teppiche, Matratzen, Möbel und andere Gegenstände, die nicht in die Restmülltonnen passen. Es gibt jedoch einige Gegenstände, die nicht als Sperrmüll entsorgt werden dürfen, auch wenn sie großformatig sind (Types of Waste, 2025). Sperrmüll besteht hauptsächlich aus Holzwerkstoffen, wobei Holzmöbel mit 38,5 % den größten Anteil ausmachen. Polster- und Verbundmöbel bilden mit 22,2 % den zweitgrößten Anteil, gefolgt von sonstigen Holzwerkstoffen mit 6,8 %. Insgesamt macht Holz je nach Gemeinde und Sammelsystem etwa 50–60 % des gesamten Sperrmülls aus. Den zweitgrößten Anteil bilden Textilien, darunter Matratzen, Teppiche und Bodenbeläge, mit 16,1 %. Einschließlich Polstertextilien liegt der Gesamtanteil an Textilien zwischen etwa 16 und 30 %. Kunststoffe, Metalle und Metallverbundstoffe machen etwa 10–15 % der Gesamtmasse aus, während sonstige Gegenstände etwa 4–5 % des Sperrmülls ausmachen (Wagner, 2022). Je nach Region variiert die Zusammensetzung des Sperrmülls in den einzelnen Bundesländern (ITWM, 2024). Das Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz liefert in der Abfallbilanz 2023 keine detaillierten Angaben zur Zusammensetzung des Sperrmülls nach einzelnen Materialarten (LUBN, 2023).



Abb. 1: Spermüllprobe

Zu Versuchszwecken wurde eine von den Stadtwerken Nordhausen bereitgestellte Sperrmüllprobe zur Analyse der Materialzusammensetzung des Sperrmülls untersucht, vgl. Abbildung 1. Der Sperrmüll bestand zu etwa 50 % aus Holz, zu 30 % aus Verbundwerkstoffen, zu 8 % aus Textilien, zu 10 % aus Kunststoffen, zu 1 % aus Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) und zu 1 % aus Altmetall.

2.2 Behandlungsmethoden

2.2.1 Erfassung und Mobilisierung

Im Mittelpunkt der Datenerhebung und -auswertung stand die Verbesserung der Sperrmüllabfuhr und die Steigerung der Verwertungsquote wertvoller Materialien in Thüringen. Die Daten zu Abfallaufkommen, -zusammensetzung und -entsorgungssystemen wurden analysiert, um die derzeitigen Praktiken zu bewerten und Optimierungspotenziale zu ermitteln. In Zusammenarbeit mit dem Landkreis Nordhausen wurde ein Pilotprojekt durchgeführt, dessen Schwerpunkt auf der getrennten Sammlung von Sperrmüllholz und der Sammlung von gemischtem Sperrmüll in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Nordhausen lag. Das System umfasste eine optimierte Logistik, eine verbesserte Routenplanung, eine saisonale Anpassung der Abfuhrtermine sowie überarbeitete Erfassungsverfahren zur getrennten Identifizierung von Sperrmüllholz. Diese Maßnahmen zielten darauf ab, die Verwertung wertvoller Materialfraktionen, insbesondere von Holz, zu steigern und gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit bei der Sammlung und Abfallbehandlung zu gewährleisten.

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden Proben von Sperrmüllholz und gemischtem Sperrmüll getrennt gesammelt. Die Versuche wurden im Labormaßstab sowie im Großmaßstab unter Einsatz einer Multisortieranlage durchgeführt, um die Trennleistung und die Qualität der gewonnenen Sekundärrohstoffe zu bewerten.

2.2.2 Verarbeitung und Recycling

Das Sperrmüllholz wurde einer schrittweisen Verarbeitungskette unterzogen, die aus manueller Sortierung, Zerkleinerung zur Volumenreduzierung, magnetischer Trennung zur Entfernung von Metallverunreinigungen, Siebung zur Klassifizierung der Partikelgröße und einer abschließenden Veredelung mittels moderner Sortiersysteme zur Verbesserung der Materialreinheit und der Verwertungsqualität bestand.

Im Labormaßstab wurden insgesamt 1.200 kg sperriges Holzabfallmaterial verarbeitet und zunächst in die vier Materialkategorien Sperrholz, Spanplatten, Massivholz und Faserplatten sortiert. Das gesammelte Material wurde anschließend mithilfe einer Kombination aus einem Zwei-Wellen-Zerkleinerer und einem Ein-Wellen-Zerkleinerer mechanisch zerkleinert, um eine ausreichende Homogenisierung für die nachgelagerte Trennung zu erreichen. Nach dem Zerkleinern wurde eine magnetische Trennung mittels eines Magnetabscheiders durchgeführt, wobei 15 kg Eisenmetall aus der Gesamtprobe extrahiert wurden. Das verbleibende Material wurde anschließend mithilfe eines Trommelsiebs in zwei Partikelgrößenfraktionen klassifiziert: eine grobe Fraktion größer als 5 mm und eine feine Fraktion kleiner als 5 mm. Die Siebung ergab 43 % grobes Material und 57 % feines Material. Nachfolgend wurden repräsentative Proben jeder gesammelten Holzkategorie unter kontrollierten Bedingungen pyrolysiert, wobei 4 kg der Eingangsproben jeweils 15 Minuten lang bei 650 – 750°C erhitzt wurden. Dieser thermische Umwandlungsprozess erzeugte für jede Holzart etwa 0,75 kg Biokohle, was auf eine konsistente Umwandlungsausbeute über die verschiedenen Holzfraktionen hinweg unter den gegebenen Betriebsbedingungen hindeutet.

Vor der Durchführung der großtechnischen Versuche mit gemischtem Sperrmüll an der Multisortieranlage wurde eine Laboruntersuchung durchgeführt, um das Trennungspotenzial der Sperrmaterialien festzustellen. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf der beim Zerkleinern anfallenden Feinfraktion, die etwa 30 % des gemischten Sperrmülls umfasst. Das Versuchsverfahren bestand für jede Materialart aus einem manuellen Sortieren, einem Vorzerkleinern, einem Nachzerkleinern und einer Siebklassierung. Die Materialproben wurden mit einer ähnlichen Zusammensetzung wie der gemischte Sperrmüll hergestellt und bestanden aus Holz, Metall, Kunststoff,

Glas und Textilien in unterschiedlichen Anteilen. Dieser Ansatz ermöglichte eine systematische Bewertung der Frage, ob die einzelnen Materialfraktionen effektiv getrennt werden können. Die resultierenden Feinfraktionsproben wurden anschließend mit einem Korona-Walzenabscheider für Partikelgrößenbereiche zwischen 0,25 mm und 6 mm sowie mit einem Trockentrennband für Partikelgrößenbereiche zwischen 0,3 mm und 12 mm getestet. Die Laboruntersuchungen lieferten wertvolle Informationen zum Trennverhalten von feinen Sperrmüllmischfraktionen und konnte vor der Hochskalierung des Prozesses auf industrielle Bedingungen berücksichtigt werden.



Abb. 2: Multisortieranlage

Anschließend wurde ein groß angelegtes Experiment mit etwa 8 Tonnen gemischtem Sperrmüll des Landkreises Nordhausen durchgeführt. Die Aufbereitungskette umfasste die Vorbehandlung, Zerkleinerung, Siebsortierung und Sortierung. In der Vorbehandlungsphase wurden große Metallteile und Elektronikgeräte durch manuelle Sortierung entfernt. Anschließend wurde das Material mit einem Zweiwellen-Zerkleinerer verarbeitet. Mit Hilfe eines nach der Zerkleinerung installierten Überband-Magnetabscheiders wurden etwa 480 kg Eisenmetalle aus dem Materialstrom gewonnen. Das verbleibende Material wurde in einer Multisortieranlage aufbereitet. Das zerkleinerte Material wurde in die Multisortieranlage über einen Bunker mit einem Fassungsvermögen von 7 m³ befördert. Während der Materialentnahme aus dem Bunker wurde, ein zusätzlicher Überbandmagnetabscheider eingesetzt, um verbleibende metallische Bestandteile zu entfernen. In der Siebkammer wurde die Siebklassierung unter Verwendung von Sieben mit Maschenweiten von 150 mm und 15 mm, um Grob- und Feinfraktionen zu trennen, realisiert. Material mit einer Korngröße von 15 mm bis 150 mm wurde zur weiteren Trennung in der Multisortieranlage verarbeitet. Die weitere Sortierung wurde mithilfe eines Magnetabscheiders, eines Wirbelstromabscheiders und von auf Nahinfrarot (NIR) basierenden Trenntechnologien ausgeführt. Der Magnetabscheider gewann weitere 240 kg Eisenmetalle zurück, während ein Wirbelstromabscheider 45 kg Nichteisenmetalle (NE) extrahierte. Schließlich wurden Holz und die verbleibenden Materialfraktionen mithilfe der NIR-Sortiertechnologie getrennt. Insgesamt zeigte das groß angelegte Experiment, dass das integrierte Sortiersystem Metalle, Holz und andere Fraktionen effektiv aus gemischtem Sperrmüll trennte und so eine effiziente Materialrückgewinnung sowie eine verbesserte Materialreinheit erreichte.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen

Die Verarbeitungsergebnisse des Großversuchs mit einer Probe von etwa 8 Tonnen Sperrmüll aus der konventionellen kommunalen Sammlung (Gesamtsperrmüllprobe) verdeutlichen das

erhebliche Recyclingpotenzial. Es gelang die Abtrennung von etwa 7 % Eisenmetallen und etwa 1 % Nichteisenmetallen mit einer Reinheit von rund 99 %. Der Holzanteil im Korngrößenbereich von 15 bis 150 mm umfasste etwa 30% des verarbeiteten Sperrmüllstroms. Alle Prozentangaben beziehen sich auf Massenprozente (Gew.-%). Die Holzreinheit lag nach einem ersten optischen Sortierschritt bei rund 80 %. Die größten Herausforderungen bei der weiteren Steigerung der Reinheit ergeben sich aus der Verklumpung von Textilien mit Holz. Hierdurch wird aktuell das Erreichen einer höheren Trennqualität verhindert. Die Reinheit der Restfraktion, die hauptsächlich aus Kunststoffen, Textilien und Glas besteht, liegt bei etwa 60 %, wobei 40 % der Verunreinigungen auf den Holzanteil zurückzuführen sind. Abbildung 3 veranschaulicht die Materialzusammensetzung der Sperrmüllprobe nach der Sortierung in der Multisortieranlage. Die Trennergebnisse für NE-Metall und Fe-Metall sind in Abbildung 4 dargestellt:

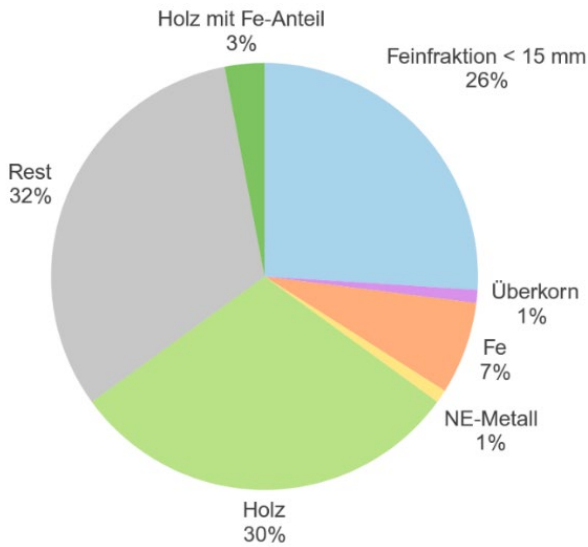


Abb. 3: Zusammensetzung von Sperrmüll


Abb. 4: Ergebnisse der Mehrfachsortierung: NE-Metall (links) und Fe-Metall (rechts)

Die Feinfraktion umfasst nach dem Zerkleinern etwa 26 % des Gesamtabfalls aus. Die Trennung verschiedener Materialien aus dem Gemisch aus feinkörnigem Sperrmüll ist mit Hilfe eines Koronawalzenabscheiders und einer Trockentischabscheidung möglich. Die mit dem Koronawalzenabscheider durchgeführten Versuche zeigten eine geringe Trennleistung, da Textilien im Gemisch des feinkörnigen Sperrmülls waren. Um die Trennleistung zu verbessern, wurde bei der

Feinfraktion ein zweistufiger Trennansatz verfolgt. Die aus der Trockentischabscheidung gewonnenen Versuchsergebnisse zeigen, dass Textilien mit einer Reinheit von 99 % aus der Feinfraktion entfernt werden können. Das textilfreie Material kann anschließend mit Hilfe des Koronawalzenabscheiders getrennt werden. Mit diesem Ansatz wurde bei der Trennung von Holz und anderen Materialien eine Reinheit von mehr als 90 % erzielt. Die Ergebnisse bestätigen sowohl das beträchtliche Recyclingpotenzial als auch die gute Lagerfähigkeit der nach dem Zerkleinern anfallenden Feinfraktion. Durch die Negativsortierung von Verunreinigungen wie Kunststoffen, Textilien und Glas wurde die Holzfraktion, die etwa 60 % der Feinfraktion umfassen, auf eine Reinheit von rund 95 % konzentriert.

Die Ergebnisse der Aufbereitungsversuche zeigen, dass Sperrholzabfälle das größte Recyclingpotenzial in Bezug auf das Volumen aufweisen. Derzeit wird diese Fraktion entweder unsortiert zusammen mit dem restlichen Sperrmüll thermisch behandelt oder nach Sortierung als Biomassebrennstoff zur energetischen Verwertung genutzt. Ist ein stoffliches Recycling von Altholz aus Sperrmüll nicht möglich, stellt die Pyrolyse eine Alternative zur stofflichen Verwertung im Sinne der Altholzverordnung (AltholzV) dar. Die Pyrolysetechnologie bietet einen Verwertungsweg, der zur Reduzierung der CO_2-Emissionen beiträgt, indem Altholz in ein stabiles, kohlenstoffreiches Produkt umgewandelt wird und im Kontext die Verbrennung und langfristige Freisetzung von Kohlenstoff vermieden werden (Lenk, 2024).

Die aus sperrigem Holzabfall hergestellte Biokohle erfüllt die einschlägigen Umweltanforderungen der EBC-Zertifizierungsklassen „EBC-Urban“ für ausgewählte Anwendungen in städtischen Böden sowie „EBC-Consumer Material“ und „EBC-Raw Material“ für Anwendungen außerhalb des Bodens. Dennoch unterstreichen die deutlich höheren Heizwerte (30,7 – 33,9 MJ/kg) der Biokohle ihr Potenzial als nachhaltiger Rohstoff zum Ersatz fossiler Kohlenstoffquellen (Lenk, 2024). Die direkte Pyrolyse von unsortierten Holzabfällen ist ein lohnenswerter Ansatz zur Dekarbonisierung der Industrie und gleichzeitig eine vielversprechende Perspektive im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft. Abbildung 5 unten zeigt die mikroskopische Struktur des sperrigen Holzabfalls vor und nach der Pyrolyse und veranschaulicht die Veränderungen in der Materialstruktur.

3.2 Wirtschaftlichkeits-, Rechts- und Dekarbonisierungsanalyse

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), die Altholzverordnung (AltholzV) und das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) bildeten die wichtigsten rechtlichen Rahmenbedingungen des Forschungsprojekts. Das BEHG ist für die Dekarbonisierung besonders relevant, da die CO_2-Kosten vom Biomasseanteil und den Emissionsfaktoren abhängen. Altholz kann je nach Sortiergrad als teilweise klimaneutral eingestuft werden, was zu niedrigeren CO_2-Kosten führt, während unsortierter Sperrmüll aufgrund seines fossilen Anteils deutlich höhere Kosten verursacht, (UBA, 2014). Es wurde eine vergleichende Lebenszyklusanalyse zwischen der direkten thermischen Behandlung von gemischtem Sperrmüll und der getrennten Sammlung mit materialspezifischer Aufbereitung ausgeführt. Insgesamt zeigen die Ergebnisse des Forschungsprojekts ein großes Anwendungspotenzial, wobei die Aufbereitung von Sperrmüll einen vielversprechenden Weg zur Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen und zur Schonung natürlicher Ressourcen ist.

Zur Berechnung von CO_2-Emissionen über alle Prozesse hinweg wurde eine Ökobilanz (LCA) unter Verwendung der Software „OpenLCA“ mit der Datenbank Ecoinvent und weiteren relevanten Datenquellen ausgeführt. Für die Analyse wurden 2.880 Tonnen Sperrmüll pro Jahr zugrunde gelegt. Die CO_2-Emissionen wurden für die gemischte Sperrmüllsammlung und die getrennte Sperrmüllsammlung verglichen. Die gemischte Sammlung führte zu 4.015 Tonnen CO_2-Äquivalent-Emissionen, während die getrennte Sammlung mit Recycling zu 1.434 Tonnen CO_2-Äquivalent-Emissionen und die getrennte Sammlung mit Pyrolyse zu 788 Tonnen CO_2-Äquivalent-Emissionen führte. Die getrennte Sammlung und das Recycling reduzierten die Emissionen um etwa ein Drittel, während die getrennte Sammlung in Kombination mit Pyrolyse die Emissionen im

Vergleich zum herkömmlichen System um etwa ein Fünftel reduzierte. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die getrennte Sammlung und das hochwertige Recycling von Sperrmüllholz den CO_2-Fußabdruck im Vergleich zu herkömmlichen Behandlungsmethoden erheblich verringern. Insbesondere Materialrecycling und Pyrolyse tragen dazu bei, Emissionen zu vermeiden, die andernfalls durch Verbrennung entstehen würden.



Abb. 5: Pyrolyseergebnisse

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Ökobilanzberechnungen, in denen die CO_2-Äquivalent-Emissionen der herkömmlichen Behandlung von gemischtem Sperrmüll mit Strategien der getrennten Sammlung, einschließlich Recycling und Pyrolyse, verglichen werden.

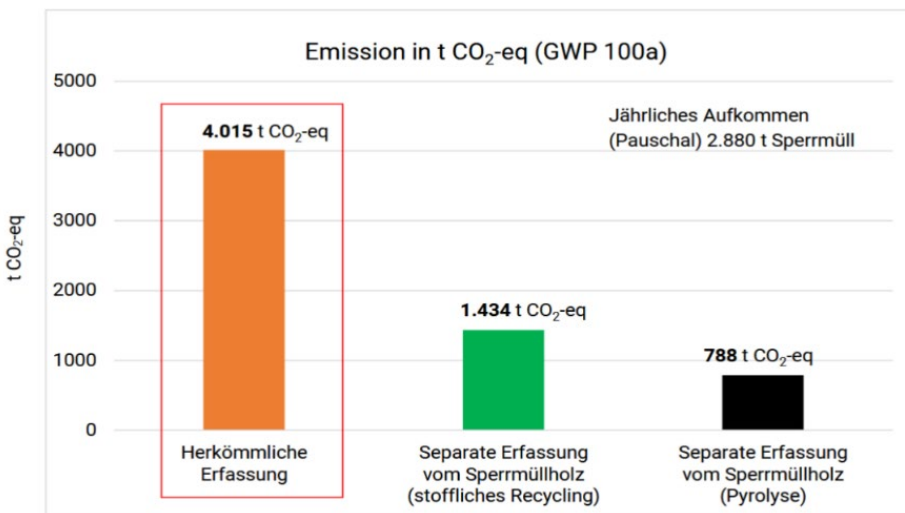


Abb. 6: LCA-Ergebnisse zu den CO_2-Emissionen

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Forschungsergebnisse verdeutlichen das Potenzial des Sperrmüllrecyclings in Thüringen und heben die Option hervor, wertvolle Materialien aus diesem Abfallstrom zurückzugewinnen. Insbesondere der hohe Anteil an Altholz bietet ein beträchtliches Potenzial zur Materialrückgewinnung und trägt zugleich zur Reduzierung von CO_2-Emissionen bei. Pilotversuche zur getrennten Altholzsammlung und zum Einsatz einer modularen Sortieranlage am ThIWert zeigen, dass sowohl grobe als auch feine Sperrmüllfraktionen effizient verarbeitet und getrennt werden

können. Aus den groben Fraktionen wurden Metallanteile mit einer Reinheit von rund 99 % gewonnen, während aus den feinen Fraktionen Holzanteile mit einer Reinheit von bis zu 95 % extrahiert wurden. Die zunehmende Vermischung von Textilien und Holz nach dem Zerkleinern bleibt eine zentrale Herausforderung, welche die Gesamteffizienz der Trennung beschränkt. Aktuell sind die Sperrmüllsammelsysteme in Thüringen nicht standardisiert, was die effiziente Rückgewinnung von wiederverwertbaren Materialien einschränkt. Die Ergebnisse zeigen, dass getrennte Sammlung sowie fortschrittliche Sortiertechnologien die Materialrückgewinnung deutlich verbessern, die Sortiereffizienz und -reinheit steigern und die CO_2-Emissionen im Vergleich zur herkömmlichen Behandlung von gemischtem Sperrmüll senken können. Darüber hinaus erweisen sich das Materialrecycling und die Pyrolyse von Sperrmüllholz als technisch machbar und umweltfreundlich; wobei sie zugleich wirtschaftliche Vorteile gegenüber der thermischen Entsorgung bieten und die Ziele der Kreislaufwirtschaft und Dekarbonisierung unterstützen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass Sperrmüll eine sehr wichtige Ressource für Sekundärrohstoffe ist. Die Kombination aus verbesserten Sammelsystemen, fortschrittlichen Sortiertechnologien und alternativen Verwertungswegen, wie der Pyrolyse, bietet ein beträchtliches Potenzial zur Steigerung der Kreislaufwirtschaftsleistung und zur Unterstützung langfristiger Dekarbonisierungsstrategien im Sperrmüllsektor.

LITERATURVERZEICHNIS

Abfallbilanz 2023 - Daten und Informationen zur Abfallwirtschaft. (2023). Freistaat Thüringen - Landesamt Für Umwelt, Bergbau und Naturschutz: https://tlubn.thueringen.de/fileadmin/000_TLUBN/Umweltschutz/Abfall/Landesabfallwirtschaftsplanung/Abfallbilanz_2023.pdf (abgerufen am...)

Electrical Resistivity of Common Polymers and Plastics. (2025). Matmake: https://matmake.com/properties/electrical-resistivity-of-polymers-and-plastics.html abgerufen am...)

Electrostatic Separation. (2025). ScienceDirect: https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/electrostatic-separation (abgerufen am...)

Extracting Raw Materials from Bulky Waste. (2024). Fraunhofer Institute for Industrial Mathematics ITWM: http://www.itwm.fraunhofer.de/en/departments/mc/non-destructive-testing-terahertz/askivit-waste-wood-recovery-ai-image-processing.html (abgerufen am...)

Lenk, C. Z. (2024). Biochar carbon removal from residues in Germany—assessment from environmental and economic perspectives. *Environmental Research Letters, 19(11), 114072.*

Types of Waste. (2025). Abfallwirtschaft Landkreis Nordhausen: https://abfall-nordhausen.de/abfallarten/#sperrmuell (abgerufen am…)

Wagner, J. (2022). *Evaluation of the Collection and Recovery of Selected Waste Streams for the Further Development of Circular Economy. Vol. 32/2022.* German Environment Agency.

Waste Regulations. (2014). Umweltbundesamt: http://www.umweltbundesamt.de/en/topics/waste-resources/waste-management/waste-regulations (abgerufen am...)

KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Robert-Balthasar Wudtke
robert.wudtke@hs-nordhausen.de
0049 3631 420 337
Thüringer Innovationzentrum für Wertstoffe (ThIWert)
Hochschule Nordhausen
www.hs-nordhausen.de

Turning organic urban waste into bioplastics and single-cell protein by gas fermentation

Maximilian Lackner[1], Charles Moritz[1], Philipp Zanaschka[1], Michael Stadlbauer[1] & David Drew[1]
[1)] CIRCE Biotechnologie GmbH, R&D, Vienna, Austria

ABSTRACT: Urban areas generate large quantities of organic waste, which is typically valorized through composting, anaerobic digestion, or energy recovery. Gas fermentation offers an alternative route to convert waste-derived methane into higher-value products such as single-cell protein (SCP) and bioplastics. In this work, several methanotrophic strains were evaluated for SCP production and benchmarked against *Methylococcus capsulatus (Bath)*. Particular attention was given to strain selection, cultivation stability, and the use of methanol-scavenging microorganisms in co-culture. One newly identified strain, termed V1, achieved sustained biomass productivities of approximately 5 $g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$ during continuous cultivation and maintained stable operation for more than one month. Biomass was successfully recovered and converted into a spray-dried SCP powder, which is currently being evaluated for food and feed applications. A coupled gas fermentation concept is also presented, where CO_2 generated during methane oxidation is supplied together with renewable hydrogen to a second fermentation stage for additional product formation. This approach increases overall carbon utilization and offers the potential for the production of additional SCP and polyhydroxyalkanoates (PHA). The results demonstrate that methane-based gas fermentation can convert waste-derived carbon streams into valuable protein products while contributing to a circular urban bioeconomy.

1 INTRODUCTION

In the quest for defossilization and decarbonization, fermentation processes are being developed as alternative routes for the production of chemicals, fuels, bioplastics, and alternative proteins (Humpenöder et al., 2022; Konzock & Nielsen, 2024; Sharifian et al., 2026). Traditionally, industrial fermentations rely on sugar-based feedstocks derived from agricultural crops such as corn, sugar beet, and sugar cane. However, large-scale deployment of such processes can create competition with food and feed production for arable land (Leger et al., 2021; Searchinger et al., 2018). As a result, considerable research has focused on alternative feedstocks derived from waste streams and renewable carbon sources (Leger et al., 2021; Pikaar et al., 2018; Zhang et al., 2025). Gas fermentation represents a promising alternative due to its scalable and non-food feedstock base (Fackler et al., 2021). Methane (CH_4) can be obtained from a wide range of organic waste streams through anaerobic digestion, landfill gas recovery, and renewable methanation processes (Scarlat et al., 2018). In contrast to lignocellulosic bioprocesses, which require hydrolysis and extensive feedstock pretreatment, gaseous substrates can be purified comparatively easily and supplied directly to microorganisms. Methane can furthermore be produced from captured CO_2 and renewable hydrogen through Power-to-Gas technologies, providing an additional route for carbon recycling (Götz et al., 2016).

The large resource base for methane makes methanotrophic fermentation an attractive platform for sustainable protein production (El Abbadi et al., 2022; Ma et al., 2026). Methanotrophic microorganisms are capable of converting CH_4 directly into microbial biomass rich in protein, commonly referred to as single-cell protein (SCP), while some strains can additionally accumulate polyhydroxyalkanoates (PHA), a family of biodegradable bioplastics (Hanson & Hanson, 1996). The main technical challenge is the low solubility of methane and oxygen in aqueous media, requiring specialized reactor configurations and efficient gas transfer systems to achieve high productivities (Safaeian et al., 2023). A further challenge is that aerobic methane fermentation

generates CO_2 as a metabolic by-product, limiting overall carbon utilization (Lieven et al., 2018; Ross & Rosenzweig, 2017). In this work, several methanotrophic strains were evaluated for methane-based SCP production, including the benchmark strain *Methylococcus capsulatus (Bath)* and newly isolated candidates (Bennett et al., 2018; Jang et al., 2023). Particular emphasis was placed on cultivation stability, productivity, and the use of methanol-scavenging microorganisms in co-culture. In addition, a coupled gas fermentation concept is presented in which CO_2 generated during methane oxidation is supplied together with renewable hydrogen to a second biological conversion stage. This approach enables additional product formation while increasing the overall utilization of waste-derived carbon streams.

2 EXPERIMENTAL

Methane-based single-cell protein (SCP) production was investigated using several methanotrophic strains cultivated in gas fermentation reactors and benchmarked against the industrially relevant strain *Methylococcus capsulatus (Bath*). Particular attention was given to strain selection, cultivation stability, and the development of co-culture systems involving methanol-scavenging microorganisms to improve process performance. Biomass from selected cultivations was recovered and processed into spray-dried SCP powder for subsequent food and feed evaluation.

In parallel, a coupled gas fermentation concept was evaluated to improve overall carbon utilization. Carbon dioxide generated during methane oxidation is supplied together with renewable hydrogen to a second biological conversion stage, enabling further conversion of waste-derived carbon into value-added products including additional SCP and polyhydroxyalkanoates (PHA). Life-cycle assessment (LCA) and techno-economic assessment (TEA) were performed to evaluate the environmental and economic potential of the proposed waste-to-protein process.

3 RESULTS

3.1 Methanotrophic Single-Cell Protein Production

Several methanotrophic strains were evaluated for their suitability for methane-based single-cell protein (SCP) production and benchmarked against the established *strain Methylococcus capsulatus (Bath*). All strains were cultivated using methane as the sole carbon and energy source under aerobic conditions. Growth performance, biomass productivity, and cultivation robustness varied between strains, highlighting the importance of strain selection for industrial SCP production. While *M. capsulatus (Bath)* demonstrated reliable growth and stable biomass production, one newly identified strain, designated V1, showed particularly promising performance. Continuous cultivation of V1 achieved a biomass productivity of approximately 5 $g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$, which was maintained for more than one month of operation. This sustained productivity demonstrates the robustness of the strain under industrially relevant conditions and indicates strong potential for large-scale SCP production. A key factor contributing to the performance of V1 was the exploration of co-culture strategies involving methanol-scavenging microorganisms. Methanol is a known intermediate in methane oxidation and can accumulate under high-productivity conditions. The presence of companion microorganisms capable of consuming methanol is believed to reduce inhibitory effects and improve overall carbon utilization within the culture(Tsapekos et al., 2020). The results suggest that microbial community engineering may represent an important tool for increasing methanotrophic productivity beyond that achievable in pure cultures. Further investigation of the V1 co-culture system, including biomass composition, nutritional properties, and process stability, is therefore warranted. The produced biomass contained the high protein levels characteristic of methanotrophic SCP and was generated directly from methane without the need for primary agricultural feedstocks. To demonstrate downstream process compatibility, V1 biomass was recovered and converted into a stable SCP powder using centrifugation and spray

drying. The resulting product is currently being evaluated for feed and food applications, including assessment of nutritional composition, functionality, and suitability for incorporation into formulated products. These results demonstrate a pathway for converting low-value methane streams from anaerobic digestion, landfill gas, or renewable methane production into a valuable protein ingredient.

3.2 Evaluation of Coupled Fermentation

A second fermentation stage was investigated to improve overall carbon utilization by converting carbon dioxide generated during methane oxidation into additional products. Initial experiments focused on acetogenic lactate production; however, product titers remained too low for practical implementation at industrial scale.

Based on these findings, an alternative coupled fermentation concept was studied. In this approach, carbon dioxide from the methanotrophic reactor is utilized together with renewable hydrogen in a second gas fermentation process. The revised configuration enables the production of additional microbial biomass and polyhydroxyalkanoates (PHA) in the second reactor while simultaneously improving overall carbon utilization.

3.3 Implications for Urban Waste Valorization

Methane-based SCP production is a robust and scalable pathway for upgrading biogas from urban organic waste streams into high-value protein products. The long-term stable operation of V1 at high productivity, supported by co-culture with methanol-scavenging microorganisms, further strengthens the case for industrial deployment. When combined with the newly developed coupled fermentation concept, the process offers the potential to maximize carbon utilization while producing both SCP and bioplastics, contributing to a circular urban bioeconomy.

3.4 *Preliminary Life Cycle Assessment and Techno-Economic Evaluation of Coupled Gas Fermentation*

To assess the environmental and economic performance of the proposed coupled gas fermentation concept, a preliminary Life Cycle Assessment (LCA) and Techno-Economic Analysis (TEA) were conducted for two production pathways: (i) single-cell protein (SCP) production in both the aerobic and anaerobic fermentation stages, and (ii) polyhydroxybutyrate (PHB) production in the aerobic stage combined with SCP production in the anaerobic stage. The assessments considered the complete process chain from urban biowaste conversion into methane and synthesis gas through anaerobic digestion and gasification, followed by gas upgrading, fermentation, downstream processing and product recovery. The analyses were performed using a cradle-to-gate system boundary and evaluated environmental impacts, energy requirements, process economics and scalability. The LCA results demonstrate the importance of carbon recycling within the coupled system. For stand-alone aerobic SCP production, the global warming potential (GWP100) was estimated at approximately 5.82 kg CO_2-equivalent per kilogram of SCP produced. By integrating the anaerobic carbon fixation stage, the climate impact can be reduced substantially, approaching zero under conditions of complete CO_2 recycling. Similar trends were observed for PHB production. Stand-alone methane-based PHB production resulted in an estimated climate impact of approximately 6.4 kg CO_2-equivalent per kilogram of PHB, while coupling the process with anaerobic CO_2 fixation reduced emissions to near-zero levels when complete carbon recycling was achieved. These results highlight the significant contribution of the second fermentation stage to reducing greenhouse gas emissions and maximizing carbon utilization. Beyond greenhouse gas emissions, the process showed additional sustainability advantages. Land use requirements were found to be negligible compared with conventional agricultural protein production, as the process relies on waste-derived gases rather than dedicated crops from arable

land. Water consumption was relatively low and largely associated with process cooling and fermentation media preparation, while most water streams can be recycled internally. The principal environmental hotspots identified by the analysis were electricity demand for aeration and gas compression as well as the production of nutrients such as ammonia. Consequently, further improvements can be achieved through the use of renewable electricity and low-carbon nutrient sources. The techno-economic assessment indicates that the coupled fermentation concept has the potential to become economically competitive at industrial scale. The major cost contributors were identified as aeration, gas compression, oxygen supply and downstream processing operations such as product recovery and drying. Nevertheless, process integration and carbon recycling improve overall resource efficiency and increase product output from a given amount of feedstock. Industrial-scale operation was estimated to achieve production costs in the range of approximately €2 per kilogram of SCP and €2.5 per kilogram of PHB, values that are competitive with several existing alternative protein and bioplastic production routes.

4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The results demonstrate that methane-based gas fermentation represents a promising pathway for converting urban organic waste streams into valuable bioproducts. The high and stable biomass productivity achieved with strain V1 highlights the importance of microbial selection and process adaptation for industrial-scale single-cell protein (SCP) production. Compared with conventional agricultural protein production, methanotrophic SCP production avoids competition for arable land and enables the direct utilization of waste-derived carbon sources(Lackner & Sivanesapillai, 2026; Qian et al., 2026). A key finding of this work is the potential benefit of microbial community engineering through co-cultivation with methanol-scavenging microorganisms. Under high methane conversion rates, intermediate accumulation can limit process efficiency. The improved stability observed in the V1-based system suggests that tailored microbial consortia may provide an effective strategy to enhance carbon conversion and reactor robustness beyond the performance of pure cultures. However, aerobic methane oxidation inherently leads to the release of CO_2 as a by-product, reducing overall carbon efficiency. The coupled fermentation concept addresses this limitation by integrating a second biological conversion step for CO_2 utilization. The preliminary LCA indicates that carbon recycling has a major impact on the environmental performance of the process, with the potential to substantially reduce greenhouse gas emissions compared with stand-alone fermentation systems. Similarly, TEA suggests that process integration can improve resource efficiency and increase product yield per unit of feedstock. The main challenges for further scale-up remain related to gas transfer, energy demand for compression and aeration, nutrient supply, and downstream processing. Future optimization should therefore focus on reactor design, renewable energy integration, and improved product recovery strategies. In addition, comprehensive evaluation of biomass composition, safety, and regulatory requirements will be required to enable application of methanotrophic SCP in food and feed markets. The presented approach illustrates how coupling methane oxidation with biological CO_2 fixation can transform waste-derived carbon into both protein and bioplastic products. This integrated biorefinery concept supports the transition from linear waste management towards a circular urban bioeconomy.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded by the Austrian research promotion agency FFG under grant number 903872 (project “ABATE”), which is gratefully acknowledged.

REFERENCES

Bennett, R. K., Steinberg, L. M., Chen, W., & Papoutsakis, E. T. (2018). Engineering the bioconversion of methane and methanol to fuels and chemicals in native and synthetic methylotrophs. In *Current Opinion in Biotechnology* (Vol. 50, pp. 81–93). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.11.010

El Abbadi, S. H., Sherwin, E. D., Brandt, A. R., Luby, S. P., & Criddle, C. S. (2022). Displacing fishmeal with protein derived from stranded methane. *Nature Sustainability*, *5*(1), 47–56. https://doi.org/10.1038/s41893-021-00796-2

Fackler, N., Heijstra, B. D., Rasor, B. J., Brown, H., Martin, J., Ni, Z., Shebek, K. M., Rosin, R. R., Simpson, S. D., Tyo, K. E., Giannone, R. J., Hettich, R. L., Tschaplinski, T. J., Leang, C., Brown, S. D., Jewett, M. C., & Kodiepke, M. (2021). Stepping on the Gas to a Circular Economy: Accelerating Development of Carbon-Negative Chemical Production from Gas Fermentation. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, *12*, 439–470. https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-120120-021122

Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., & Kolb, T. (2016). Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable Energy*, *85*, 1371–1390. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066

Hanson, R. S., & Hanson, T. E. (1996). Methanotrophic bacteria. *Microbiological Reviews*, *60*(2), 439–471. https://doi.org/10.1128/mr.60.2.439-471.1996

Humpenöder, F., Bodirsky, B. L., Weindl, I., Lotze-campen, H., Linder, T., & Popp, A. (2022). Projected environmental benefits of replacing beef with microbial protein. *Nature*, *605*, 90–96. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04629-w

Jang, N., Jeong, J., Ko, M., Song, D. U., Emelianov, G., Kim, S. K., Rha, E., Kwon, K. K., Kim, H., Lee, D. H., Lee, H., & Lee, S. G. (2023). High Cell-Density Cultivation of Methylococcus capsulatus Bath for Efficient Methane-Derived Mevalonate Production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *71*(12), 4924–4931. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c00286

Konzock, O., & Nielsen, J. (2024). Trends in Biotechnology TRYing to evaluate production costs in microbial biotechnology. *Trends in Biotechnology*, *42*(11), 1339–1347. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2024.04.007

Lackner, M., & Sivanesapillai, A. (2026). Contribution of C1 Biotechnology to the Achievement of the United Nations ' Sustainable Development Goals. *Bioengineered*, *13*, 505.

Leger, D., Matassa, S., Noor, E., Shepon, A., Milo, R., & Bar-Even, A. (2021). Photovoltaic-driven microbial protein production can use land and sunlight more efficiently than conventional crops. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *118*(26), e2015025118. https://doi.org/10.1073/pnas.2015025118

Lieven, C., Petersen, L. A. H., Jørgensen, S. B., Gernaey, K. V., Herrgard, M. J., & Sonnenschein, N. (2018). A Genome-Scale Metabolic Model for Methylococcus capsulatus (Bath) Suggests Reduced Efficiency Electron Transfer to the Particulate Methane Monooxygenase. *Frontiers in Microbiology*, *9*, 2947. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02947

Ma, Y., Liu, T., Li, C., & Guo, J. (2026). Converting greenhouse gas methane to microbial Protein: The state-of-the-art and future prospects. *Bioresource Technology*, *459*(June), 135259. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2026.135259

Pikaar, I., Matassa, S., Bodirsky, B. L., Weindl, I., Humpenöder, F., Rabaey, K., Boon, N., Bruschi, M., Yuan, Z., Van Zanten, H., Herrero, M., Verstraete, W., & Popp, A. (2018). Decoupling Livestock from Land Use through Industrial Feed Production Pathways. *Environmental Science and Technology*, *52*(13), 7351–7359. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00216

Ma, J., Wang, L., Guo, L., Chai, T., & Chen, X. (2026). Biological conversion of methane to organic molecules: towards a low-carbon bioeconomy. *National Science Review*, *13*(2). https://doi.org/10.1093/nsr/nwaf547

Ross, M. O., & Rosenzweig, A. C. (2017). A tale of two methane monooxygenases. In *Journal of Biological Inorganic Chemistry* (Vol. 22, Issues 2–3, pp. 307–319). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/s00775-016-1419-y

Safaeian, P., Yazdian, F., Khosravi-Darani, K., Rashedi, H., & Lackner, M. (2023). P3HB from CH4 using methanotrophs: aspects of bioreactor, fermentation process and modelling for cost-effective biopolymer production. In *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* (Vol. 11). Frontiers Media SA. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1137749

Scarlat, N., Dallemand, J. F., & Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, *129*, 457–472. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006

Searchinger, T. D., Wirsenius, S., Beringer, T., & Dumas, P. (2018). Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature*, *564*, 249–253. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0757-z

Sharifian, P., Amiri, A., McClements, D. J., Kubiak, M., Favaro, L., Maggo, S., Singh, A., & Pratap-Singh, A. (2026). Single-cell proteins: fermentation pathways, nutritional quality and digestibility, and a techno-economic and environmental outlook for sustainable scale-up. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *66*(17), 3218–3246. https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2598807

Tsapekos, P., Zhu, X., Pallis, E., & Angelidaki, I. (2020). Proteinaceous methanotrophs for feed additive using biowaste as carbon and nutrients source. *Bioresource Technology*, *313*(April), 123646. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123646

Zhang, C., Fei, Q., Fu, R., Lackner, M., & Tan, T. (2025). Economic and sustainable revolution to facilitate one-carbon biomanufacturing. *Nature Communications*, *16*(January), 4896. https://doi.org/10.1038/s41467-025-60247-w

CONTACT

PD DI Dr. Maximilian Lackner MBA
m.lackner@circe.at, +4368181826762
CIRCE Biotechnologie GmbH, http://www.circe.at

Composting trials of certified degradable plastics - Comparison of rotting conditions in mesh bags compared to open windrow composting

Christian Zafiu[1], Benedikt Vay[1], Maximilian Straka[1] & Erwin Binner[1]
[1)] BOKU University, Department of Landscape, Water and Infrastructure, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

ABSTRACT: Compostable plastics are made from biodegradable polymers that can be degraded quickly under controlled conditions. In addition to tests on the mineralization behaviour on a laboratory scale, in which the plastics have to be degraded to more than 90 % after 6 months, fragmentation studies are also carried out on a pilot scale or under practical conditions. The plastics must meet the condition that less than 10 % of the originally used mass disintegrates into fragments > 2 mm within 3 months. Under industrial conditions, such proof requires a large amount of material to ensure a reliable recovery rate. In order to reduce the amount of material and reduce the scale of investigation, the plastics are often installed in mesh bags to be able to locate them again after the treatment time and to check their fragmentation behaviour. The separation of the material by the mesh bags represents a barrier for the exchange of moisture and microorganisms, especially since the material is not turned (homogenized) in the bags and cannot mix with the rest of the windrow. Therefore, it is unclear whether the results from degradation investigations with mesh bags can be transferred to the degradation behaviour in the windrow or alternative test setups must be developed.
In the present work, rotting materials in mesh bags were treated in a composting plant that carries out open windrow composting according to the Austrian state of the art. The rotting material in the mesh bags and that from the windrow were examined for parameters that indicate the rotting conditions and the rotting status of the material in order to draw conclusions about the significance of such test results for degradation tests.

1 INTRODUCTION

According to the Austrian Compost Ordinance, plastics are defined as impurities that reduce the quality of compost (BMLFUW, 2001), determining the applicability of the compost. The main source of plastic contamination in composts is misdirected plastic objects via bins for source separate collection of bio-waste. Since only large plastics can be separated from composts during final processing, smaller plastics sometimes, that fragment from larger ones during the composting process, remain in larger quantities in the compost, which is used as a soil conditioner in agriculture (Weithmann et al., 2018; Zafiu et al., 2023) This causes a transfer of plastics to agricultural soils, where they come into contact with soil organisms and can enter the food chain by plant take up (Wong and Taylor, 2025). The persistence of plastics makes it a long-term contamination with unknown consequences for soil health. The most common plastic contaminations are food packaging materials and bags, that are often discarded together with food waste. In such cases, such materials could be substituted by biodegradable alternatives that can be degraded during a composting process and will not contain undegraded materials in the final compost (Binner et al., 2025).

Such materials must fulfil standards according to which the basic compostability can be tested (EN13432, 2008) the test conditions often deviate from practice. Field tests allow to assess the behaviour of materials and products to be investigated under practical conditions (Binner et al., 2025; CbDP, 2026). Test materials can be introduced by using open dose methods or enclosing the materials in mesh bags and burying them in the windrow. The open dosing method is closer to the practice, but needs large amounts of test specimen, that may be lost via wind transport. However, open dosing allows for objecting the specimen to the various factors of the composting

process, such as turning, in the same way as the impurities that they should replace. In mesh bag experiments much less specimen is needed, that can be localized in the windrow. While both methods have advantages and disadvantages they can deliver practice results. However, small specimen, such as coffee cups or pads and tea bags that must mandatorily be made from compostable materials under the Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR, 2024), are difficult to retrieve from composts and can be investigated only in mesh bags. Prevalent rotting conditions can differ, when bags are used and gas and humidity transport may be inhibited that lead to different degradability profiles in bulk rotting material compared to mesh bags, which may be considered when full scale composting experiments are performed in mesh bags. For identifying critical rotting parameters that are affected in mesh bags buried in windrows, a full-scale experiment was conducted, and typical rotting parameters were assessed and compared to the bulk windrow.

2 MATERIAL AND METHODS

The field trial was carried out in a commercial composting plant (operated according to Austrian state of the art) in Lower Austria conducting open windrow system, ventilated in the first four weeks by pipes that are embedded in the floor slab. In the plant, triangular windrows of 2 m height and 100 m length are built from separately collected organic waste from households (60%), shredded bulky yard wastes (20%) and screen overflow from previous composting processes (10-150 mm; 20%). The windrows are turned weekly. Temperature is monitored by wireless lances. For this experiment, rotting material was added to individual mesh bags (polyester, mesh size approx. 3 mm). For each sampling event, three mesh bags were filled. The individual mesh bags were placed in three jute leaf bags with mesh sizes of 1 cm together with “windrow material” to facilitate the location of the samples. After setting up the windrow, part of the “windrow material” was lifted off by a wheel loader, the jute bags were placed in the resulting gap and covered with rotting material (Fig. 1 schematic drawing). The position of the jute bags was marked by rods in order to remove the samples during the weekly turning operations. During the turning, employees of the institute were present and took samples for the laboratory in weeks 0, 1, 2, 4, 8 and at the end of the maturation (14 weeks). Bulk controls were taken from the pack together with three 50 l samples of the “windrow material”.

The rotting material from the jute bags and from the open rotting is homogenized in the laboratory (shredding and grinding) and examined for loss on ignition (LOI), TOC, TC, TIC, total N, conductivity, pH, NH_4-N and NH_3-N, as well as humic acid concentration and volatile carboxylic acids in order to evaluate the rotting process of the open windrow and to determine the differences to the rotting material in the mesh bags. The investigations were carried out in accordance with the Compost Ordinance (BMLFUW, 2001) Annex 5.

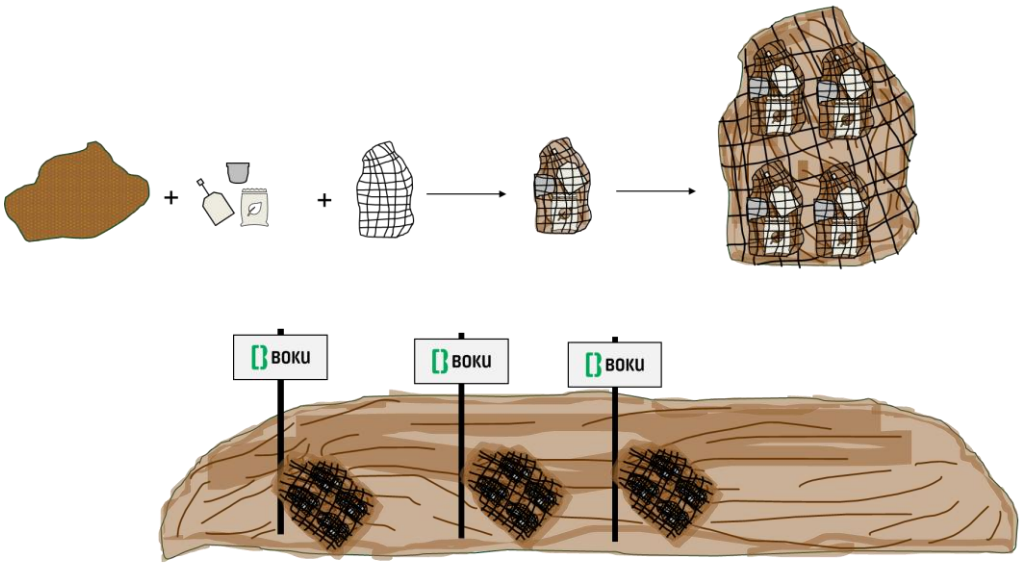


Fig. 1 Schematic experimental design of composting trial. Above: fresh rotting material is filled on site in mesh bags (3 pieces in each individual sample). A theoretical addition of specimen is also shown in form of typical small sized compostable objects. Several of these individual samples are filled into a large jute (leaf) bag together with fresh rotting material. Below: the large jute bag is brought into the windrow and attached to a marking/sign.

3 RESULTS AND DISCUSSION

During the sampling, rotting material was taken from the surrounding windrow ("bulk") and from rotting material inside the mesh bags ("bag"). By comparing the two rotting materials, it is possible to conclude that different rotting conditions exist to deduce whether the degradation conditions within the mesh “bags” were comparable to the “bulk” conditions during open windrow composting according to the state of the art. The water content plays a central role in composting, as too little water content inhibits microbial activity, and too much water content hinders the supply of air into the rotting material (Richard et al., 2002). (Note: the samples at the time 0 weeks show the same value "bulk" as well as "bag"). A water content > 40 % is necessary to enable efficient aerobic biodegradation. This target value was met both inside and outside the mesh bags by the second week. Water losses occur due to the degradation, hydrolysis, of rotting material and evaporation due to the high rotting temperatures and the high waste air amount leaving the windrow (Fig. 2). Such losses occur especially during the intensive rotting phase in the first few weeks. After the second week, a steadily lower water content was observed within the mesh bags (Fig. 3 A). To compensate for this difference the bags were saturated with water again in week 4 and week 8. The windrow was moistened during the weekly turning operations, whereby the mesh bags were removed before and reinstalled after turning, and therefore water can only penetrate the bags after reinstallation. The respiration activity (AT_4) showed similar values for rotting material inside and outside the mesh bags, whereby the AT_4 value outside the mesh bags dropped to < 15 mg O_2 in the second week and from this point on remained lower than the value of the rotting material inside the mesh bags (Fig. 3 B). Since the water content is adjusted before the AT_4 measurement, the high values inside the mesh bags can be explained by the rotting delay due to low water content during the rotting test, restarting biological activity after an ideal water content was adjusted again. Another reason is probably the composition of the rotting material within the mesh bags, which contained smaller particles and less structural material. In contrast, coarse structural material contains a high proportion of wood and leaves. This assumption is also supported by

total organic carbon value (TOC, Fig. 3 D) and loss on ignition, which also indicate a higher relative organic carbon content in the material outside the mesh bags. The relative total nitrogen content was very similar for both rotting samples and, as expected, increased due to the faster breakdown of carbohydrates (Fig. 4 B). Relative inorganic carbon (TIC) remained low and constant around 1 % (Fig. 3 C). Decreasing ammonium and nitrate values (Fig. 4 C and D) within the first 8 weeks were determined both inside and outside the mesh bags. An increase in the ammonium and nitrate values of the rotting material outside the mesh bags can be explained by the screening process (after 8 weeks), which homogenizes the sample, breaks up aggregates (increase of NH_4-N) and introduces significantly more air into the material (increase of NO_3-N). In contrast, the nitrate value of the rotting material within the mesh bags hardly changed, as these samples were not screened and were installed directly in the post-rotting after additional moistening. The pH values of both rotting materials initially dropped due to the formation of carboxylic acids and rose to a slightly alkaline range from the second week onwards (Fig. 4 A). This process can also be seen in the dropping in concentrations of low carboxylic acids (not shown), which (together with ammonia) are responsible for unpleasant odour emissions during intensive rotting phase. An increase in pH and a decrease in carboxylic acids indicate aerobic conditions during the rotting process. Conductivity (not shown) is a measure of the salt content in the rotting material, which decreases in the course of composting, because on the one hand carboxylic acids are broken down and soluble salts are discharged with the leachate.

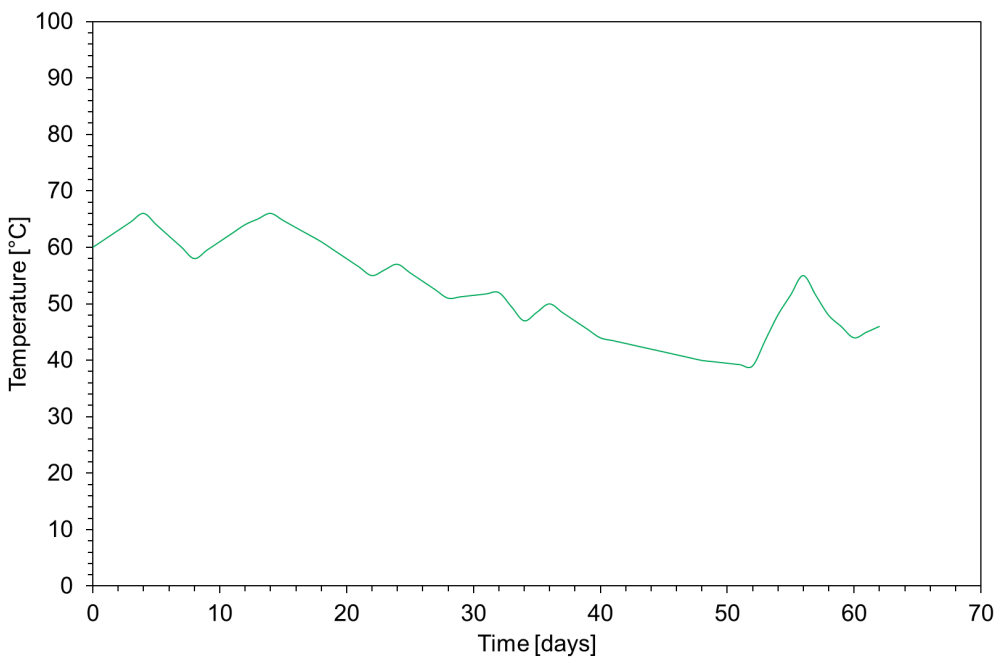


Fig. 2: Interpolated rotting temperature of the windrow during the composting trial.

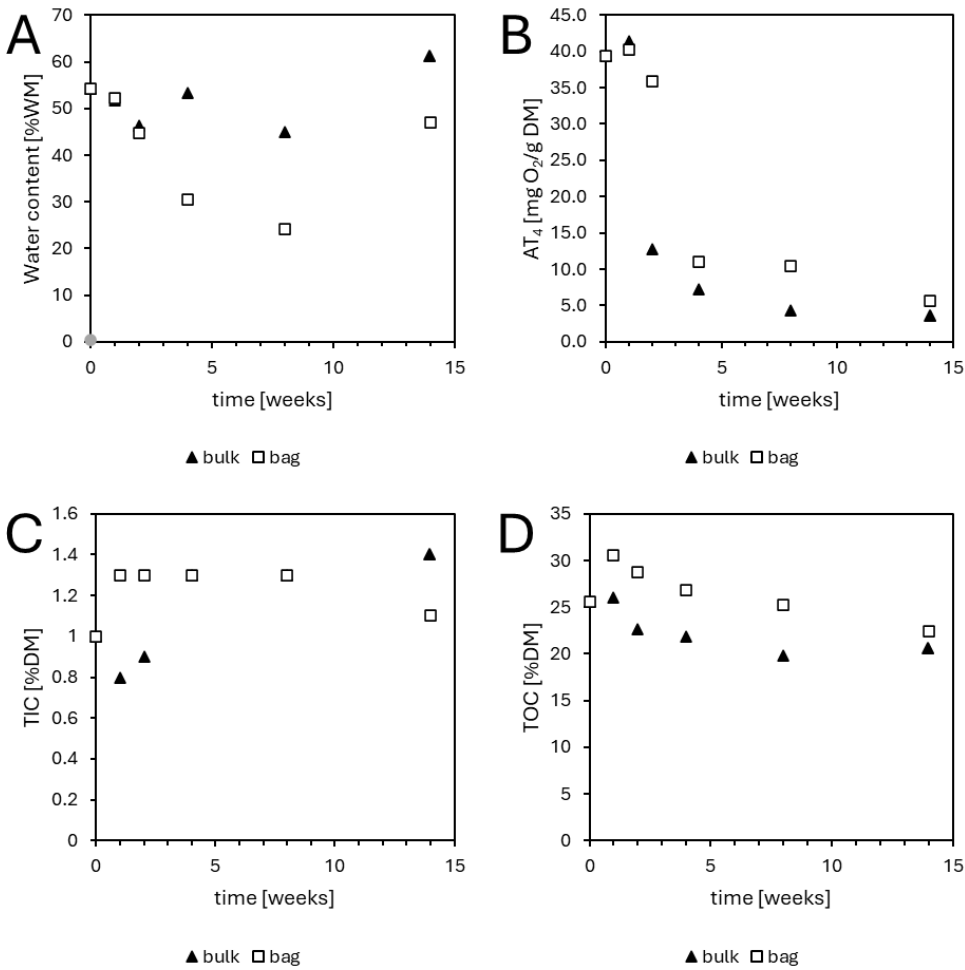


Fig. 3: A) Water content, B) AT_4, C) TOC and D) TIC of the rotting material from the windrow ("bulk" black triangles) and from the mesh bags ("bag" white rectangles).

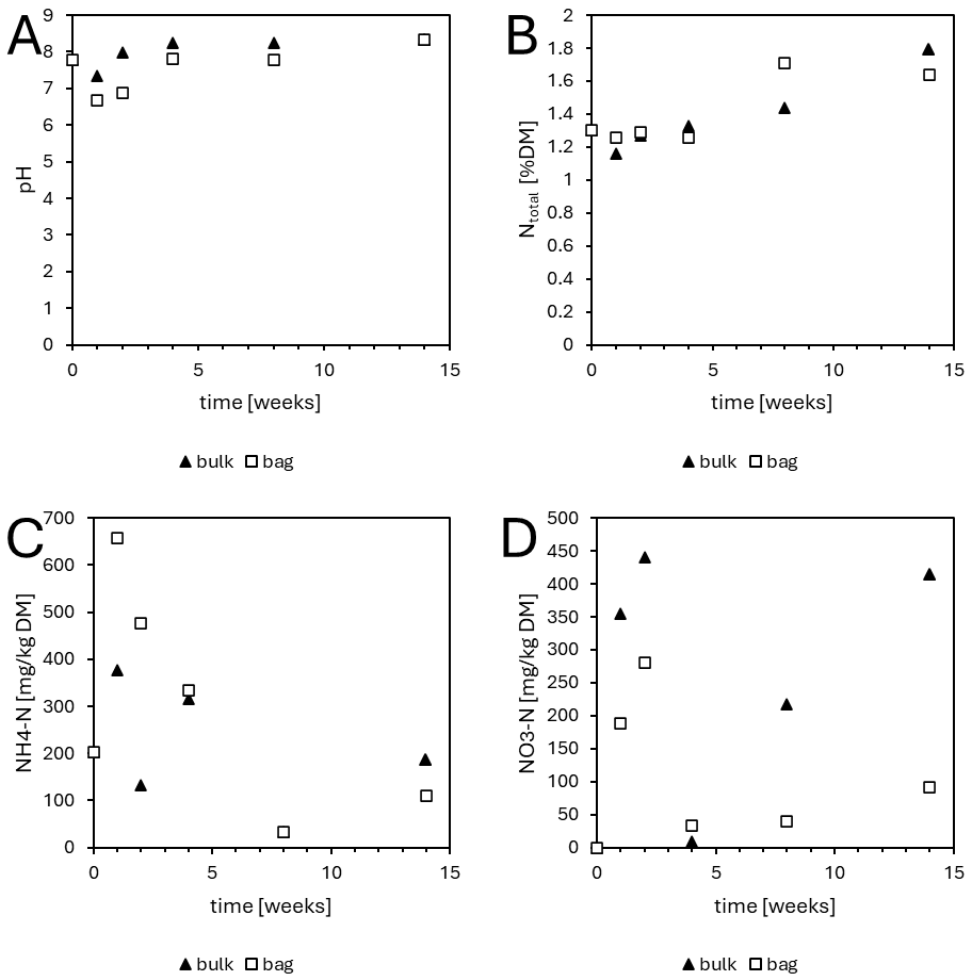


Fig. 4: A) pH-value, B) total nitrogen, C) ammonium-nitrogen content and D) nitrate nitrogen content of the rotting material from the windrow ("bulk" black triangles) and from the mesh bags ("bag" white rectangles).

The comparison of the rotting material inside and outside the mesh bags, (the latter corresponds to the undisturbed windrow material), shows differences that affect the degradation of the compostable plastics in such trials. Smaller rotting material was used for the mesh bags (exclusion of rigid woody components), which has a higher and more stable carbon content (compared to nitrogen) due to the high cellulose and lignin content, while vegetable and fruit residues have a higher protein content (more nitrogen). This change in composition seems to be responsible for the preservation of the water content during the first two weeks of the rotting process. In addition, the material within the mesh bags also has a significantly higher AT_4 in week two, which indicates a higher amount of easily aerobic degradable material or an inhibition of degradation, which is made up for at later times. Between the second and eighth week, the water content in the mesh bags could not be maintained despite strong moistening of the mesh bags during sampling in the following weeks. The windrow itself was moistened during each turning process. Due to the low water content in the mesh bags (week 4 to 8), the degradation conditions were unfavorable. Therefore, after the eighth week, when the main composting process was

finished and the rotting material screened for maturation phase, the net bags were again strongly moistened, installed with the sieved rotting material in the maturation (screened material) and treated there until week 14.

4 CONCLUSION

Mesh bags with small mesh sizes are useful to localize small test materials (e.g. teabags, coffee pads and cups, etc.) in full scale composting experiments. However, those mesh bags demand a more rigorous maintenance during the composting process, as they need to be localized and removed before turning to avoid damage and dissipation, before the materials are placed back into the windrows. As water is often added to the windrow during the turning process, the rotting materials in small bags are not humidified sufficiently if they are only placed back into the humidified windrow and need a separate water addition. However, water addition is not trivial as humidity drops only after two weeks in the present case and needs to be closely monitored. Due to differences in the humidity the degradability conditions for compostable items are unfavorable and could result in a failure of the tested plastic specimen to degrade. Therefore, the water content must be controlled frequently and adjusted for mesh bag experiments to become more comparable to the bulk material in upcoming field trials regarding compostable packages that will penetrate European markets due to the novel PPWR.

REFERENCES

Binner, E., Zafiu, C., Beigl, P., Vay, B., Huber-Humer, M., 2025. *Investigation on the formation of microplastics from compostable plastic bags during the rotting process in field tests*. Journal of Material Cycles and Waste Management 27, 4301-4311.

BMLFUW, 2001. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen (Kompostverordnung), in: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, U.u.W. (Ed.), Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich II Nr. 292/2001.

CbDP, 2026. FRAMEWORK AND BEST PRACTICE GUIDE FOR FIELD-TESTING THE DISINTEGRATION OF COMPOSTABLE PACKAGING AND PRODUCTS IN INDUSTRIAL COMPOSTING PLANTS. Compostable by Design Plattform.

EN13432, 2008. *Packaging - Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation - Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging* (consolidated version).

REGULATION (EU) 2025/40 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 December 2024 on packaging and packaging waste, amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC, in: COUNCIL, E.P.A.O.T. (Ed.), 40. EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, (PPWR) Official Journal of the opean Union.

Richard, T.L., Hamelers, H.V.M., Veeken, A., Silva, T., 2002. *Moisture relationships in composting processes*. Compost Sci Util 10, 286-302.

Weithmann, N., Möller, J.N., Löder, M.G.J., Piehl, S., Laforsch, C., Freitag, R., 2018. *Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment.* Science Advances 4, eaap8060.

Wong, A.E., Taylor, G., 2025. *Plants and microplastics: Growing impacts in the terrestrial environment.* Front Plant Sci 16.

Zafiu, C., Binner, E., Beigl, P., Vay, B., Ebmer, J., Huber-Humer, M., 2023. *The dynamics of macro- and microplastic quantity and size changes during the composting process.* Waste management (New York, N.Y.) 162, 18–26.

CONTACT

Assoc. Prof. Priv.Doz. Mag. Dr. Christian Zafiu
christian.zafiu@boku.ac.at
+43 1 476 54 – 81327
Universität für Bodenkultur Wien, Department für Landschaft, Wasser und Infrastruktur, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Muthgasse 107/3, A-1190 Wien
www.boku.ac.at

Tsunami oder perfekte Welle? Wie die EU-Textilgesetzgebung neue Spielräume für Nachhaltigkeit und Innovation eröffnet

Andreas Bartl[1]
[1)] TU Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Mit der verpflichtenden getrennten Sammlung von Textilien ab 2025 sowie der Einführung von Extended Producer Responsibility (EPR)-Systemen bis 2028 schafft die Europäische Union neue Rahmenbedingungen für die textile Kreislaufwirtschaft. Gleichzeitig stehen bestehende Sammel-, Sortier- und Verwertungssysteme unter zunehmendem wirtschaftlichem Druck. Der Beitrag analysiert die aktuellen regulatorischen Entwicklungen und diskutiert die zentralen Herausforderungen für die Transformation der europäischen Textilwirtschaft. Im Fokus stehen die Krise bestehender Sammel- und Wiederverwendungsmärkte, die Grenzen von Sortierung und Recycling sowie die Entwicklung tragfähiger Absatzmärkte für textile Rezyklate. Die Ergebnisse zeigen, dass die erfolgreiche Umsetzung der europäischen Textilgesetzgebung weniger von zusätzlichen Sammelmengen als vielmehr von funktionierenden Stoffströmen, leistungsfähigen Schnittstellen und einer ausreichenden Nachfrage nach Sekundärrohstoffen abhängen wird.

1 EINLEITUNG

Die europäische Textilwirtschaft befindet sich in einem tiefgreifenden Transformationsprozess. Steigende Mengen an Textilabfällen, zunehmende Umweltwirkungen globaler Wertschöpfungsketten sowie die rasche Verbreitung von Fast- und Ultra-Fast-Fashion-Geschäftsmodellen erhöhen den Druck auf Politik, Industrie und Abfallwirtschaft. Gleichzeitig geraten bestehende Sammel-, Sortier- und Wiederverwendungssysteme zunehmend an ihre wirtschaftlichen Grenzen. Sinkende Qualitäten der Sammelware, volatile internationale Absatzmärkte sowie steigende Behandlungs- und Entsorgungskosten verschärfen die Krise der europäischen Alttextilwirtschaft (European Commission, 2022; European Environment Agency, 2024; European Recycling Industries Confederation, 2025).
Vor diesem Hintergrund verfolgt die Europäische Union im Rahmen des European Green Deal sowie des Circular Economy Action Plan eine umfassende Neuausrichtung der europäischen Textilpolitik. Mit der verpflichtenden getrennten Sammlung von Textilien ab 2025, der Einführung von EPR-Systemen bis spätestens 2028 sowie zusätzlichen Anforderungen an Produktdesign und Stoffstromtransparenz sollen Sammlung, Wiederverwendung und Recycling künftig deutlich ausgebaut werden (European Parliament Council of the European Union, 2018, 2024, 2025).
Der Beitrag analysiert die aktuellen regulatorischen Entwicklungen und diskutiert die zentralen Herausforderungen der zukünftigen textilen Kreislaufwirtschaft. Im Fokus stehen die Krise bestehender Sammel- und Wiederverwendungsmärkte, die Entwicklung tragfähiger Rezyklatmärkte sowie die Steuerung von Stoffströmen entlang der Verwertungskette.

2 REGULATORISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

2.1 Von der getrennten Sammlung zur Produzentenverantwortung

Mit der „EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles“ verfolgt die Europäische Union das Ziel, die Textilwirtschaft schrittweise von einem linearen zu einem kreislauforientierten System weiterzuentwickeln (European Commission, 2022).
Einen wesentlichen Meilenstein stellte die Novellierung der Abfallrahmenrichtlinie im Jahr 2018 dar. Mit der Richtlinie (EU) 2018/851 wurden die Mitgliedstaaten verpflichtet, spätestens ab dem 1. Jänner 2025 getrennte Sammelsysteme für Alttextilien einzuführen. Aufbauend darauf wurde im Jahr 2025 die verpflichtende Einführung von EPR-Systemen für Textilien und Schuhe beschlossen. Die Mitgliedstaaten müssen die entsprechenden Vorgaben innerhalb von 20 Monaten in nationales Recht umsetzen und die Systeme bis spätestens April 2028 etablieren (European Parliament and the Council of the European Union, 2018, 2025).

2.2 ESPR und Digital Product Passport

Die ESPR adressiert die Produktgestaltung und soll die Kreislauffähigkeit von Produkten verbessern. Ein zentrales Instrument ist der Digitale Produktpass, der künftig Informationen zur Materialzusammensetzung und relevanten Nachhaltigkeitsmerkmalen bereitstellen soll (European Parliament Council of the European Union, 2024).
Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass einzelne Nachhaltigkeitsziele nicht zwangsläufig miteinander vereinbar sind. Anforderungen an Langlebigkeit, Funktionalität und Recyclingfähigkeit können in einem Spannungsverhältnis zueinanderstehen. Die Entwicklung geeigneter Produktanforderungen erfordert daher eine ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus, um Zielkonflikte und Fehlanreize zu vermeiden (Joint Research Centre, 2023).

3 DIE EIGENTLICHEN HERAUSFORDERUNGEN DER TEXTILEN KREISLAUFWIRTSCHAFT

3.1 Krise der Sammel- und Wiederverwendungsmärkte

Über viele Jahre basierte die europäische Alttextilwirtschaft auf einem vergleichsweise stabilen Marktmodell. Die getrennte Sammlung von Alttextilien finanzierte sich überwiegend über Erlöse aus der Wiederverwendung. Ein erheblicher Anteil der gesammelten Textilien konnte nach der Sortierung als Second-Hand-Ware vermarktet werden und deckte die Kosten für Sammlung, Logistik und Sortierung (European Environment Agency, 2024; Watson et al., 2023).
Dieses Marktmodell gerät jedoch zunehmend unter Druck. Die weltweite Textilproduktion ist kontinuierlich gestiegen und überschritt im Jahr 2024 erstmals 130 Millionen Tonnen Fasern pro Jahr (Textile Exchange, 2025). Gleichzeitig führen Fast- und insbesondere Ultra-Fast-Fashion-Geschäftsmodelle zu kürzeren Nutzungsdauern und einer sinkenden Qualität der gesammelten Alttextilien (European Environment Agency, 2024).
Parallel dazu verändern sich die internationalen Absatzmärkte. Viele Importländer sind mit wachsenden Mengen minderwertiger Textilien konfrontiert und verschärfen ihre Anforderungen an Second-Hand-Importe. Gleichzeitig wächst der politische Druck, textile Abfälle verstärkt innerhalb Europas zu verwerten. Die bisherige Abhängigkeit europäischer Sammel- und Sortiersysteme von internationalen Wiederverwendungsmärkten entwickelt sich dadurch zunehmend zu einem wirtschaftlichen Risiko (European Environment Agency, 2024; European Recycling Industries Confederation, 2025).
Steigende Sammelmengen, sinkende Erlöse und höhere Anforderungen an Sortierung und Verwertung setzen bestehende Geschäftsmodelle zunehmend unter Druck. Zahlreiche europäische Sammel- und Sortierbetriebe berichten von steigenden Kosten bei gleichzeitig rückläufigen

Erlösen aus dem Verkauf von Second-Hand-Textilien und Sortierfraktionen (European Recycling Industries Confederation, 2025).

3.2 Grenzen von Sortierung und Recycling

Die steigenden Mengen getrennt gesammelter Alttextilien erhöhen den Druck auf Sortier-, Aufbereitungs- und Recyclingkapazitäten. Für zahlreiche Textilien sind zwischen Sortierung und eigentlichem Recycling zusätzliche Schritte der Vorbereitung zum Recycling erforderlich. Dazu zählen mechanische, chemische oder biotechnologische Verfahren, die komplexe Materialverbunde auftrennen und definierte Stoffströme für nachgelagerte Recyclingprozesse bereitstellen (Sandin & Peters, 2018).
Eine wesentliche Herausforderung liegt in der zunehmenden Komplexität moderner Textilien. Mischgewebe, Elastananteile sowie unterschiedliche Ausrüstungs- und Veredelungsverfahren erschweren die stoffliche Verwertung erheblich (Kähling et al., 2025). Hochwertige Recyclingverfahren erfordern jedoch möglichst homogene Materialströme und stellen damit hohe Anforderungen an Sortierung und Stoffstrommanagement (Boschmeier et al., 2025; Depope et al., 2025).
Moderne Sortiertechnologien ermöglichen die Identifikation und Separierung unterschiedlicher Textilfraktionen, können komplexe Materialverbunde jedoch nicht auflösen. Insbesondere bei Mischgeweben wie Polyester/Baumwolle oder Textilien mit Elastan sind zusätzliche Aufbereitungsschritte erforderlich, um recyclingfähige Materialströme bereitzustellen. Die eigentliche Trennung der Faserkomponenten erfolgt somit nicht durch die Sortierung selbst, sondern durch nachgelagerte Aufbereitungsverfahren (Lilek et al., 2026; Spyridis et al., 2024).
Zahlreiche hochwertige Faser-zu-Faser-Recyclingverfahren befinden sich zudem noch am Beginn der industriellen Skalierung. Die Einführung getrennter Sammelsysteme allein reicht daher nicht aus, um eine hochwertige Kreislaufführung von Textilien sicherzustellen. Erforderlich sind vielmehr Investitionen in Sortierinfrastruktur, Vorbereitung zum Recycling und industrielle Recyclingkapazitäten.

3.3 Fehlende Märkte für textile Rezyklate

Neben den Herausforderungen bei Sammlung, Sortierung und Recycling stellt die Entwicklung tragfähiger Absatzmärkte für textile Rezyklate eine der zentralen Voraussetzungen für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft dar (Joint Research Centre, 2021).
Die Herstellung textiler Rezyklate ist mit zusätzlichen Kosten für Sammlung, Sortierung, Vorbereitung zum Recycling und Recycling verbunden. Dadurch liegen die Materialkosten häufig über denen vergleichbarer Primärrohstoffe. Gleichzeitig stellen potenzielle Abnehmer hohe Anforderungen an Reinheit, Farbe, Faserlänge und mechanische Eigenschaften, die durch Recyclingprozesse nicht immer vollständig erreicht werden können (Joint Research Centre, 2021; Textile Exchange, 2025).
Die erfolgreiche Integration textiler Rezyklate erfordert daher eine enge Abstimmung zwischen Sammlung, Sortierung, Vorbereitung zum Recycling, Recycling und den späteren Anwendern der Sekundärrohstoffe. Gleichzeitig muss die Nachfrage nach Rezyklaten deutlich gestärkt werden. Ohne tragfähige Absatzmärkte besteht die Gefahr, dass zusätzliche Sammel- und Recyclingkapazitäten aufgebaut werden, ohne dass die erzeugten Sekundärrohstoffe dauerhaft in industrielle Wertschöpfungsketten integriert werden können.
Neben freiwilligen Industrieinitiativen werden daher zunehmend regulatorische und marktbasierte Instrumente diskutiert, darunter Mindestrezyklatgehalte, Green Public Procurement sowie langfristige Liefervereinbarungen (Joint Research Centre, 2023; Organisation for Economic Co-operation Development, 2024).

4 ANFORDERUNGEN AN EINE FUNKTIONIERENDE TEXTILE KREISLAUFWIRTSCHAFT

Die Einführung von EPR-Systemen schafft erstmals einen europaweit verbindlichen Finanzierungsmechanismus für die textile Kreislaufwirtschaft. Gleichzeitig unterscheidet sich der Textilsektor von anderen EPR-Bereichen, da bereits heute komplexe Sammel-, Wiederverwendungs- und Verwertungsstrukturen existieren. Die zentrale Herausforderung liegt daher weniger im Aufbau neuer Systeme als vielmehr in der Steuerung von Stoffströmen und der Vernetzung bestehender Akteure.

4.1 Vom Abfallmanagement zum Stoffstrommanagement

Die europäische Textilwirtschaft steht vor einem grundlegenden Paradigmenwechsel. Während Alttextilien in der Vergangenheit überwiegend aus Sicht der Abfallwirtschaft betrachtet wurden, rücken künftig zunehmend Rohstoff- und Stoffstromperspektiven in den Vordergrund. Ziel ist nicht mehr allein die Sammlung und Behandlung von Alttextilien, sondern die möglichst hochwertige Rückführung der enthaltenen Materialien in neue Wertschöpfungsketten (European Commission, 2020).
Diese Entwicklung erfordert eine stärkere Differenzierung der Stoffströme. Während für die Wiederverwendung insbesondere Produktzustand und Gebrauchstauglichkeit entscheidend sind, stehen für Recyclingprozesse Materialzusammensetzung, Reinheit und Prozesskompatibilität im Vordergrund. Die Anforderungen an Sammlung, Sortierung und Vorbereitung zum Recycling steigen dadurch erheblich (European Environment Agency, 2024).

4.2 Schnittstellen zwischen Sammlung, Sortierung und Recycling

Die Herausforderungen der textilen Kreislaufwirtschaft liegen häufig weniger in den einzelnen Prozessen selbst als vielmehr an den Schnittstellen zwischen Sammlung, Sortierung, Vorbereitung zum Recycling, Recycling und Rezyklateinsatz. Die erfolgreiche Umsetzung zukünftiger Kreislaufsysteme erfordert daher eine stärkere Vernetzung der beteiligten Akteure entlang der gesamten Verwertungskette.
Bereits auf Ebene der Sammlung bestehen unterschiedliche Anforderungen. Während wiederverwendbare Textilien möglichst unbeschädigt und in hoher Qualität erfasst werden sollten, stehen für Recyclingprozesse Materialzusammensetzung und Stoffstromreinheit im Vordergrund. Die Anforderungen der Wiederverwendung und des Recyclings sind somit nicht immer deckungsgleich. Dennoch spricht vieles dafür, beide Verwertungswege innerhalb gemeinsamer Sortier- und Aufbereitungsstrukturen zu organisieren. Dadurch können Textilien entsprechend ihrer Qualität und Materialzusammensetzung effizient der Wiederverwendung, der Vorbereitung zum Recycling oder dem Recycling zugeführt werden (Watson et al., 2023).
Eine weitere zentrale Schnittstelle besteht zwischen Sortierung und Vorbereitung zum Recycling. Moderne Sortiertechnologien ermöglichen die Identifikation und Separierung unterschiedlicher Textilfraktionen, können jedoch Mischgewebe und andere komplexe Materialzusammensetzungen nicht auflösen. Die Anforderungen der Recyclingunternehmen wirken daher unmittelbar auf die erforderliche Sortiertiefe sowie auf die Qualität der bereitgestellten Stoffströme zurück.
Die erfolgreiche Transformation der Textilwirtschaft wird daher wesentlich davon abhängen, inwieweit es gelingt, stabile Schnittstellen zwischen Sammlung, Sortierung, Vorbereitung zum Recycling, Recycling und Rezyklateinsatz zu schaffen.

4.3 Rezyklate als Schlüssel zur Kreislaufwirtschaft

Letztlich entscheidet nicht die Sammlung von Alttextilien über den Erfolg einer Kreislaufwirtschaft, sondern die Fähigkeit, die daraus gewonnenen Sekundärrohstoffe dauerhaft in industrielle Wertschöpfungsketten zu integrieren. Rezyklate stellen damit das zentrale Bindeglied zwischen Abfallwirtschaft und Produktion dar.
Während für zahlreiche Primärrohstoffe etablierte und globale Märkte existieren, befinden sich die Märkte für textile Rezyklate vielfach noch in einer frühen Entwicklungsphase. Die Kombination aus höheren Produktionskosten, schwankenden Qualitäten und fehlenden Nachfrageimpulsen erschwert den Markthochlauf vieler Recyclinglösungen (Joint Research Centre, 2021; Textile Exchange, 2025).
Für die zukünftige Entwicklung der textilen Kreislaufwirtschaft wird daher die Schaffung geeigneter Marktbedingungen entscheidend sein. Neben technologischen Innovationen werden insbesondere Maßnahmen zur Stärkung der Nachfrage nach Sekundärrohstoffen an Bedeutung gewinnen. Dazu zählen beispielsweise Mindestanforderungen an Rezyklatgehalte, öffentliche Beschaffung mit Kreislaufwirtschaftskriterien, langfristige Liefervereinbarungen sowie freiwillige Brancheninitiativen. Darüber hinaus könnte die stärkere Integration europäischer Rezyklate in industrielle Wertschöpfungsketten einen wichtigen Beitrag zur Stärkung der europäischen Recyclingwirtschaft leisten und gleichzeitig die Abhängigkeit von importierten Primärrohstoffen reduzieren.
Auch für Österreich ergeben sich daraus neue Chancen. Die getrennte Sammlung von Alttextilien wird zusätzliche Stoffströme verfügbar machen. Voraussetzung für deren hochwertige Verwertung sind jedoch funktionierende Märkte für textile Rezyklate.

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die europäische Textilwirtschaft befindet sich derzeit in einem tiefgreifenden Transformationsprozess. Mit der verpflichtenden getrennten Sammlung von Textilien ab 2025, der Einführung von EPR-Systemen sowie neuen Anforderungen an Produktdesign und Stoffstromtransparenz schafft die Europäische Union die regulatorischen Voraussetzungen für eine stärkere Kreislaufführung von Textilien.
Die Analyse zeigt jedoch, dass die Herausforderungen der textilen Kreislaufwirtschaft weit über neue regulatorische Vorgaben hinausgehen. Steigende Sammelmengen, sinkende Qualitäten der Sammelware sowie wirtschaftlich unter Druck stehende Wiederverwendungs- und Recyclingmärkte erschweren den Aufbau funktionierender Kreislaufsysteme. Gleichzeitig erhöhen komplexe Materialzusammensetzungen die Anforderungen an Sortierung, Vorbereitung zum Recycling und stoffliche Verwertung
Die erfolgreiche Transformation der Textilwirtschaft erfordert daher einen Perspektivwechsel vom klassischen Abfallmanagement hin zu einem integrierten Stoffstrommanagement. Entscheidend wird künftig nicht allein die Sammlung zusätzlicher Mengen sein, sondern die Fähigkeit, hochwertige Materialströme bereitzustellen und die Schnittstellen zwischen Sammlung, Sortierung, Vorbereitung zum Recycling, Recycling und Rezyklateinsatz effizient zu gestalten.
Besondere Bedeutung kommt dabei der Entwicklung tragfähiger Absatzmärkte für textile Rezyklate zu. Die technische Machbarkeit von Recyclingprozessen stellt eine notwendige Voraussetzung dar, reicht jedoch allein nicht aus, um eine funktionierende Kreislaufwirtschaft zu etablieren. Langfristig wird die Nachfrage nach Sekundärrohstoffen maßgeblich darüber entscheiden, ob textile Rezyklate erfolgreich in industrielle Wertschöpfungsketten integriert werden können.
Für Österreich ergibt sich daraus die Chance, bestehende Sammel-, Wiederverwendungs- und Verwertungsstrukturen gezielt weiterzuentwickeln und frühzeitig auf die Anforderungen zukünftiger Kreislaufsysteme auszurichten. Ob die europäische Textilgesetzgebung letztlich einen „Tsunami“ zusätzlicher Stoffströme oder die „perfekte Welle“ für eine funktionierende textile Kreislaufwirtschaft erzeugt, wird wesentlich davon abhängen, ob es gelingt, leistungsfähige Stoffströme, stabile Schnittstellen und wirtschaftlich tragfähige Märkte für textile Rezyklate aufzubauen.

LITERATURVERZEICHNIS

Boschmeier, E., Mehanni, D., Sedlmayr, V. L., Vetyukov, Y., Mihalyi, S., Quartinello, F., Guebitz, G. M., & Bartl, A. (2025). Recovery of pure PET from wool/PET/elastane textile waste through step-wise enzymatic and chemical processing [Article]. *Waste Management and Research*, *43*(6), 969–979. https://doi.org/10.1177/0734242X241276089

Depope, N., Depope, A., Archodoulaki, V. M., Ipsmiller, W., & Bartl, A. (2025). Deep eutectic solvent as a solution for polyester/cotton textile recycling [Article]. *Waste Management*, *208*, Article 115177. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115177

European Commission. (2020). *A New Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098

European Commission. (2022). *EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles*. https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy_en

European Environment Agency. (2024). *Circularity of the EU Textiles Value Chain in Numbers*. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/circularity-of-the-eu-textiles-value-chain-in-numbers

European Parliament Council of the European Union. (2018). *Directive (EU) 2018/851 amending Directive 2008/98/EC on Waste*. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj

European Parliament Council of the European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1781 establishing a framework for ecodesign requirements for sustainable products (ESPR)*. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj

European Parliament Council of the European Union. (2025). *Directive (EU) 2025/1892 amending Directive 2008/98/EC as regards textile and food waste*. https://eur-lex.europa.eu/

European Recycling Industries Confederation. (2025). *Position papers and market updates on the European textile sorting and recycling sector*. https://euric.org

Joint Research Centre. (2021). *Technical Support for the Development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) for Apparel and Footwear*. https://publications.jrc.ec.europa.eu/

Joint Research Centre. (2023). *Potential Ecodesign Requirements for Textiles*.

Kähling, P., Ipsmiller, W., Bartl, A., & Lederer, J. (2025). Characterisation of Waste Textiles from Mixed MSW and Separate Collection—A Case Study from Vienna, Austria [Article]. *Sustainability (Switzerland)*, *17*(12), Article 5484. https://doi.org/10.3390/su17125484

Lilek, D., Yayla, S. S., Stipanovic, H., Fink, T. K., Egan, J., Herbinger, B., Tischberger-Aldrian, A., & Schimper, C. B. (2026). NIR Spectroscopy and Machine Learning for the Quantification of Blended Textiles: Towards Improved Understanding for Textile Recycling [Article]. *Applied Sciences (Switzerland)*, *16*(7), Article 3242. https://doi.org/10.3390/app16073242

Organisation for Economic Co-operation Development. (2024). *Towards a More Resource-Efficient and Circular Textile Economy*. https://www.oecd.org/environment/waste/

Sandin, G., & Peters, G. M. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling – A review. *Journal of Cleaner Production*, *184*, 353–365. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266

Spyridis, Y., Argyriou, V., Sarigiannidis, A., Radoglou Grammatikis, P., & Sarigiannidis, P. (2024). *Autonomous AI-enabled Industrial Sorting Pipeline for Advanced Textile Recycling*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.10696

Textile Exchange. (2025). *Materials Market Report*. https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2024/

Watson, D., Kiørboe, N., & Palm, D. (2023). *Extended Producer Responsibility and the Management of Textiles in Europe*.

KONTAKT

Andreas Bartl
andreas.bartl@tuwien.ac.at
+43 1 58801 166102
TU Wien - Institute of Chemical, Environmental & Bioscience Engineering (ICEBE)

Josef Ressel Centre ReSTex – an interim report

Christian B. Schimper[1], Birgit Herbinger[1], Judith Rudolf-Scholik[1], Agnes Grünfelder[1], David Lilek[1], Felice Quartinello[1,2], Jeannie Egan[1,3], Georg M Gübitz[2], Eva Sykacek[2], Andreas Mautner[2], Thomas Rosenau[3], Nika Depope[4] & Andreas Bartl[4]

[1)] University of Applied Sciences Wiener Neustadt, Josef Ressel Centre for Recovery Strategies for Textiles, Biotech Campus Tulln, Austria

[2)] BOKU University, Institute of Environmental Biotechnology, Department of Agricultural Sciences, IFA-Tulln, Austria

[3)] BOKU University, Department of Natural Sciences and Sustainable Resources, Institute of Chemistry of Renewable Resources, Tulln, Austria

[4)] TU Wien, Institute of Chemical, Environmental and Bioscience Engineering, Research Group for Particle Technology, Recycling Technology and Technology Assessment, Vienna, Austria

ABSTRACT: The Josef Ressel Centre for Recovery Strategies for Textiles (ReSTex) addresses one of the key technological challenges of the circular textile economy: the recycling of blended polyester/cotton textiles. Since its establishment in October 2023, the Centre has developed complementary analytical, biotechnological and chemical recycling approaches that aim to recover both fibre components as high-quality secondary raw materials suitable for fibre-to-fibre recycling. This contribution summarizes the scientific progress achieved during the first three years of the project. Research activities comprise Design-for-Recycling concepts supported by life cycle assessment, AI-assisted spectroscopic identification of textile blends, systematic screening and optimization of commercial cellulase formulations for enzymatic fibre separation, characterization of recovered polyester for thermomechanical recycling, and the development of a novel hydrophobic deep eutectic solvent (DES) enabling selective dissolution of polyester while preserving both polyester and cotton in their polymeric state. Together, these developments establish two complementary recycling routes for cotton/polyester blends and provide important scientific foundations for future industrial textile recycling processes. The presented results demonstrate the interdisciplinary approach of ReSTex and illustrate how analytical, biochemical, chemical and engineering research can jointly contribute to implementing a circular textile economy.

1 BACKGROUND

Globally, fibre production continues to increase, reaching approximately 132 million tonnes in 2024, more than doubling since the year 2000. Synthetic fibres now account for approximately 69% of global fibre production, with polyester remaining by far the dominant textile fibre at 59% (approximately 78 million tonnes). Cotton is the second most widely used fibre, representing approximately 19% (24.5 million tonnes), while man-made cellulosic fibres contribute a further 6%. Together, polyester and cotton account for nearly 80% of all textile fibres produced worldwide, making these two materials the primary target for the development of circular textile recycling technologies. Despite increasing political attention and industrial investment, less than 1% of global fibre production currently originates from fibre-to-fibre recycling, illustrating the enormous technological challenge that remains.

Since the Josef Ressel Centre for Recovery Strategies for Textiles (ReSTex) commenced its research activities in 2023, the political and industrial landscape for textile recycling has evolved considerably. The European Union has entered the implementation phase of the EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles (European Commission, 2026a), which was developed as one of the key initiatives under the European Green Deal (European Commission, 2026b). Since then, several legislative and policy measures have transformed the regulatory framework from strategic objectives into concrete implementation. Most notably, since 1 January 2025, Member States are required to establish separate collection systems for textile waste under the revised Waste

Framework Directive, creating the foundation for increased fibre recovery and industrial-scale textile recycling. In parallel, the Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) has entered into force, establishing a framework for mandatory eco-design requirements and introducing the Digital Product Passport, which will improve transparency regarding product composition, durability, repairability and recyclability (European Commission, 2026c). Furthermore, Extended Producer Responsibility (EPR) schemes for textiles are being introduced across Europe, shifting greater responsibility for end-of-life management to producers and creating economic incentives for the development of circular textile value chains (European Commission, 2023).

In addition to these regulatory developments, the European Commission adopted the Clean Industrial Deal (European Commission, 2026d) in 2025, complementing the European Green Deal with a stronger emphasis on industrial competitiveness, resilient European value chains and investment in clean technologies. This recognises that the ambitious objectives of the circular economy can only be achieved through economically viable recycling industries capable of supplying high-quality secondary raw materials to European manufacturing.

Together, these developments have significantly strengthened the demand for scalable recycling technologies capable of recovering high-quality raw materials from post-consumer textile waste. In particular, efficient separation and recycling of blended cotton/polyester textiles has become a key technological prerequisite for achieving both the European Union's circularity objectives and its ambition to establish a competitive and resilient circular textile industry.

These developments have substantially increased the demand for scalable technologies capable of recovering high-quality secondary raw materials from post-consumer cotton/polyester textiles. Consequently, the objectives of the Josef Ressel Centre for Recovery Strategies for Textiles (ReSTex), established in October 2023, have become even more relevant. By combining complementary expertise from academia and industry, ReSTex develops analytical, biotechnological and chemical recycling strategies covering the complete recycling chain from feedstock characterization to the recovery of high-quality secondary raw materials. The resulting interdisciplinary research programme is organised into several complementary research areas, which are outlined in the following section.

2 RESEARCH OBJECTIVES AND RESEARCH AREAS

Based on this interdisciplinary approach, the ReSTex research programme is structured into several interconnected research areas that together cover the complete process chain from material characterization to the recovery of high-quality secondary raw materials.

2.1 Design for Recycling and Sustainability Assessment

The first research area addresses the characterization of representative textile products supplied by the industrial partner Salesianer Miettex as well as their suitability for circular recycling. Initial investigations focused on identifying design features that facilitate or hinder high-quality fibre-to-fibre recycling. Particular attention was given to material composition, sewing threads, labels, accessories and other non-textile components that interfere with material recovery.

For mono-material cotton products, represented by industrial terry towels, Design-for-Recycling concepts were developed to improve recyclability. These investigations included life cycle assessment (LCA) screening and the evaluation of alternative product designs, such as the replacement of conventional polyester sewing threads by cellulosic alternatives including cotton and lyocell. Initial washing trials have demonstrated promising results regarding durability, while further validation under industrial laundering conditions is ongoing (Greifeneder, 2024).

In parallel, representative polyester/cotton blended products from textile rental applications were comprehensively characterized. These studies established the material basis for the subsequent biochemical and chemical recycling investigations and included preliminary environmental assessments of different end-of-life scenarios. Comparative LCA screening demonstrated that both mechanical and thermo-mechanical recycling routes substantially reduce environmental impacts compared with thermal recovery for polyester cleanroom garments, while thermo-mechanical recycling yielded the most favourable environmental performance (Hellmer, 2024; Danhel, 2024)

The generated product data were subsequently integrated into detailed life cycle assessments of the ReSTex enzymatic recycling process. These analyses identified raw material production, textile manufacturing and energy-intensive process steps during the life-time of the items as the major environmental hotspots. While the current biochemical recycling process exhibits higher environmental impacts than mechanical recycling, it enables complete recovery of the polyester fraction together with glucose as an additional product stream. Furthermore, sensitivity analyses demonstrated considerable improvement potential through enzymatic separation and repeated reuse of the enzyme formulation, providing important guidance for future process optimisation (Fehling, 2025).

2.2 Spectroscopic Characterization and AI-assisted Textile Classification

Efficient recycling of blended textiles requires rapid and reliable identification of material composition prior to processing. One advantageous outcome of the ReSTex project is the generation of a comprehensive reference dataset comprising a large number of cotton/polyester textile samples originating from the same source material but exhibiting different cotton/polyester blend ratios and pre-treatments. These samples were generated throughout the enzymatic hydrolysis experiments by progressively removing the cotton fraction while leaving the polyester component unaffected, resulting in a unique dataset with precisely defined fibre compositions. Combined with materials originating from different pre-treatment strategies, this dataset provides an excellent basis for spectroscopic characterization, as the influence of fibre composition can be investigated largely independently of variations in textile construction, dyeing or finishing.

Building upon this database, extensive investigations were carried out to evaluate the suitability benchtop Near-Infrared (NIR) and Mid-Infrared (MIR) spectroscopy for quantitative determination of cotton/polyester blend compositions. Various spectral pre-processing strategies together with linear and nonlinear regression approaches, including both classical chemometric methods and advanced machine learning algorithms, were systematically evaluated to identify robust prediction models for cotton/polyester quantification. In addition, statistical bootstrap resampling was applied to determine the minimum number of measurements required for representative textile characterization, thereby improving both measurement efficiency and model robustness (Yayla, 2025).

To evaluate the transferability of these approaches towards industrial applications, a cooperation with the Technical University of Leoben investigated the performance of different NIR instrument classes, including laboratory spectrometers, handheld instruments and industrial sensor-based sorting systems. Using identical ReSTex textile samples, it was demonstrated that all systems allow reliable quantification of cotton/polyester blends, although instrument-specific pre-processing strategies and machine learning models are required to achieve optimal prediction accuracy. These studies also highlighted the influence of textile characteristics such as colour, fabric structure and alkaline pre-treatment on model performance, providing important guidance for future industrial sorting systems (Stipanovic et al., 2025; Lilek et al., 2026).

2.3 Enzymatic Separation of Cotton/Polyester Blends

The enzymatic separation of cotton/polyester blended textiles represents one of the core technologies investigated within ReSTex. Research initially focused on the systematic screening and biochemical characterization of commercially available cellulase formulations to identify enzyme systems suitable for selective cotton degradation. More than thirty commercial cellulase formulations originating from different industrial applications were characterized using biochemical activity assays, protein analysis and reactor experiments. These investigations demonstrated that conventional cellulase activity assays alone are insufficient to predict separation performance and led to the identification of characteristic activity patterns associated with efficient cotton removal from blended textiles (Barta, 2024; Pointner, 2024; Egan et al., 2025).

Building upon these results, a comprehensive evaluation of commercial cellulase formulations enabled the identification of formulation characteristics required for efficient fibre separation. In particular, formulations enriched in endoglucanase activity, combined with moderate cellobiohydrolase and minor β-glucosidase activities, exhibited the highest separation efficiencies, providing important guidance for selecting and developing enzyme systems for textile recycling (Egan et al., 2025).

To further improve process economics, the reuse of cellulase formulations was investigated using a dedicated experimental setup. The optimized methodology demonstrated that recycled cellulases retained more than 85% of their initial degradation efficiency during the first two reuse cycles, confirming the technical feasibility of enzyme recycling and identifying important parameters for future industrial implementation (Wiltsche, 2024).

In parallel, several pre-treatment strategies were evaluated to improve cellulose accessibility prior to enzymatic hydrolysis. Besides the conventional sodium hydroxide treatment, various ionic liquids, polar solvents, and process additives were investigated as potential alternatives. While alkaline pre-treatment remained the most effective approach for increasing cellulose degradation, several environmentally favourable solvent systems showed promising results and provide a basis for further process optimisation (Colosio, 2025).

2.4 Thermomechanical Recycling of Recovered PET

A prerequisite for the industrial implementation of the enzymatic recycling process is the successful integration of the recovered polyester fraction into existing thermomechanical recycling technologies. Therefore, the recovered PET was processed using laboratory-scale extrusion and injection moulding to evaluate its suitability for conventional melt processing and to identify potential factors limiting material quality.

Besides demonstrating the general processability of recovered PET, particular emphasis was placed on the influence of residual contaminants originating from textile products. Mechanical and thermal characterization revealed that minor textile components can significantly influence the quality of recycled PET. Whereas textile labels exhibited only a limited effect on mechanical performance, rubber components proved to be critical disruptors. Even small amounts of rubber caused pronounced reductions in tensile strength and elongation at break, accompanied by increased melt flow rates and reduced intrinsic viscosity, indicating accelerated chain scission during melt processing. Thermal analyses further suggested that degradation products released from rubber during extrusion interfere with PET processing and alter the crystallization behaviour of the recycled polymer. These findings demonstrate that the quality of recovered polyester depends not only on the efficiency of the upstream fibre separation process but also on the effective removal of disruptive textile components prior to thermomechanical recycling. (Sykacek et al., 2025; Zach, 2025).

2.5 Selective Dissolution of Polyester Using Deep Eutectic Solvents

This research area was initially conceived to address the engineering aspects of scaling up the enzymatic hydrolysis process. However, during the course of the project, the research focus evolved towards the development of an alternative and highly complementary separation technology based on selective polymer dissolution. This shift was driven by the successful identification of a novel hydrophobic deep eutectic solvent (DES) system capable of selectively dissolving polyester while preserving both polyester and cotton in their polymeric state, thereby establishing a second independent recycling route for polyester/cotton blended textiles. The novelty of this approach is further reflected by the filing of a European patent application (EP 25167929.6) covering the selective dissolution of polymers using DES.

The developed DES system, based on e.g., menthol and benzoic acid, enables rapid and selective dissolution of polyester from cotton/polyester blends. In contrast to several conventional chemical recycling routes that depolymerise one of the fibre components, the developed process preserves both recovered fractions: polyester is recovered in polymeric form following precipitation from the solvent, while the cotton fraction remains as intact fibres. Laboratory-scale experiments demonstrated complete separation of polyester and cotton within only a few minutes, while comprehensive analytical characterisation using SEM, DSC, TGA and ATR-FTIR confirmed that the treatment does not significantly alter the morphology, chemical structure or thermal properties of either recovered polymer. Consequently, both recovered materials remain suitable for subsequent fibre-to-fibre recycling processes (Depope. 2025a, 2025b, 2025c).

Building upon these developments, the DES concept has subsequently been extended towards the selective removal of elastane from polyester/elastane and polyamide/elastane blends using newly developed hydrophobic DES formulations. Initial investigations demonstrated complete separation of elastane from PET, PA6 and PA66 textiles while maintaining the structural, thermal and mechanical integrity of the recovered synthetic fibres, thereby considerably broadening the potential application of this solvent platform for future textile recycling technologies.

3 ADDITIONAL INFORMATION

The project results were disseminated continuously at numerous national and international scientific conferences. Christian B. Schimper and Andreas Bartl presented the overall progress of ReSTex at the Dornbirn Global Fiber Congress 2024, Recy & DepoTech 2024, the Austrian University of Applied Sciences Research Forum 2025, CRETE 2025, Sardinia 2025, the ISWA World Congress 2025 and the SUM Symposium 2025 and 2026. In addition, Nika Depope received the Best Emerging Young Scientist Award at the Sardinia Conference 2025, recognising the scientific quality and innovation of the presented work.

REFERENCES

Barta, M. (2024). Enzymatic Hydrolysis of Cotton-Polyester Textiles. Master's Thesis, University of Applied Sciences Wiener Neustadt, Biotech Campus Tulln, Austria.

Colosio, N. (2025). Screening of Various Additives for Improving Cellulase Activity. Master's Thesis, University of Applied Sciences Wiener Neustadt, Biotech Campus Tulln, Austria.

Danhel, S. (2024). Analyse der ökologischen Auswirkungen mechanischer und thermomechanischer Recyclingverfahren im Textilrecycling am Beispiel einer LCA-Screening-Studie eines Reinraumoveralls aus Polyester. Master's Thesis, University of Applied Sciences Wiener Neustadt, Campus Wieselburg, Austria.

Depope, N., Ipsmiller, W., & Bartl, A. (2025a). Green Selective Separation Process for Textile Waste. Proceedings of the 10th International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management, Chania, Greece.

Depope, N., Ipsmiller, W., & Bartl, A. (2025b). Recycled Polyester from Polyester/Cotton Textile Waste – A Combined Green Solvent and Thermal Analysis Approach. Proceedings of the 20th International

Symposium on Waste Management, Resource Recovery and Sustainable Landfilling (Sardinia 2025), Santa Margherita di Pula, Italy.
Depope, N., Ipsmiller, W., & Bartl, A. (2025c). Recycling Technology for Textile Waste Polyester/Cotton Implementing Green Selective Separation Approach. Proceedings of the ISWA World Congress 2025, Buenos Aires, Argentina.
Egan, J. *et.al.*, (2025). Diving into commercial cellulase formulations for circular polyester/cotton separation through targeted depolymerization of cotton. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 13, 1632772. https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1632772
European Commission. (2026a). EU strategy for sustainable and circular textiles. Directorate-General for Environment. https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy_en
European Commission. (2026b). A European Green Deal. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
European Commission. (2026c). Ecodesign for Sustainable Products Regulation. Directorate-General for Environment. https://environment.ec.europa.eu/publications/ecodesign-sustainable-products-regulation_en
European Commission. (2023, September 5). Commission welcomes agreement on new rules to ban products made with forced labour. Press Corner. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_4332
European Commission. (2026d). Clean Industrial Deal. https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_en
Fehling, K. (2025). *Challenges of Circular Economy and Recycling in the Textile Industry: LCA Comparison of End-of-Life Scenarios for Polycotton Bedsheets to Develop Universal Sustainability Indicators*. Master's Thesis, University of Applied Sciences Wiener Neustadt, Campus Wieselburg, Austria.
Greifeneder, C. (2024). Kreislaufwirtschaft in der Textilindustrie – Recyclingfähigkeit von Baumwoll-Frottierhandtüchern: Ökobilanz und Re-Design als Verbesserung bzw. Vorbereitung des Recyclingprozesses. Master's Thesis, University of Applied Sciences Wiener Neustadt, Campus Wieselburg, Austria.
Hellmer, F. (2024). Betrachtung und Vergleich zweier End-of-Life-Szenarien eines "Polycotton"-Bettlakens aus ökologischer Sicht unter dem Aspekt des Textilrecyclings. Master's Thesis, University of Applied Sciences Wiener Neustadt, Campus Wieselburg, Austria.
Lilek, D. *et. al.*, (2026). NIR Spectroscopy and Machine Learning for the Quantification of Blended Textiles: Towards Improved Understanding for Textile Recycling. Applied Sciences, 16, 3242. https://doi.org/10.3390/app16073242
Pointner, P. (2024 Characterization of enzyme formulations for efficient recycling of cotton-polyester textiles. Master's Thesis, University of Applied Sciences Wiener Neustadt, Biotech Campus Tulln, Austria.
Schimper, C.B. *et.al*, (2024). ReSTex: Josef Ressel Centre for Recycling Strategies for Textiles. Proceedings of the 17th Recy & DepoTech Conference, Leoben, Austria.
Schimper, C.B. *et al*, (2025). ReSTex: Josef Ressel Centre for Recycling Strategies for Textiles. Proceedings of the 10th International Conference on Industrial & Hazardous Waste Management (CRETE 2025), Chania, Greece.
Schimper, *C.B*. et.al, (2025). ReSTex: Josef Ressel Centre for Recycling Strategies for Textiles. In: Hauck, A., & Feichtinger, C. (Eds.), Doing Research – Shaping the Future. Proceedings of the 18th Forschungsforum der österreichischen Fachhochschulen, p. 211 ff. Facultas, Vienna.
Stipanovic, H. *et.al.*, (2025). Quantifying Cotton Content in Post-Consumer Polyester/Cotton Blend Textiles via NIR Spectroscopy: Current Attainable Outcomes and Challenges in Practice. Recycling, 10(4), 152. https://doi.org/10.3390/recycling10040152
Sykacek, E. *et. al.*, (2025). Identification of Impurities in Mixed Fiber Textiles Recycling and Their Impact on the Mechanical Performance of Recovered Polymers. Proceedings of the 10th International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management, Chania, Greece.
TextileExchange. (2025). Materials Market Report 2025. https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2025/
Yayla, S.S. (2025). Supervised Machine Learning for the Quantification of Cotton/Polyester Textiles Using IR Spectroscopy. Master's Thesis, University of Vienna, Vienna, Austria. https://doi.org/10.25365/thesis.79418
Wiltsche, M. (2024). Evaluation of Cellulase Reusability for Efficient Separation of Cotton and Polyester Blends. Master's Thesis, University of Applied Sciences Technikum Wien, Vienna, AT
Zach, D. (2025). Processing and Analysis of Recycled PET-Based Textile Waste Enabling Biotechnological Recovery. Bachelor's Thesis, BOKU University, Tulln, Austria.

Sammel- und Sortierkonzepte für recycelbare elastische Textilien mit thermoplastischen Copolyester-Elastomeren

Ricarda Wissel[1], Jasmin Roos[1] & Thomas Gries[1]
[1)] RWTH Aachen University, Institut für Textiltechnik, Aachen, Deutschland

KURZFASSUNG: Eine besondere Herausforderung für das Faser-zu-Faser-Recycling (F2F-Recycling) elastischer Textilien stellen Elastanfasern dar, da diese nicht für die Verarbeitung im thermomechanischen Recycling geeignet sind. Ein vielversprechender Ansatz ist die Substitution konventioneller Elastane durch elastische Garne aus thermoplastischen Copolyester-Elastomeren (TPC). Diese Materialien weisen eine grundsätzliche Kompatibilität mit textiltypischen Fasern aus Polyethylenterephthalat (PET) für ein gemeinsames thermomechanisches Recycling auf. Da für eine erfolgreiche Einführung entsprechender recycelbarer Textilien geeignete End-of-Life-Strategien erforderlich sind, werden in diesem Beitrag Sammel- und Sortierkonzepte für TPC-haltige Textilien entwickelt. Hierzu wird ein morphologischer Kasten erstellt, dessen Ausprägungen anhand leitfadengestützter Experteninterviews erhoben und diskutiert werden. Als bevorzugte Lösung wird die Integration in das bestehende, gemischte Altkleidersystem mit anschließender Sortierung durch Nahinfrarotspektroskopie (NIR-Spektroskopie) abgeleitet. Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Erkennbarkeit von TPC mittels NIR-Spektroskopie sowie, sofern erforderlich, einer zusätzlichen Kennzeichnung.

1 EINLEITUNG

Die Etablierung geschlossener Materialkreisläufe für Textilien gewinnt angesichts wachsender Textilabfallmengen zunehmend an Bedeutung. Obwohl textile Fasern grundsätzlich ein hohes Potenzial für werkstoffliches Recycling aufweisen, werden derzeit weniger als 1% der Alttextilien wieder zu neuen Textilien recycelt (Ellen MacArthur Foundation, 2017). Ein wesentlicher Grund hierfür ist die weitverbreitete Verwendung von Fasermischungen. Besonders herausfordernd sind elastische Textilien mit Elastanfasern (Anteile üblicherweise 2-20 Gew.-%). Beim thermomechanischen Recycling werden thermoplastische Textilien zerkleinert, mithilfe eines Extruders aufgeschmolzen und anschließend zu Rezyklat in Granulatform oder durch Schmelzspinnen direkt wieder zu textilen Fasern verarbeitet. Da Elastane nicht thermoplastisch verarbeitbar sind, kann es dabei zu Verstopfungen von Anlagenteilen, insbesondere Filtern, oder zur Bildung unerwünschter Zersetzungsprodukte kommen. (Wissel et al., 2024)
Ein möglicher Lösungsansatz besteht darin, konventionelle Elastane durch schmelzgesponnene elastische Garne aus thermoplastischen Copolyester-Elastomeren (TPC) zu ersetzen. Diese weisen eine Kompatibilität mit textiltypischen Polyesterfasern aus Polyethylenterephthalat (PET) auf und ermöglichen damit grundsätzlich ein gemeinsames thermomechanisches Recycling (Wissel et al., 2025). Die erfolgreiche Einführung recycelbarer elastischer Textilien erfordert jedoch nicht nur Materialinnovationen, sondern auch geeignete End-of-Life-Strategien. Im Rahmen dieses Beitrags werden daher mögliche Sammel- und Sortierkonzepte für TPC-haltige Textilien als Voraussetzung für ein thermomechanisches F2F-Recycling erarbeitet.

2 METHODE

Zur systematischen Entwicklung möglicher Konzepte wird ein morphologischer Kasten nach Zwicky verwendet. Dieser dient dazu, komplexe Problemstellungen in ihre wesentlichen Parameter zu zerlegen und für jeden Parameter mögliche Ausprägungen zu definieren. Durch die Kombination der Ausprägungen werden verschiedene Lösungsvarianten entwickelt und anschließend hinsichtlich ihrer Eignung diskutiert. (Schawel et al., 2014) Ausgehend von der Forschungsfrage, welche Wege geeignet sind, um Alttextilien bestehend aus PET und TPC für ein

thermomechanisches Recycling zu erfassen und zu sortieren, werden zunächst die Parameter des morphologischen Kastens festgelegt. Diese umfassen die Erfassung, Sortierung, Kennzeichnung und die wesentlichen Treiber des Systems. Diese Parameter bilden zugleich die Grundlage für die Entwicklung des Interviewleitfadens, der in Tab. 1 dargestellt ist.

Tab. 1: Interviewleitfaden für Experteninterviews

Themenblock	Fragen
Einstieg	An welcher Stelle des Textilkreislaufs würden Sie Ihre Rolle einordnen und können Sie diese kurz beschreiben?
Anforderungen	Welche Anforderungen müssen aus Ihrer Sicht eine Erfassung und Sortierung für das thermomechanische Recycling erfüllen (technisch, logistisch, ökologisch, wirtschaftlich)?
Erfassung	Auf welchen Wegen können Textilien aus PET mit elastischem TPC-Garn erfasst werden? Welcher ist aus Ihrer Sicht am besten geeignet und warum?
Sortierung	Welche Möglichkeiten der Sortierung gibt es für diesen Stoffstrom? Welche ist aus Ihrer Sicht am besten geeignet und warum?
Kennzeichnung	Auf welche Arten kann das Textil gekennzeichnet werden und welche halten Sie für sinnvoll? Welche Informationen sind für welche Akteure von Bedeutung?
Treiber	Welche Anreize und Treiber sind für eine Erfassung und Sortierung des Stoffstroms notwendig? Welche Akteure sehen Sie hauptverantwortlich? Was muss gegeben sein, damit ein System erfolgreich etabliert werden kann?
Abschluss	Gibt es abschließend noch Aspekte, die Sie gerne einbringen möchten?

Im Rahmen qualitativer, leitfadengestützter Experteninterviews werden anschließend allgemeine Anforderungen sowie mögliche Ausprägungen der einzelnen Parameter erhoben und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile diskutiert. Insgesamt werden 14 Experteninterviews mit Vertretern relevanter Akteursgruppen entlang der textilen Wertschöpfungs- und Recyclingkette durchgeführt. Die Auswahl umfasst die Bereiche Sammlung, Sortierung, Herstellung, Recycling, Logistik, Kreislaufwirtschaft sowie Systeme der erweiterten Herstellerverantwortung (EPR). Die Interviewpartner sind in Tab. 2 zusammengefasst und in Abb. 1 vereinfacht entlang des textilen Kreislaufs eingeordnet.

Tab. 2: Übersicht Interviewpartner

	Beschreibung der Interviewpartner	Schwerpunkt
A	Unternehmensgruppe für Sammlung, Sortierung und Verwertung von Alttextilien	Sammlung/ Sortierung
B	Entsorgungsunternehmen, Expertise in kommunaler Abfallwirtschaft und Umweltbildung	Sammlung
C	Kommunaler Entsorgungsträger mit Alttextilsammlung	Sammlung
D	Start-Up für automatisierte Textilsortierung	Sortierung
E	Hersteller sensorbasierter Sortiersysteme	Sortierung
F	Bekleidungsmarke mit Take-Back-Programm	Herstellung
G	Forschungsinstitut mit Expertise in Textilsammelsystemen	Sammlung
H	Hersteller von Sortieranlagen für feste Abfallstoffe	Sortierung
I	Anbieter EPR-Systeme für Textilien	EPR
J	Maschinen- und Anlagenbauer für Kunststoffrecycling	Recycling
K	Forschungsinstitut für Transportlogistik mit Expertise in reverser Logistik	Logistik
L	Forschungsinstitut mit Fokus auf kommunaler Abfallwirtschaft und Kreislaufwirtschaft	Kreislaufwirtschaft
M	Fachverband mit Schwerpunkt Textil	Sammlung
N	Unternehmen für Sammlung, Sortierung und Verwertung von Alttextilien	Sammlung/ Sortierung

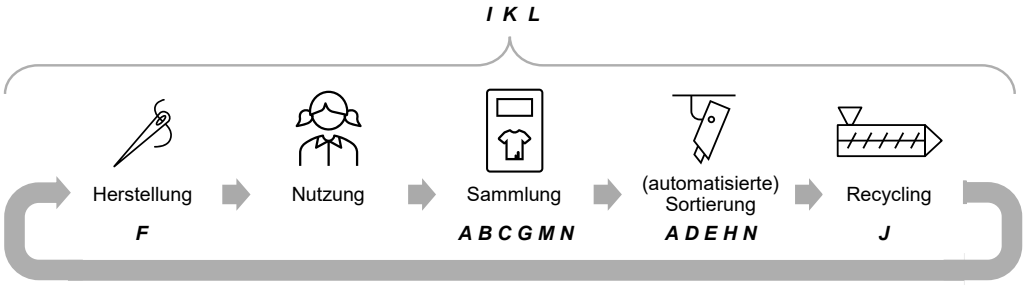


Abb. 1: Vereinfachte Einordnung der interviewten Akteure entlang des textilen Kreislaufs

Die Interviewaussagen werden den Parametern des morphologischen Kastens zugeordnet. Auf dieser Grundlage werden die möglichen Ausprägungen der einzelnen Parameter ergänzt und diskutiert. Durch deren Kombination werden verschiedene Sammel- und Sortierkonzepte abgeleitet und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile vergleichend eingeordnet. Die daraus resultierenden bevorzugten Lösungsvarianten werden im Folgenden vorgestellt. Zunächst werden die in den Interviews identifizierten Anforderungen an ein Sammel- und Sortiersystem dargestellt.

3 ERGEBNISSE DER EXPERTENINTERVIEWS

3.1 Anforderungen

Die in den Experteninterviews identifizierten Anforderungen an die Bereitstellung eines Stoffstroms für das thermomechanische F2F-Recycling sind in Tab. 3 zusammengefasst. Die Anforderungen zeigen, dass ein geeignetes Konzept einen ausreichend reinen und mengenmäßig relevanten Stoffstrom bereitstellen muss, ohne zusätzliche Hürden für Verbraucher oder unverhältnismäßige logistische Aufwände zu verursachen. Gleichzeitig muss eine zuverlässige automatisierte Sortierung in recyclinggerechte Fraktionen möglich sein.

Tab. 3: Identifizierte Anforderungen aus den Experteninterviews

Anforderungen aus Recyclingperspektive	
Hohe Reinheit des Inputmaterials	Kurzwaren wie Reißverschlüsse und Knöpfe müssen entfernt werden. Fremdstoffe wie Elastane, Beschichtungen und Additive wie Farben und Flammschutzmittel können nicht herausgefiltert werden und den Recycling- sowie den anschließenden Schmelzspinnprozess beeinträchtigen.
Ausreichende Materialmengen	Thermomechanische Recyclinganlagen weisen typische Durchsätze von 500 bis 2.000 kg/h auf. Die wirtschaftliche Bereitstellung entsprechend großer, sortierter Post-Consumer-Stoffströme stellt derzeit eine Herausforderung dar.
Design-for-Recycling	Eine möglichst geringe Anzahl unterschiedlicher Materialien, Schichten und Komponenten verbessert grundsätzlich die Recyclingfähigkeit eines Textils.
Anforderungen aus Sortierperspektive	
Recycling-Spezifikationen	Für die verschiedenen Recyclingverfahren müssen Anforderungen an Reinheit, Ausschlusskriterien und Probenahme definiert sein.
Automatisierte Sortierung	Die Sortierung des Recyclingstoffstroms muss für große Stoffströme automatisiert erfolgen, eine manuelle Sortierung ist wirtschaftlich nicht tragfähig.
Erkennbarkeit mit etablierten Technologien	Neue Materialien müssen mit etablierten Sortiertechnologien zuverlässig erkennbar sein, um eine Integration in bestehende Systeme zu ermöglichen.
Anforderungen aus Sammelperspektive	
Saubere und trockene Alttextilien	Eine trockene und möglichst kontaminationsarme Erfassung ist Voraussetzung für die weitere Verarbeitung.
Niederschwellige Abgabe	Die Abgabe sollte für Verbraucher kostenlos, bequem und über ausreichend viele Sammelpunkte möglich sein.

Verbraucher-kommunikation	Zusätzlicher Aufwand bei alternativen Erfassungssystemen muss durch eine verständliche Kommunikation des Mehrwerts vermittelt werden.
Allgemeine Anforderungen	
Wirtschaftliche und/oder regulatorische Relevanz	Ein spezifischer Stoffstrom muss entweder eine relevante Menge beziehungsweise einen hohen Materialwert aufweisen oder aufgrund regulatorischer Vorgaben getrennt behandelt werden.
Effiziente Logistik	Transporte verursachen Kosten und Umweltwirkungen. Diese können unter anderem durch die Bündelung und Verdichtung der Stoffströme reduziert werden.
Ökologischer Nutzen	Bei der ökologischen Bewertung sind alle Aufwände entlang der Sammel-, Sortier- und Recyclingkette zu berücksichtigen.

3.2 Morphologischer Kasten

Auf Basis der Interviews werden die in Tab. 4 dargestellten Ausprägungen der Parameter Erfassung, Sortierung, Kennzeichnung und Treiber identifiziert. Im Folgenden werden die einzelnen Parameter und ihre Ausprägungen diskutiert sowie die daraus resultierenden bevorzugten Lösungsvarianten abgeleitet.

Tab. 4: Morphologischer Kasten

Parameter	Ausprägungen					
Erfassung	gemischt			separat		
Sortierung	manuell		NIR-Spektroskopie		zus. Kennzeichnung	
Kennzeichnung	keine	RFID	Marker	opt. Code	Etikett	DPP
Treiber	Markt			Regulatorik		

3.3 Erfassung

Die Interviewpartner sprechen sich mehrheitlich für eine gemischte Erfassung über bestehende bzw. sich aktuell entwickelnde Altkleidersammelsysteme aus. Diese werden bereits von den Verbrauchern genutzt und ermöglichen eine einfache Abgabe von Alttextilien. Eine separate Erfassung TPC-haltiger Textilien wurde hingegen als wenig praktikabel bewertet, da weder ausreichendes Materialwissen noch eine entsprechende Mitwirkungsbereitschaft der Verbraucher erwartet werden kann. (A, L, M) Darüber hinaus würde eine separate Erfassung zusätzlichen logistischen Aufwand verursachen, während bei der gemischten Erfassung bestehende Logistik- und Sortierstrukturen sowie Skaleneffekte genutzt werden können. Dadurch lassen sich sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Vorteile erzielen (H, K, A). Für die Erprobung des Recyclingkonzepts kann die Nutzung separat erfasster Stoffströme mit definierten Mengen und Materialzusammensetzungen, beispielsweise aus dem Medizinbereich oder Arbeitsbekleidung, dennoch ein sinnvoller Schritt sein (G, J, K).
Unabhängig vom Sammelsystem muss gemäß der Abfallhierarchie geprüft werden, ob ein Textil wiederverwendet werden kann. Auch separat erfasste TPC-haltige Textilien müssten daher zunächst von einem Sortierbetrieb hinsichtlich ihrer Wiederverwendbarkeit bewertet werden (A).
Depotcontainer stellen derzeit das am weitesten verbreitete und somit bevorzugte Sammelsystem dar. Eine Herausforderung dieses Sammelsystems sind Fehlwürfe, die zu Verunreinigungen der Alttextilien führen können (B, I). Alternative Sammelsysteme sind In-Store-Sammlungen im Handel, Paketsammlungen, Straßenabholungen, haushaltsnahe Textiltonnen, Duo-Tonnen, Wertstoffhöfe und karitative Rücknahmesysteme (A, B, C, D, F, G, H, I, L, M).

3.4 Sortierung

Nach der gemischten Erfassung und Vorsortierung nach den Kategorien Wiederverwendung und Recycling, müssen die Recyclingtextilien je nach Materialzusammensetzung den verschiedenen Recyclingverfahren zugeordnet werden, z.B. mechanisches, thermomechanisches oder chemisches Recycling (H, A). Dieser Sortierschritt muss automatisiert erfolgen, da eine manuelle Sortierung wirtschaftlich nicht tragfähig ist (M, G). Die automatisierte NIR-Spektroskopie wird als zukünftiger Industriestandard für die materialbasierte Sortierung angesehen (I).
Die Zusammenführung mit einer sortierten reinen PET-Fraktion hat den Vorteil, dass der Anteil an PET/TPC-Textilien mit einem größeren Stoffstrom kombiniert wird, der im nicht wiederverwendbaren Alttextilstrom etwa 11 % beträgt (Refashion, 2023). Somit werden zusätzliche logistische Aufwände vermieden und leichter ausreichende Materialmengen für ein wirtschaftliches thermomechanisches Recycling erreicht. (H, E) Voraussetzung hierfür ist eine zuverlässige Erkennung und Sortierung mittels NIR-Spektroskopie. Falls TPC ein vergleichbares Spektrum zu PET aufweist, können TPC-enthaltende Textilien direkt der PET-Fraktion zugeordnet werden. Weicht das Spektrum ab, müssen die Sortierprogramme entsprechend angelernt werden, wobei TPC eindeutig von Elastanen unterscheidbar sein muss. Die Erkennbarkeit hängt zudem vom Wellenlängenbereich der eingesetzten NIR-Sensoren sowie der Position der TPC-Garne im Textil ab. Dabei bestehen grundsätzlich ähnliche Herausforderungen wie bei der Erkennung von Elastanen. Elastische Garne werden typischerweise in geringen Anteilen in Textilien eingesetzt, wobei Materialanteile unter 2 % mit aktueller NIR-Technologie in der Regel nicht zuverlässig erkannt werden können. Zudem sind elastische Garne häufig verdeckt, beispielsweise in Form von Umwindegarnen oder eingenähten elastischen Bändern, was die Erkennung zusätzlich erschwert. (A, E, H) Offen bleibt zudem, ob künftig eine Quantifizierung des TPC-Anteils erforderlich sein wird. Dies hängt maßgeblich davon ab, welchen Einfluss unterschiedliche TPC-Anteile auf den Recyclingprozess und die Eigenschaften des Endprodukts haben. (J)

3.5 Kennzeichnung

Eine zusätzliche Kennzeichnung ist nur erforderlich, wenn sich TPC mittels NIR-Spektroskopie nicht zuverlässig identifizieren lässt und eine eindeutige Unterscheidung notwendig ist. Als zentrale Informationsquelle kann zukünftig der Digitale Produktpass (DPP) dienen, der unter anderem Angaben zur Materialzusammensetzung, zur Lokalisierung potenzieller Störstoffe sowie Hinweise für das Recycling enthalten kann (J). Der DPP ist Bestandteil der EU-Ökodesign-Verordnung (ESPR, EU 2024/1781), wobei die konkreten Anforderungen an den Datenträger noch festgelegt werden müssen.
Als bevorzugte Kennzeichnungstechnologie für die automatisierte Sortierung nennen die Interviewpartner aus dem Sortierbereich RFID, da RFID-Tags ohne Sichtkontakt detektiert, in bestehende Sortierprozesse integriert und für hohe Massenströme eingesetzt werden können (A, D). Nachteilig ist jedoch, dass sie den Tragekomfort der Textilien beeinträchtigen können und vor dem Recycling in einem zusätzlichen Prozessschritt entfernt werden müssen. Chemische Marker könnten das Recyclingprodukt verunreinigen. Anstatt nur die elastischen TPC-Garne zu markieren, was wiederum aufgrund geringer Anteile im Textil potenziell herausfordernd für die Detektion ist, könnte bei allen thermomechanisch recycelbaren Textilien ein entsprechender Marker eingesetzt werden (F, H, L). Optische Codes eignen sich aufgrund ihrer eingeschränkten Sichtbarkeit auf Förderbändern nur bedingt für eine automatisierte Sortierung, wobei eine standardisierte Platzierung die Erkennbarkeit verbessern könnte (D, M). Grundsätzlich weisen alle Kennzeichnungslösungen Einschränkungen auf. Physische Kennzeichnungen können vom Verbraucher entfernt oder bei einer vorgeschalteten Zerkleinerung abgetrennt werden. Zudem zeigt eine Studie der Europäischen Kommission, dass die Zusammensetzung von Fasermischungen auf 37 % der Textiletiketten nicht korrekt angegeben ist (European Commission, 2026). Auch die im DPP hinterlegten Informationen sind nur so verlässlich wie die zugrunde liegenden Daten. Darüber hinaus verursachen zusätzliche Kennzeichnungen technischen, wirtschaftlichen und ökologischen

Aufwand und sollten daher nur erfolgen, wenn sie für die Identifizierung und Sortierung einen nachweisbaren Mehrwert gegenüber einer ausschließlichen NIR-Sortierung bieten. (H, I, E, M, L, K)

3.6 Treiber

Die Interviews zeigen, dass die Etablierung eines Sammel- und Sortiersystems für TPC-haltige Textilien im Wesentlichen von zwei Treibern abhängt: einem funktionierenden Markt oder regulatorischen Vorgaben. Ein marktgetriebenes System setzt voraus, dass Erfassung, Sortierung und Recycling wirtschaftlich tragfähig sind und entlang der Wertschöpfungskette ausreichende wirtschaftliche Anreize bestehen. Da derzeit sowohl eine verlässliche Nachfrage nach Rezyklaten als auch entsprechende Investitionsanreize fehlen, werden regulatorische Instrumente wie ökomodulierte Gebühren und Recyclingquoten im Rahmen der erweiterten Herstellerverantwortung sowie Anforderungen an die Recyclingfähigkeit und Mindestanteile recycelter Materialien im Rahmen der Ökodesign-Verordnung als wesentliche Hebel angesehen. (C, G, J, M)

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Für TPC-haltige Textilien stellt die Erfassung über bestehende gemischte Altkleidersammelsysteme in Kombination mit einer automatisierten Sortierung mittels NIR-Spektroskopie die bevorzugte Lösungsvariante dar. Durch die Zuordnung zur reinen PET-Fraktion können zusätzliche logistische Aufwände vermieden und die Bereitstellung ausreichender Materialmengen für ein thermomechanisches Recycling erleichtert werden. Voraussetzung hierfür ist eine zuverlässige Materialerkennung mittels NIR-Technologie. Sollte dies nicht möglich sein, kann ein zusätzliches Kennzeichnungssystem die Sortierung unterstützen, ist jedoch mit Unsicherheiten hinsichtlich Umsetzbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Verlässlichkeit der hinterlegten Informationen verbunden. Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der Erkennung und ggf. Quantifizierung von TPC-Anteilen in Textilien mittels NIR-Spektroskopie.

5 DANKSAGUNG

Wir danken dem deutschen Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) für die Förderung des Forschungsprojektes „RElastan“ im Rahmen der DATIpilot Innovationscommunity Circular Textiles (Förderkennzeichen 03DPC0313S).

LITERATURVERZEICHNIS

Ellen MacArthur Foundation. (2017). A new textiles economy: Redesigning fashion’s future.

European Commission. (2026). Market surveillance : consumer textile clothing : final report : JACOP 2025. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Refashion. (2023). Characterisation study of the incoming and outgoing streams from sorting facilities.

Schawel, C. Billing, F. (2014). Morphologischer Kasten. In C. Schawel & F. Billing, Top 100 Management Tools. Wiesbaden: Gabler Verlag.

Wissel, R., Ludes, A., & Küppers, B. (2024). Sorting and Recycling of Elastic Textiles. In J. Thiel, & T. Gries, Elastic Yarns and Textiles. München: Hanser Verlag.

Wissel, R., Thiel, J., Saenger, T., Gries, T. & Ludes, A. (2025). Fibre- and yarn-based approaches to simplify the recycling of elastic textiles. Proceedings of 8th International Conference on Industrial & Hazardous Waste Management. Chania, Greece.

Warum Textilsortierung so kompliziert ist?

Annika Ludes[1], Elias Pfund[2], Tobias Dietl[3] & Bastian Küppers[1]
[1)] Stadler Anlagenbau GmbH, Process Engineering, Aachen, Deutschland
[2)] Stadler Anlagenbau GmbH, Digital Solutions, Altshausen, Deutschland
[3)] Stadler Anlagenbau GmbH, International Sales, Bottrop, Deutschland

KURZFASSUNG: In der Abfallwirtschaft gilt: Input bestimmt Output. Hochwertiges Recycling setzt voraus, dass Stoffströme ausreichend sauber, bekannt und zuverlässig getrennt werden. Leichtverpackungen (LVP) bilden hierfür ein weit entwickeltes Referenzsystem mit etablierten Sammelstrukturen, mechanischer Vorbehandlung, sensorgestützter Sortierung und definierten Outputfraktionen. Textilien unterscheiden sich davon grundlegend: Vor einer materialbasierten Sortierung muss zunächst entschieden werden, ob ein Artikel für die Wiederverwendung geeignet ist oder dem Recycling zugeführt werden soll. Die Sortierung umfasst damit eine zusätzliche Entscheidungsebene, in der Produkttyp, Gebrauchszustand und Wiederverwendbarkeit bewertet werden. Erst anschließend stehen Materialzusammensetzung, Faserblends, Farben, Beschichtungen und nichttextile Bestandteile im Fokus, um geeignete Recyclingfraktionen zu bilden. Marktfähiges Textilrecycling entsteht daher erst durch das Zusammenspiel von Sammlung, Vorbehandlung, Sortiertechnik, Qualitätssicherung, Output-Spezifikationen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Erst wenn textile Sortierfraktionen eindeutig spezifiziert, ihre Qualität messbar und ihre Anforderungen entlang der Recyclingprozesskette abgestimmt sind, können Alttextilien zu einem skalierbaren Sekundärrohstoffstrom werden.

1 INPUTQUALITÄT ALS AUSGANGSPUNKT HOCHWERTIGER VERWERTUNG

Die Abfallwirtschaft folgt einer einfachen, aber weitreichenden Regel: Die Qualität des Inputs bestimmt die Leistungsfähigkeit des Sortierprozesses und damit die Qualität des Outputs. Was bei der Sammlung stark vermischt oder verschmutzt ist, lässt sich später nur mit erhöhtem Aufwand oder mit Qualitäts- und Materialverlusten verwerten. Hochwertiges Recycling beginnt deshalb bereits bei der Sammlung, Vorsortierung und Qualitätssicherung der Produkte.
Im Leichtverpackungsrecycling ist diese Logik seit Jahrzehnten Grundlage der Anlagenentwicklung. LVP-Sortieranlagen verarbeiten heterogene Verpackungsabfälle und überführen diese in definierte Sortierfraktionen. Obwohl auch Verpackungsabfälle Fehlwürfe, Verbunde, Verschmutzungen und nicht recyclingfähige Bestandteile enthalten, existieren vergleichsweise ausgereifte Systeme aus Sammlung, Sortiertechnik, Abnehmermärkten und regulatorischen Vorgaben in verschiedenen Ländern. (Kusch et. al, 2021)
Für Textilien steht ein vergleichbares System erst am Anfang. Die EU-weite Pflicht zur getrennten Sammlung seit 2025 wird die erfassten Mengen voraussichtlich erhöhen; gleichzeitig kann mit steigenden Sammelmengen die durchschnittliche Qualität sinken (European Environment Agency, 2024). Entscheidend ist daher nicht nur, mehr Textilien zu erfassen, sondern verwertbare, spezifizierte und marktfähige Stoffströme zu erzeugen.

2 LVP ALS REFERENZ: EIN GEREIFTES, ABER NICHT EINFACHES SYSTEM

Leichtverpackungen sind keineswegs einfach zu sortieren. Sie enthalten unterschiedliche Kunststoffe, Metalle, Getränkekartons, Folien, Fehlwürfe und Verbundmaterialien. Dennoch ist die Prozesslogik vergleichsweise klar. Sammlungssysteme, Sortierziele und Outputfraktionen sind über Jahre gewachsen und aufeinander angepasst worden. Kunststoffe werden nach Hauptpolymeren wie PET, PE oder PP getrennt, Metalle abgeschieden und Störstoffe über mechanische sowie sensorgestützte Schritte reduziert (Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister, 2026).

Für den Vergleich mit Textilien sind drei Punkte zentral:

- Erstens ist die LVP-Sortierung stark auf Mengenleistung und standardisierte Fraktionen ausgelegt.
- Zweitens sind die Sortierziele relativ eindeutig: Aus einem gemischten Verpackungsstrom sollen definierte Materialfraktionen entstehen.
- Drittens bestehen für viele Outputfraktionen etablierte Abnehmererwartungen an Reinheit, Störstoffanteil und Lieferform.

Diese Reife ist Ergebnis einer langen Systementwicklung: erweiterte Herstellerverantwortung, getrennte Sammlung, automatisierte Sortiertechnik, regulatorische Quoten und wachsende Sekundärrohstoffmärkte haben sich über Jahrzehnte aufeinander eingestellt.
Für Textilien ist diese Analogie hilfreich, darf aber nicht als technische Blaupause verstanden werden. LVP zeigt vor allem, welche Systemvoraussetzungen nötig sind:

- definierte Inputs,
- klare Outputfraktionen,
- messbare Qualitäten,
- passende Abnehmer und
- ein tragfähiges Finanzierungsmodell.

3 TEXTILIEN ZWISCHEN WIEDERVERWENDUNG UND RECYCLING

Ein wesentlicher Unterschied liegt im ersten Schritt nach der Sammlung. Bei LVP ist die Nutzung des Produkts nach der Entsorgung beendet; die Sortierung erzeugt Materialfraktionen für Recycling oder sonstige Verwertung. Eine erneute Nutzung des einzelnen Verpackungsartikels wird in der Regel nicht geprüft.
Bei Textilien ist das anders. Zunächst muss auf Artikelebene bewertet werden, ob ein Stück wiederverwendbar, für eine Vorbereitung zur Wiederverwendung geeignet oder dem Recycling zuzuführen ist. Ein getrennt gesammeltes Kleidungsstück ist daher nicht automatisch Recyclinginput; es kann weiterhin Produkt, reparaturfähiger Artikel oder erst nach der Bewertung Rohstoff sein.
Diese zusätzliche Entscheidungsebene erhöht die Komplexität. Neben Materialzusammensetzung und Recyclingfähigkeit zählen Artikelzustand, Marktgängigkeit, Funktion, Farbe, Konstruktion und Ausstattung. Ein T-Shirt, eine Jeans, eine Jacke oder ein Vorhang kann trotz ähnlicher Hauptfasern je nach Verschleiß, Verschmutzung, Beschichtung, Elastananteil, Futterstoffen, Nähten oder nichttextilen Bestandteilen unterschiedliche Verwertungswege erfordern.
Erst wenn Wiederverwendung oder Vorbereitung zur Wiederverwendung ausscheiden, rückt die material- und farbbezogene Sortierung in den Vordergrund. Dann werden Faserarten und Faserblends entscheidend. Relevante Materialien sind vor allem Baumwolle, Polyester, weitere verbreitete Materialien sind Polyamid, Wolle, Viskose, Acryl und Elastan. Viele Textilien bestehen jedoch aus Mischungen; eine Refashion-Studie beziffert Faserblends auf rund 45 % des nicht wiederverwendbaren textilen Feedstocks, wobei Zweikomponenten-Blends den größten Anteil stellen (Refashion, 2023).
Für Verbraucherinnen und Verbraucher sind solche Mischungen funktional sinnvoll: Polyester erhöht Festigkeit und Formstabilität, Baumwolle den Tragekomfort, Elastan die Dehnbarkeit. Für Sortierung und Recycling entstehen daraus Zielkonflikte. Elastan, Beschichtungen, mehrlagige Konstruktionen, Knöpfe, Reißverschlüsse, Labels oder Nähgarne können Prozesse stören oder zusätzliche Vorbehandlung erfordern. Die EU-Textilstrategie nennt Faserblends und Elastan ausdrücklich als erschwerende Faktoren (European Commission, 2022).
Wiederverwendung und Recycling konkurrieren teilweise um denselben Inputstrom, sind abfallwirtschaftlich aber nicht gleichrangig. Im Sinne der Abfallhierarchie hat Wiederverwendung beziehungsweise Vorbereitung zur Wiederverwendung Vorrang vor Recycling, sofern sie ökologisch sinnvoll und marktfähig ist (European Commission, 2022; Sandin & Peters, 2018). Die Textilsortierung muss diese Priorisierung technisch, organisatorisch und wirtschaftlich abbilden.

Genau diese zusätzliche Entscheidung über den nächsten Nutzungspfad macht Textilsortierung komplexer als eine reine Materialtrennung.

4 SAMMLUNG DEFINIERT DEN INPUT

Eine Sortieranlage kann nur mit dem arbeiten, was im Input vorhanden ist. Sammlungssysteme beeinflussen daher direkt die technische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Sortierung. Bei Textilien reichen die Wege von Depotcontainern, kommunalen Sammelstellen und karitativen Sammlungen über Handelsrücknahmen bis zu künftig stärker EPR-basierten Systemen.
Der Unterschied liegt nicht nur in der Logistik, sondern auch in Qualität und Zusammensetzung. Feuchtigkeit, Schimmel, Öl, Farben, Gerüche oder Fehlwürfe, insbesondere Kontakte mit Restabfall, können Wiederverwendung und Recycling beeinträchtigen. Entscheidend sind Häufigkeit, Art und Anteil solcher Störfaktoren sowie die Frage, ob sie zuverlässig erkannt und ausgeschleust werden können. Eine hochwertige Sammlung, etwa durch klare Nutzerkommunikation, geeignete Behälter oder persönliche Übergabe, verbessert die Inputqualität, verursacht aber häufig mehr Aufwand und führt dadurch zu einer niedrigeren Sammelquote.
Für die Praxis bedeutet das: Sammlung darf nicht nur auf Menge optimiert werden. Hohe Sammelquoten ohne ausreichende Qualität erhöhen Sortieraufwand, Ausschuss und Recyclingkosten. Hier liegt eine zentrale Schnittstelle zwischen kommunaler Abfallwirtschaft, Herstellersystemen, Sortieranlagen und Recyclingbetrieben.

5 RECYCLING DEFINIERT DEN OUTPUT

Während die Sammlung den Input bestimmt, definiert das Recycling den benötigten Output. Bei Textilien ist diese Schnittstelle besonders kritisch, weil Anforderungen an Faserzusammensetzung, Blend-Anteile, Farbe, Beschichtungen, Elastan und textilfremde Bestandteile noch weniger standardisiert sind als bei etablierten LVP-Fraktionen. Mechanische Verfahren benötigen möglichst störstoffarme Inputs; Faserlänge, Materialreinheit, Farbe und Mischungsanteile beeinflussen die Produktqualität. Thermomechanische und chemische Verfahren stellen andere Anforderungen, etwa an Polymerreinheit, zulässige Fremdfasern, Farbstoffe oder Beschichtungen. Für die Sortierung bedeutet das: Der benötigte Output lässt sich nicht unabhängig vom späteren Recyclingverfahren definieren. Je nach Recyclingpfad unterscheiden sich Vorbehandlung, Reinheitsanforderungen und zulässige Störstoffe deutlich (Huygens et al., 2023).
In der Textil- und Abfallindustrie verwendete Begriffe für „Sortierung fürs Recyling“ zeigen, dass diese Schnittstelle bei Textilien weniger eindeutig ist als bei LVP. Boston Consulting Group und ReHubs unterscheiden beispielsweise zwischen „sorting“ als Einordnung gesammelter Textilien in Wiederverwendung, Recycling oder Entsorgung und „pre-processing“ als Vorbereitung eines recyclingfähigen Feedstocks, einschließlich Entfernung nicht ausreichend reiner Materialien, Störstoffen wie Reißverschlüssen oder Drucken, Reinigung und Zerkleinerung (Boston Consulting Group & ReHubs, 2026).
Die zentrale Frage lautet daher nicht: „Wie sortiert man Textilien allgemein?“ Entscheidend ist: „Welche Qualität benötigt welcher Verwertungsweg?“ Eine baumwollreiche Fraktion für mechanische Faseröffnung stellt andere Anforderungen als eine polyesterreiche Fraktion für chemisches Recycling. Sortierung ist damit keine isolierte Anlagenfunktion, sondern das Bindeglied zwischen Sammlung und Recycling. Ohne klare Recyclinganforderungen bleibt unklar, wie tief sortiert werden muss; ohne definierte Sortierfraktionen bleibt unklar, welchen Wert der Output hat.
Im LVP-Bereich sind Sortierfraktionen, Reinheitsanforderungen, Störstoffgrenzen und Lieferformen in vielen Bereichen etabliert. Textilien können dagegen als Produkte deutlich variabler aufgebaut sein: mit Blends, Multilayer-Strukturen, Beschichtungen, Futterstoffen oder nichttextilen Bestandteilen. Marktweit akzeptierte Spezifikationen für viele Textilrecyclingfraktionen fehlen deshalb noch weitgehend. Häufig definiert der jeweilige Abnehmer die Fraktion: Ein Recycler benötigt hohe Baumwollreinheiten, ein anderer akzeptiert bestimmte Polyester-Baumwoll-

Blends, ein dritter verlangt helle Ware oder geringe Elastananteile. Hinzu kommt, dass frühe industrielle Recyclingpfade nicht automatisch alle Faserarten gleichermaßen adressieren. Die aktuelle ReHubs/BCG-Studie fokussiert ihren Feedstock für textile-to-textile-Recycling auf hochwertige Baumwoll- und Polyesterströme: 100 % Baumwolle, 100 % Polyester oder Polycotton mit mehr als 70 % Baumwolle beziehungsweise Polyester (Boston Consulting Group & ReHubs, 2026).

Das Fehlen einheitlicher Spezifikationen ist mehr als ein formales Problem. Ohne Spezifikationen gibt es keinen stabilen Qualitätsdialog zwischen Sortierbetrieben, Anlagenherstellern, Recyclern, Marken und Regulierung. Sortieranlagenbetreiber wissen nicht, welche Trenntiefe wirtschaftlich notwendig ist; Recycler wissen nicht, ob die gelieferte Fraktion innerhalb ihrer Prozessgrenzen liegt. Quoten oder EPR-Systeme können dann Mengen erzeugen, ohne die benötigten Qualitäten zu sichern.
Eine textile Output-Spezifikation sollte mindestens Hauptfaser beziehungsweise Hauptmaterial, zulässige Fremdfaser- und Fremdmaterialanteile, Blend-Grenzen, Farbe, Feuchte, Verschmutzung, Beschichtungen, Ausrüstungen, Elastananteile, textilfremde Bestandteile, Konfektionselemente, Lieferform, Probenahme und Prüfverfahren beschreiben. Qualität muss einheitlich definiert, repräsentativ beprobt und nachvollziehbar messbar sein.
Die Qualitätskontrolle bildet das Bindeglied zwischen Spezifikation und Marktvertrauen. In etablierten Abfallströmen ist repräsentative Probenahme Stand der Technik; bei Textilien müssen geeignete Methoden auf die Anforderungen einzelner Recyclingpfade übertragen und weiter standardisiert werden. Die Herausforderung besteht also nicht darin, Qualität grundsätzlich messbar zu machen, sondern sie recyclingpfadspezifisch, praktikabel und marktweit akzeptiert zu prüfen.
Damit wird deutlich: Recycling definiert nicht nur den gewünschten Output, sondern auch Sortiertiefe, Qualitätssicherung und Messmethodik. Für LVP sind diese Schnittstellen über Jahrzehnte gewachsen; für Textilien müssen sie harmonisiert und industriell skaliert werden.

6 SORTIERKOMPLEXITÄT: MATERIALSTROM, ARTIKEL UND MATERIAL

Nach der Entscheidung gegen Wiederverwendung verschiebt sich die Sortieraufgabe auf die recyclingrelevante Materialstruktur. Auch bei LVP werden einzelne Objekte erkannt, klassifiziert und ausgeschleust; die besondere Komplexität von Textilien liegt jedoch unterhalb der Artikelebene. Ein Kleidungsstück kann aus mehreren textilen Flächen, Garnen, Faserblends, Beschichtungen, Futterstoffen, Nähgarnen und Konfektionselementen bestehen. Die erkannte Artikel- oder Hauptmaterialklasse beschreibt daher nicht automatisch die für das Recycling relevante Zusammensetzung. Textilsortierung muss zwischen äußerer Erscheinung, Faserzusammensetzung und Eignung für den jeweiligen Recyclingpfad vermitteln.
Das erhöht den Sortieraufwand. Textilien sind weich, faltbar, überlagernd, unterschiedlich groß und oft mehrschichtig. Diese Materialeigenschaften erschweren die vollumfängliche sensorische Erfassung der Artikel. Außenmaterial, Futter, Beschichtung und Elastananteile können innerhalb eines Textils voneinander abweichen; Farben, Verschmutzungen und Oberflächenstrukturen beeinflussen optische und spektroskopische Messungen.
Nahinfrarotspektroskopie ist ein wichtiger Baustein der automatisierten Textilerkennung. Cura et al. zeigen, dass NIR-basierte Verfahren Textilien nach Materialart sortieren und damit geeignete Inputqualitäten für Recyclingprozesse unterstützen können (Cura et al., 2021). Becker et al. zeigen für polyesterhaltige Textilabfälle, dass unterschiedliche Faserblends experimentell erkannt und sortiert werden können; geeignet definierte Inputströme bleiben jedoch Voraussetzung für hochwertiges Recycling (Becker et al., 2024).
Sensorik ist damit notwendig, aber nicht hinreichend. Industrielle Sortierung braucht zusätzlich Vereinzelung, robuste Objektführung, geeignete Datenmodelle, Klassifikationsgrenzen, Nachsortierung, Qualitätssicherung und Abnehmerdefinitionen. Erst ihr Zusammenspiel macht aus Erkennungstechnologie einen industriellen Sortierprozess.

7 WIRTSCHAFTLICHKEIT: RECYCLING KOSTET GELD

Technische Machbarkeit allein reicht nicht aus. Sammlung, Transport, Sortierung, Qualitätssicherung, Vorbehandlung und Recycling verursachen Kosten. Diese stehen in Konkurrenz zu Neumaterialien, deren Preise Umweltkosten der Primärproduktion oft nicht vollständig abbilden. Dadurch entsteht eine ökonomische Lücke zwischen dem gesellschaftlich gewünschten Recycling und dem einzelwirtschaftlich günstigeren Materialpfad. Zugespitzt gilt daher der abfallwirtschaftliche Grundsatz: „Abfall folgt dem Weg des geringsten Geldes“ (Pomberger, 2024).
Erweiterte Herstellerverantwortung kann hier eine zentrale Rolle spielen. Die Richtlinie (EU) 2025/1892 erweitert die Abfallrahmenrichtlinie unter anderem um Vorgaben zu Textilien, textilbezogenen Produkten und Schuhen. Sie zielt darauf ab, Produzenten stärker an den Kosten für Sammlung, Sortierung, Vorbereitung zur Wiederverwendung und Recycling zu beteiligen (Europäische Union, 2025). Entscheidend ist jedoch die Ausgestaltung: EPR-Systeme sollten nicht nur Mengen finanzieren, sondern auch Qualität, Langlebigkeit, Recyclingfähigkeit und ökologische Auswirkungen berücksichtigen. Ökomodulierte Beiträge, Design-for-Recycling-Kriterien, Rezyklateinsatzquoten und Qualitätsanforderungen können dazu beitragen, die Kostenlücke zwischen Recycling- und Neumaterial zu verringern.
Die Kostenfrage hängt eng mit dem Absatzmarkt zusammen. Ein sortierter Alttextilstrom wird erst dann zum Sekundärrohstoff, wenn er in nachgelagerten Stufen tatsächlich aufgenommen und verarbeitet wird. Der textile Kreislauf schließt sich daher nicht bereits mit der Sortierfraktion, sondern erst entlang der Wertschöpfungskette:
Sortierfraktion → Voraufbereitung → Recycling → Faser/Polymer → Garn → textile Fläche → Konfektion/Marke
Jede dieser Stufen stellt eigene Anforderungen an Menge, Qualität, Preis, Lieferform und Prozesssicherheit. Eine sortierte Baumwoll- oder Polyesterfraktion hat keinen gesicherten Marktwert, wenn geeignete Recyclingkapazitäten, Spezifikationen oder Abnehmer fehlen. Die Herausforderung liegt somit nicht allein in der Sortierung, sondern im Marktanschluss der erzeugten Fraktionen.
Dieser Marktanschluss ist bei Textilien besonders anspruchsvoll, weil die textile Wertschöpfungskette global stark fragmentiert ist. Ein erheblicher Anteil der Rohstoffe und Produktionsschritte für in Europa konsumierte Textilien liegt außerhalb Europas; zugleich werden große Mengen der auf dem EU-Markt konsumierten Modeprodukte importiert (European Environment Agency, 2025; European Commission, 2026). Dadurch fehlt nicht grundsätzlich industrielle Kompetenz in Europa. Die Lücke liegt vielmehr darin, sortierte Alttextilien stabil an Recycler, Faserhersteller, Garn- und Flächenproduzenten sowie Marken zurückzuführen.
Damit wird deutlich: Eine textile Kreislaufwirtschaft entsteht nicht allein durch Sortiertechnik. Sie benötigt Spezifikationen, Qualitätssicherung, Recyclingkapazitäten, Abnahmeverträge und wirtschaftliche Anreize. Erst wenn Sortierfraktionen, Pre-Processing, Recyclingtechnologien und Absatzmärkte zusammenpassen, kann aus Alttextilien ein tragfähiger Sekundärrohstoffstrom entstehen.

8 SCHLUSSFOLGERUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

Textilsortierung ist komplex, weil sie mehrere Funktionen gleichzeitig erfüllen muss: wiederverwendbare Artikel erkennen, recyclingfähige Materialien trennen, Störstoffe entfernen, unterschiedliche Recyclingtechnologien bedienen und marktfähige Qualitäten bereitstellen. Anders als LVP sind Textilien nicht nur heterogene Materialströme, sondern heterogene Produktströme.
Der Vergleich mit LVP zeigt, worauf es ankommt: Sammlung definiert den Input, Recycling den Output, und Sortierung – einschließlich der Entscheidung über Wiederverwendung sowie der recyclingpfadspezifischen Voraufbereitung – verbindet beide Seiten. Sensoren, KI und Automatisierung sind wichtige Werkzeuge; Skalierung gelingt jedoch erst, wenn Outputfraktionen spezifiziert, Qualität messbar, Abnehmeranforderungen transparent und Kosten finanziert sind.

Die vier zentralen Punkte lauten daher:

1. Input bestimmt Output.
2. Sortierbarkeit begrenzt Recyclingfähigkeit.
3. Gemeinsame Begriffe und Spezifikationen ermöglichen Marktdialog.
4. Recycling braucht ein tragfähiges Finanzierungsmodell und verlässliche Nachfrage.

Erst wenn diese Bedingungen zusammenkommen, kann aus Alttextilien ein industriell nutzbarer Sekundärrohstoffmarkt entstehen, der nicht nur sortiert, sondern tatsächlich in textile Wertschöpfungsketten zurückgeführt wird.

LITERATURVERZEICHNIS

Becker, A., Datko, A., Kroell, N., Küppers, B., Greiff, K., & Gries, T. (2024). *Near-infrared-based sortability of polyester-containing textile waste* (Bd. 206). Amsterdam, Niederlande: Elsevier.

Boston Consulting Group & ReHubs. (2026). *Advancing textile circularity: Europe's textile waste surge: The case for system-level scale-up.* Boston/Brüssel: Boston Consulting Group/ReHubs.

Cura, K., Rintala, N., Kamppuri, T., Saarimäki, E., & Heikkilä, P. (2021). *Textile recognition and sorting for recycling at an automated line using near infrared spectroscopy* (Bd. 6). Basel, Schweiz: MDPI.

Europäische Union. (2025). *Richtlinie (EU) 2025/1892 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 10. September 2025 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle (Text von Bedeutung für den EWR).* Amtsblatt der Europäischen Union, L 2025/1892.

European Commission. (2022). *EU strategy for sustainable and circular textiles.* Brüssel, Belgien: European Commission.

European Commission. (2026). *Textiles, clothing, leather and footwear industries.* Brüssel, Belgien: European Commission.

European Environment Agency. (2024). *Management of used and waste textiles in Europe's circular economy.* Kopenhagen, Dänemark: European Environment Agency.

European Environment Agency. (2025*). Raw material use for EU's textiles consumption*. Kopenhagen, Dänemark: European Environment Agency.

Huygens, D., Foschi, J., Caro, D., Caldeira, C., Faraca, G., Foster, G., Solis, M., Marschinski, R., Napolano, L., Fruergaard Astrup, T., & Tonini, D. (2023). *Techno-scientific assessment of the management options for used and waste textiles in the European Union.* Luxemburg, Luxemburg: Publications Office of the European Union.

Kusch, A., Gasde, J., Deregowski, C., Woidasky, J., Lang-Koetz, C., & Viere, T. (2021). *Sorting and Recycling of Lightweight Packaging in Germany — Climate Impacts and Options for Increasing Circularity Using Tracer-Based-Sorting.* Materials Circular Economy, 3, 10.

Pomberger, R. (2024). *Potenziale und Grenzen der (abfallwirtschaftlichen) Kreislaufwirtschaft.* In R. Pomberger et al. (Hrsg.), *VORTRÄGE-Konferenzband zur 17. Recy & DepoTech-Konferenz* (S. 65–72). Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft.

Refashion. (2023). *Characterisation study of the incoming and outgoing streams from sorting facilities.* Paris, Frankreich: Refashion.

Sandin, G., & Peters, G. M. (2018). *Environmental impact of textile reuse and recycling—A review* (Bd. 184). Amsterdam, Niederlande: Elsevier.

Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister. (2026). *Sortierquoten nach Stand der Technik: Factsheet Sortierung von Leichtverpackungen.* Osnabrück, Deutschland: Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister.

Textilrecycling als Pionierfeld der Kreislaufwirtschaft: Marktkomplexität und Umsetzung in der Praxis

Eva-Maria Wurzer[1] & Herwig Pfeiffer[2]
[1)] Saubermacher Österreich GmbH, Business Development Textilien, Feldkirchen bei Graz, Österreich
[2)] Saubermacher AG, Forschung & Entwicklung, Feldkirchen bei Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Textilien stehen zunehmend im Fokus der europäischen Kreislaufwirtschaft. Steigende Konsummengen, sinkende Produktqualitäten und die seit 2025 verpflichtende getrennte Sammlung von Textilien erhöhen den Druck, neue Verwertungswege für Alttextilien zu schaffen. Der Beitrag betrachtet den Alttextilmarkt als Zusammenspiel von Inputmarkt (Sammlung), Recyclingmarkt (Sortierung und Verwertung) und Outputmarkt (Absatzmärkte für Reuse und Recyclingrohstoffe). Dabei wird deutlich, dass eine funktionierende textile Kreislaufwirtschaft auf zwei Säulen basiert: Reuse und Recycling. Während Wiederverwendung weiterhin die ökologisch bevorzugte Option bleibt, reichen die bestehenden Second-Hand-Märkte allein nicht aus, um die zukünftig anfallenden Mengen zu bewältigen. Der strategische Zukunftsmarkt liegt daher im Aufbau von Sortier-, Vorbehandlungs- und Recyclinginfrastruktur. Die größten Herausforderungen bestehen in der Materialkomplexität von Textilien, fehlenden industriellen Kapazitäten sowie der Entwicklung stabiler Absatzmärkte für textile Sekundärrohstoffe. Gleichzeitig bieten EPR-Systeme und neue industrielle Kooperationen erhebliche Chancen für den Aufbau einer leistungsfähigen Kreislaufwirtschaft.

1 AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG

Textilien rücken zunehmend in den Mittelpunkt der europäischen Debatte um Kreislaufwirtschaft, Ressourcenschutz und Nachhaltigkeit. Bilder von Textilbergen in der Atacama-Wüste, in Accra oder Nairobi verdeutlichen die Grenzen eines linearen Systems aus steigendem Konsum, kurzen Nutzungsdauern und fehlenden Verwertungsstrukturen für Alttextilien. Gleichzeitig zeigen sie die Grenzen eines Marktes auf, der sich bislang stark auf Wiederverwendung noch tragbarer Kleidung und den Export gebrauchter Textilien stützte.
Die Textilindustrie verursacht erhebliche Umweltwirkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette: Faserproduktion, Chemikalieneinsatz, Wasser- und Energieverbrauch, kurze Nutzungszyklen sowie wachsende Abfallmengen. Gleichzeitig verändert sich der Abfallmarkt grundlegend. Die EU-weite Pflicht zur getrennten Sammlung von Textilien seit 2025, die überarbeitete Abfallrahmenrichtlinie und die Einführung erweiterter Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility, EPR) verschieben Verantwortung und Finanzierung stärker in Richtung Hersteller, Importeure und Inverkehrbringer. (Ellen MacArthur Foundation, 2017; OR Foundation, 2024; United Nations Environment Programme (UNEP), 2024; Europäische Kommission, 2025)

Laut der aktuellen Studie von Boston Consulting Group (BCG) & ReHubs (2026) erzeugt Europa jährlich rund 15,2 Mio. Tonnen Textilabfälle, davon etwa 13,3 Mio. Tonnen Post-Consumer-Textilien. Gleichzeitig werden derzeit weniger als 1 % dieser Mengen im Sinne eines Textil-zu-Textil-Recyclings wieder zu neuen Textilien verarbeitet. Für Österreich wird das jährliche Aufkommen auf rund 220.000 bis 250.000 Tonnen Textilabfälle geschätzt. Lediglich etwa 20-25% werden getrennt gesammelt, während der Großteil weiterhin über den Restmüll erfasst und überwiegend energetisch verwertet wird. Durch getrennte Sammlung und den Aufbau neuer Verwertungsstrukturen könnten in Österreich künftig zusätzlich über 110.000 Tonnen Alttextilien pro Jahr für Wiederverwendung und Recycling erschlossen werden. (Boston Consulting Group (BCG) & ReHubs, 2026; Umweltbundesamt Österreich, 2022)
Ziel dieses Beitrags ist es, die Marktkomplexität des Textilrecyclings praxisnah darzustellen.

2 MARKTLOGIK: DREI GEKOPPELTE TEILMÄRKTE

Der Alttextilmarkt lässt sich als Zusammenspiel von drei Teilmärkten betrachten: Inputmarkt (Sammlung), Recyclingmarkt (Sortierung, Vorbehandlung und stoffliche Verwertung) sowie Outputmarkt (Absatzmärkte für Reuse und Recyclingrohstoffe). Während der Markt lange vor allem über Sammelmengen, Sortierung für tragfähige Kleidung und internationale Second-Hand-Märkte funktionierte, stößt dieses Modell zunehmend an Grenzen. Fast Fashion, steigende Mengen, sinkende Materialqualitäten, volatile Exportmärkte sowie strengere Anforderungen an Nachverfolgbarkeit und Abfallverbringung führen dazu, dass nicht wiederverwendbare Textilien künftig verstärkt in Europa sortiert, aufbereitet und recycelt werden müssen. Die Erfolgschancen hängen dabei weniger von einzelnen technologischen Durchbrüchen ab als vom gleichzeitigen Aufbau aller drei Teilmärkte. Sammlung allein schafft noch keine Kreislaufwirtschaft – erst das Zusammenspiel von Sortierung, Recyclinginfrastruktur und Absatzmärkten ermöglicht eine nachhaltige stoffliche Verwertung. Genau darin liegt der Pioniercharakter des Textilrecyclings: Märkte, Qualitätsstandards und Geschäftsmodelle müssen parallel zur Entwicklung der Wertschöpfungsketten aufgebaut werden. (McKinsey & Company, 2024; ReHubs Europe, 2024; European Environment Agency (EEA), 2024; EuRIC – European Recycling Industries Confederation, 2024)

2.1 Inputmarkt: Sammlung zwischen Menge, Qualität und Steuerung

Der Inputmarkt umfasst gebrauchte Textilien aus Haushalten, kommunalen Sammelsystemen, sozialwirtschaftlichen Strukturen und Gewerbe, sowie Mietwäsche. Im Unterschied zu früheren Marktphasen ist heute nicht mehr ausschließlich die verfügbare **Sammelmenge** der zentrale Engpass. Durch die verpflichtende getrennte Sammlung von Textilien in Europa, steigendes öffentliches Bewusstsein und den Ausbau bestehender Sammelsysteme werden künftig zunehmend größere Mengen an Alttextilien erfasst. Die Herausforderung verschiebt sich damit entlang der Wertschöpfungskette in die nachgelagerten Schritte: hochwertige Sortierung, automatisierte Materialerkennung, regionale Vorbehandlung sowie die Entwicklung leistungsfähiger Recycling- und Absatzmärkte.
Eine Schlüsselrolle kommt dabei der **erweiterten Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility, EPR)** zu. Sie wird in den kommenden Jahren maßgeblich darüber entscheiden, ob sich aus den steigenden Sammelmengen tatsächlich eine funktionierende textile Kreislaufwirtschaft entwickeln kann. EPR-Systeme schaffen nicht nur neue Finanzierungsströme für Sammlung, Sortierung und Recycling, sondern können durch ihre Ausgestaltung gezielt Anreize für kreislauffähiges Produktdesign, hochwertige Wiederverwendung und stoffliche Verwertung setzen. (Europäische Kommission, 2025; European Environment Agency (EEA) ,2024; ReHubs Europe, 2024)

Die **kommunale Sammlung** bleibt dennoch ein entscheidender Baustein des Inputmarktes, da sie sowohl die Qualität der erfassten Textilien als auch die nachfolgenden Verwertungskosten wesentlich beeinflussen. Container- und Bringsysteme ermöglichen die Erfassung großer Mengen, sind jedoch anfällig für Feuchtigkeit, Verschmutzung und Fehlwürfe. Betreute Sammelstellen, Indoor-Sammlungen oder Rücknahmesysteme im Handel und in sozialwirtschaftlichen Einrichtungen liefern häufig bessere Qualitäten, verursachen jedoch höhere Logistik- und Personalkosten. Vor diesem Hintergrund wird die Ausgestaltung der EPR-Systeme besonders relevant: Künftig sollte nicht allein die Sammelmenge honoriert werden, sondern insbesondere die **Qualität** der erfassten Textilien, ihre Wiederverwendbarkeit sowie ihre Eignung für hochwertige Recyclingprozesse. Andernfalls besteht die Gefahr, dass zwar mehr Textilien gesammelt werden, gleichzeitig jedoch auch die Mengen an nicht verwertbaren Textilien und letztlich die energetische Verwertung steigen.
Sozialwirtschaftliche Organisationen bleiben für die Kreislaufwirtschaft unverzichtbar. Sie verbinden Sammlung, lokale Wiederverwendung, Reparatur, Beschäftigung und soziale Teilhabe. Ihre Rolle wird durch die Einführung von EPR-Systemen abgesichert und damit einhergehend

werden sie in zukünftige Kreislaufstrukturen integriert. (European Environment Agency (EEA), 2024; Umweltbundesamt Österreich, 2022; RREUSE, 2024)

Gleichzeitig bieten **Berufsbekleidung und gewerbliche Wäschereisysteme** besonders attraktive Recyclinginputs: Die Materialzusammensetzung ist besser bekannt, Chargen sind homogener und Rücknahmesysteme können direkt mit Recyclinganforderungen verknüpft werden. Solche kontrollierten Stoffströme eignen sich für Pilotprojekte und den Aufbau industrieller Standards. (RREUSE, 2024; ReHubs Europe, 2024)

2.2 Reuse und Recycling: Die zwei Säulen der textilen Kreislaufwirtschaft

Eine funktionierende textile Kreislaufwirtschaft basiert auf zwei komplementären Säulen: Wiederverwendung (Reuse) und Recycling. Beide verfolgen das gemeinsame Ziel, die Nutzungsdauer von Ressourcen zu verlängern und die Verbrennung oder Deponierung wertvoller Materialien zu vermeiden, erfüllen dabei jedoch unterschiedliche Funktionen innerhalb der Wertschöpfungskette. Erst das Zusammenspiel von Reuse und Recycling ermöglicht es, den Anteil der energetischen Verwertung deutlich zu reduzieren und textile Ressourcen möglichst lange im Kreislauf zu halten. (Ellen MacArthur Foundation, 2017; European Environment Agency (EEA), 2024)

2.2.1 Reuse-Markt: dominierend, aber nicht ausreichend

Der Alttextilmarkt wurde über Jahrzehnte vom Reuse-Markt geprägt. Hochwertige Textilien gelangen in nationale Second-hand-Kanäle oder werden in internationale Märkte exportiert. Wiederverwendung bleibt die ökologisch bevorzugte Verwertungsoption, da sie die Nutzungsdauer von Produkten verlängert und die Herstellung neuer Textilien vermeidet.
Gleichzeitig gerät dieses Modell zunehmend unter Druck. Fast Fashion, sinkende Produktqualitäten, steigende Sortierkosten und volatile Exportmärkte erschweren die wirtschaftliche Tragfähigkeit. Darüber hinaus zeigen Beispiele wie die Atacama-Wüste, Accra oder Nairobi, dass nicht alle exportierten Textilien tatsächlich wiederverwendet werden können. Ein Teil verbleibt als Abfall in Ländern, deren Entsorgungs- und Kreislaufwirtschaftssysteme oftmals weniger entwickelt sind als in Europa.
Reuse bleibt daher eine unverzichtbare erste Säule der Kreislaufwirtschaft. Die Mengenentwicklung, begrenzte Absatzmärkte und die unvermeidbare End-of-Life-Problematik machen jedoch deutlich, dass Wiederverwendung allein die zukünftigen Herausforderungen nicht bewältigen kann. Für nicht tragfähige Textilien sind hochwertige Recyclinglösungen erforderlich. (Ellen MacArthur Foundation, 2017; European Environment Agency (EEA), 2024; EuRIC – European Recycling Industries Confederation, 2024; OR Foundation, 2024; United Nations Environment Programme (UNEP), 2024; McKinsey & Company, 2024)

2.2.2 Recycling-Markt: strategischer Zukunftsmarkt

Der Recyclingmarkt stellt den eigentlichen Zukunftsmarkt der textilen Kreislaufwirtschaft dar. Er umfasst alle Schritte zwischen Sammlung und Abnahme: Vorsortierung, automatische Fasererkennung, Störstoffentfernung, Entknöpfung, Entmetallisierung, Zerkleinerung, sowie die mechanische, thermomechanische, chemische oder enzymatische Verwertung von Alttextilien.
Gerade hier liegt aktuell der Engpass. Viele Prozesse sind noch personalintensiv, regionale Kapazitäten fehlen und die industrielle Infrastruktur ist nicht ausreichend skaliert. Ohne diese Zwischenschritte bleiben Alttextilien eine heterogene Restmasse statt eines nutzbaren Rohstoffstroms. Je nach Materialzusammensetzung und Materialqualität eignen sich Alttextilien für Textil-zu-Textil Recycling (Closed-Loop) oder Open-Loop Recycling (Einsatz von Textilrezyklat außerhalb der Textilindustrie). (EURATEX, 2024; McKinsey & Company, 2024; European Technology Platform for the Future of Textiles and Clothing (Textile ETP), 2024; ReHubs Europe, 2024)

Closed-loop-Recycling führt textile Altfasern in neue textile Produkte zurück. Mechanische und thermomechanische Verfahren sind bereits technisch etabliert und können industriell eingesetzt werden. Chemische und enzymatische Verfahren gelten zwar als vielversprechend, befinden sich jedoch vielfach noch im Demonstrations- oder Pilotmaßstab.
Mechanische Verfahren kommen vor allem bei Naturfasersystemen (z.B. Baumwolle, Wolle) oder Materialmixen (z.B. Polycotton) zum Einsatz, führen aber zu kürzeren Fasern und benötigen häufig Beimischungen von Primärfasern. Thermomechanische Verfahren bieten höhere Potenziale für sortenreine Polymerwerkstoffe (z.B. Polyester).
Der Markt steht dennoch erst am Anfang. Weniger als ein Prozent der weltweit für Bekleidung eingesetzten Fasern wird heute wieder zu neuen Textilien verarbeitet. Gleichzeitig sehen Studien erhebliche Wachstumspotenziale. Laut der aktuellen Studie von Boston Consulting Group (BCG) & ReHubs (2026) wären für den Aufbau eines wirtschaftlich tragfähigen europäischen Kreislaufsystems bis 2035 Recyclingkapazitäten von rund 2,7 Mio. Tonnen Textil-zu-Textil-Recycling pro Jahr erforderlich.
Für Österreich liegt das realistische Potenzial weniger im vollständigen Aufbau aller Recyclingtechnologien im Inland, sondern in der Rolle als hochwertiger Erfasser, Sortierer und Vorbereiter definierter Rohstofffraktionen. Abnehmer können europäische Garn-, Faser- und Textilregionen sein, aber auch angrenzende Produktionsräume wie Türkei und Marokko sowie perspektivisch asiatische Produktionsländer, sofern Qualität, Zertifizierung, Preis und Rückverfolgbarkeit stimmen. (EURATEX, 2024; Boston Consulting Group (BCG) & ReHubs, 2026; ReHubs Europe, 2024; European Technology Platform for the Future of Textiles and Clothing (Textile ETP), 2024)

Open-loop-Recycling ist kurz- bzw. mittelfristig mengenrelevanter als Closed-loop-Recycling. Heute werden nicht tragfähige Textilien häufig als gemischte Fraktion zu Putzlappen, Füllstoffen, Dämmstoffen, Vliesstoffen oder Akustikmaterial verarbeitet. Das in dieser Form angewandte stoffliche Recycling ist besser als Verbrennung, schöpft das Rohstoffpotenzial aber nur begrenzt aus. Die Wertschöpfung steigt, wenn Textilien anwendungsspezifisch sortiert und aufbereitet werden – auch für das Open-Loop-Recycling. Nur durch eine qualitätsorientierte Aufbereitung können textile Sekundärrohstoffe gezielt an die Anforderungen unterschiedlicher Industrien angepasst werden und so auch außerhalb der Textilindustrie volumenstarke Abnehmermärkte erschließen. (McKinsey & Company, 2024; EURATEX, 2024)

2.3 Outputmärkte für Recyclingrohstoffe und industrielle Zusammenarbeit

Der Outputmarkt entscheidet maßgeblich darüber, ob Textilrecycling wirtschaftlich tragfähig wird. Rezyklatfasern und **textile Sekundärrohstoffe** konkurrieren mit kostengünstigen Primärrohstoffen, etablierten Qualitätsstandards und bestehenden Lieferketten. Daher reicht es nicht aus, Recyclingoutput zu erzeugen – die aufbereiteten Fraktionen müssen gezielt auf die Anforderungen der jeweiligen **Abnehmerindustrien** abgestimmt werden. Ein Dämmstoffhersteller stellt beispielsweise andere Anforderungen an Materialeigenschaften als ein Automobilzulieferer, Möbelproduzent oder eine Spinnerei. Voraussetzung für die Erschließung entsprechender Absatzmärkte sind **reproduzierbare Spezifikationen**, definierte Materialeigenschaften sowie eine ausreichende Materialreinheit und die Einhaltung produktspezifischer Anforderungen.
Zentral ist dabei die enge Zusammenarbeit mit den Abnehmerindustrien. Recyclingunternehmen müssen gemeinsam mit potenziellen Kunden Qualitätsanforderungen definieren, Musterchargen testen, Normen prüfen und langfristige Abnahmevereinbarungen entwickeln. Gleichzeitig sind Industriepartner gefordert, Produkte und Beschaffungsprozesse auf den Einsatz von Sekundärrohstoffen auszurichten. Diese Zusammenarbeit ist ein wesentlicher Bestandteil der aktuellen Pionierphase, denn Märkte entstehen nicht allein durch verfügbare Mengen, sondern durch Vertrauen in Qualität, Lieferfähigkeit und technische Leistungsfähigkeit.
Der Aufbau stabiler Absatzmärkte für textile Sekundärrohstoffe wird damit zu einem entscheidenden Erfolgsfaktor für die Skalierung der textilen Kreislaufwirtschaft in Europa. (McKinsey &

Company, 2024; EURATEX, 2024; ReHubs Europe, 2024; European Technology Platform for the Future of Textiles and Clothing (Textile ETP), 2024)

3 CHANCEN, HERAUSFORDERUNGEN UND UMSETZUNGSLOGIK

Die größte **Herausforderung** des Textilrecyclings liegt im Zusammenspiel von Materialkomplexität, Marktmechanismen und Infrastruktur. Alttextilien bestehen zunehmend aus Mischfasern, Elastananteilen, Beschichtungen und weiteren Störstoffen, die eine hochwertige stoffliche Verwertung erschweren. Gleichzeitig konkurrieren Recyclingrohstoffe mit kostengünstigen Primärrohstoffen und etablierten Lieferketten. Rezyklate müssen dagegen zusätzliche Kosten für Sammlung, Sortierung, Qualitätsprüfung und Aufbereitung tragen. Ohne EPR-Systeme mit verpflichtenden Rezyklateinsatzquoten wird jedoch im Textilbereich keine Kreislaufwirtschaft entstehen und es liegt an den Gesetzgebern zu entscheiden ob reine Bürokratie oder eine wirklich nachhaltige Lösung geschaffen wird. (McKinsey & Company, 2024; EURATEX, 2024; Europäische Kommission, 2025)
Die **Chancen** liegen in einem neuen Rohstoff- und Infrastrukturmarkt. EPR-Systeme können Sammlung, Sortierung und Recycling finanzieren; verbesserte Materialkennzeichnungen und automatisierte Sortiertechnologien können die Qualität und Verfügbarkeit geeigneter Recyclingrohstoffe deutlich erhöhen; kommunale und gewerbliche Akteure können als Rohstoffbereitsteller auftreten; Sozialwirtschaft kann Reuse und Beschäftigung verbinden; industrielle Partner können Sekundärrohstoffe in Produkten verankern. Besonders wirkungsvoll sind regionale Pilotketten, in denen Sammlung, Sortierung, Recycling und Abnahme gemeinsam geplant werden. (Europäische Kommission, 2025; ReHubs Europe, 2024)
Entscheidend ist, bereits heute mit dem Aufbau von Sortier-, Vorbehandlungs- und Recyclinginfrastruktur zu beginnen. Know-how, Qualitätsstandards und Absatzmärkte entstehen nicht von selbst, sondern entwickeln sich durch praktische Anwendungen, Pilotprojekte und kontinuierliche Lernprozesse. Eine Verzögerung des **Infrastrukturaufbaus** würde nicht nur notwendige Investitionen in Recyclingtechnologien und Marktstrukturen bremsen, sondern auch die Entwicklung leistungsfähiger Absatzmärkte erschweren. Gleichzeitig würden wichtige wirtschaftliche Anreize und Finanzierungsgrundlagen für die weitere Technologieentwicklung fehlen, wodurch sich die Skalierung der textilen Kreislaufwirtschaft deutlich verzögern würde.
Genau hier entscheidet sich auch der Erfolg von **EPR**. Reuse bleibt die unverzichtbare erste Säule der Kreislaufwirtschaft. Ohne gleichzeitig Innovationen, Sortierung und Recycling zu fördern, besteht die Gefahr, dass lediglich ein bereits funktionierendes System subventioniert wird. Die eigentliche **Transformation** hin zu einer erweiterten Ressourcenschonung und stofflichen Kreislaufführung würde ausbleiben. Ziel muss daher sein, Reuse zu stärken und parallel die zweite Säule – das Textilrecycling – systematisch aufzubauen. (McKinsey & Company, 2024; European Technology Platform for the Future of Textiles and Clothing (Textile ETP), 2024; ReHubs Europe, 2024; Europäische Kommission, 2025)

Die **Umsetzung** sollte daher schrittweise erfolgen: Datentransparenz schaffen, Pilotfraktionen entwickeln, industrielle Partnerschaften aufbauen, Qualitätsstandards etablieren und Absatzmärkte entwickeln. Rezyklateinsatzquoten sollten durch Zertifizierungssysteme wie GRS (Global Recycled Standard) oder RCS (Recycled Claim Standard) und nachvollziehbare Chain-of-Custody-Systeme abgesichert werden, um Greenwashing und fehlerhafte Rezyklatangaben entlang globaler Lieferketten zu vermeiden. Die Umsetzung gelingt daher nur kohärent: Politik muss klare Rahmenbedingungen und Finanzierung schaffen, Märkte müssen Nachfrage und faire Kostenverteilung ermöglichen, und Technologien müssen aus Pilotketten in robuste industrielle Prozesse überführt werden. Textilrecycling ist damit tatsächlich ein Pionierfeld der Kreislaufwirtschaft: Es zeigt exemplarisch, dass Kreislauffähigkeit nicht am Ende der Kette entsteht, sondern durch abgestimmtes Design, Sammlung, Sortierung, Verwertung und Abnahme. (Textile Exchange, 2024; Europäische Kommission, 2025; McKinsey & Company, 2024; ReHubs Europe, 2024)

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Der Alttextilmarkt befindet sich im Übergang von einem spenden-, sortier- und exportgetriebenen Reuse-Markt zu einem regulierten Sekundärrohstoffmarkt. Reuse bleibt die ökologisch prioritäre und unverzichtbare erste Säule der Kreislaufwirtschaft, wird aber durch sinkende Qualitäten, steigende Mengen, Exportrestriktionen und geopolitische Volatilität begrenzt. Eine textile Kreislaufwirtschaft braucht daher zwei Säulen: hochwertige Wiederverwendung und ein parallel aufgebautes Textilrecycling für nicht tragfähige Textilien sowie für das End-of-Life nach Reuse.
Der zentrale Zukunftsmarkt liegt in Sortierung, Vorbereitung und stofflicher Verwertung. Nicht die Sammlung allein, sondern die Fähigkeit, heterogene Alttextilien in definierte, industriell nutzbare Rohstofffraktionen zu überführen, wird über die Marktchancen entscheiden.
Österreich kann dabei insbesondere als Qualitätsstandort für Sammlung, Sortierung, Vorbehandlung und die Entwicklung von Open-loop-Anwendungen sowie als Zulieferer europäischer und internationaler Closed-loop-Ketten eine aktive Rolle einnehmen. Entscheidend ist, Ressourcenverbrennung nicht als Standardpfad zu akzeptieren, sondern Textilien möglichst lange und möglichst hochwertig im Kreislauf zu halten.
Textilrecycling ist damit nicht nur ein neuer Verwertungsweg, sondern ein Pionierfeld der Kreislaufwirtschaft, das exemplarisch zeigt, dass Kreislauffähigkeit nicht am Ende der Wertschöpfungskette entsteht, sondern das koordinierte Zusammenspiel von Design, Sammlung, Sortierung, Verwertung und Nachfrage ist.

LITERATURVERZEICHNIS

Boston Consulting Group (BCG) & ReHubs (2026). Advancing Textile Circularity – Europe's Textile Waste Challenge.

Ellen MacArthur Foundation (2017). A New Textiles Economy – Redesigning Fashion's Future.

EURATEX (2024) Textile Recycling Technologies and Industrial Readiness in Europe.

EuRIC – European Recycling Industries Confederation (2024). The Textile Crisis in Europe.

Europäische Kommission (2025). Directive amending the Waste Framework Directive – Extended Producer Responsibility for Textiles.

Europäische Kommission (2025). Revised Waste Framework Directive – Textile EPR and Circular Economy Requirements.

European Environment Agency (EEA) (2024). Management of Used and Waste Textiles in Europe's Circular Economy.

European Technology Platform for the Future of Textiles and Clothing (Textile ETP) (2024). Industrial Infrastructure Requirements for Textile Circularity.

McKinsey & Company (2024). Scaling Textile Recycling in Europe – Turning Waste into Value.

OR Foundation (2024). Kantamanto Market and the Global Second-Hand Clothing Trade.

ReHubs Europe (2024). Roadmap towards a European Textile Recycling Ecosystem.

RREUSE (2024). The Role of Social Enterprises in Textile Reuse and Recycling Systems.

Textile Exchange (2024) Global Recycled Standard (GRS) – Implementation Manual.

Umweltbundesamt Österreich (2022). Textilabfälle in Österreich. Analyse zu Aufkommen und Behandlung von Textilabfällen.

United Nations Environment Programme (UNEP) (2024). Global Challenges of Used Textile Exports and Waste Leakage.

Strukturen und Strategien zur Einrichtung eines nachhaltigen EPR-Systems für Textilien in Österreich

Peter Beigl[1], Astrid Allesch[1], Elisabeth Schmied[1], Andreas Bartl[2], Sebastian Rosenbusch[2] & Marion Huber-Humer[1]

[1)] Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, BOKU University – Universität für Bodenkultur Wien, Wien, Österreich

[2)] Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften, TU Wien, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Im Rahmen nationaler Maßnahmen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft kommt der Einführung eines Systems der Erweiterten Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility, EPR) für Textilien in Österreich eine zentrale Bedeutung zu. Das vorliegende Projekt der BOKU University und TU Wien im Auftrag des BMLUK erarbeitet eine mögliche Struktur und Strategien zur praktischen Ausgestaltung eines österreichischen Textilien-EPR-Systems gemäß den Vorgaben der Abfallrahmenrichtlinie (EU) 2025/1892 (ARRL). Auf Basis einer umfassenden Analyse des nationalen Status quo, eines internationalen Reviews und eines strukturierten Stakeholderdialogs (35 Interviews, Workshop mit über 80 Teilnehmerinnen und Teilnehmern) werden verschiedene EPR-Modellvarianten verglichen und Gestaltungsoptionen für die nationale Umsetzung bewertet. Die Zwischenergebnisse zeigen, dass nicht nur die Marktstruktur, sondern die konkrete Systemgestaltung und die Rahmenbedingungen maßgeblich über den Erfolg eines EPR-Systems entscheiden. Der Abschlussbericht ist für Herbst 2026 geplant.

1 EINLEITUNG

Mit der verbindlichen getrennten Sammlung von Textilien in der Europäischen Union ab 2025 hat die Frage nach geeigneten Systemen zur Sammlung, Sortierung und Verwertung von Alttextilien erheblich an Bedeutung gewonnen. Die Abfallrahmenrichtlinie (EU) 2025/1892 (ARRL) schreibt die Einführung von EPR-Systemen für Textilien in allen Mitgliedstaaten vor und legt dabei verbindliche Mindestanforderungen für Produzentenverantwortung, Systemstruktur und Ökomodulation fest. In Österreich fallen Textilien als Siedlungsabfall aktuell in die Regelungskompetenz der Länder, weshalb die bestehenden Sammlungsstrukturen bundeslandspezifisch ausgestaltet sind. Gleichzeitig besteht ein breites Spektrum an Akteur*innen – von kommunalen und karitativen Sammlern bis hin zu gewerblichen Systemteilnehmer*innen –, deren Interessen und Rollen in einem zukünftigen EPR-System zu berücksichtigen sind. Ziel des Projekts ist es daher, eine belastbare Entscheidungsgrundlage für die Ausgestaltung eines rechtlich konsistenten, organisatorisch tragfähigen und ökologisch wirksamen EPR-Systems für Textilien in Österreich zu schaffen.

Das Projekt wird im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BMLUK) von einem Konsortium aus BOKU University (Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft) und TU Wien (Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften) durchgeführt. Der vorliegende Beitrag stellt Zwischenergebnisse dar, die im Rahmen der DepoTech 2026 zur Diskussion gestellt werden.

2 METHODIK

Die Methodik des Projekts basiert auf einem mehrstufigen, systematischen Vorgehen, welches die Ermittlung des Status Quos, ein internationales Review, den Variantenvergleich und die Einbindung der Stakeholder miteinander verknüpft. Die Studie gliedert sich in sechs Arbeitspakete, von denen bei Einreichung dieses Beitrags fünf weitgehend abgeschlossen sind.

2.1 Status quo in Österreich und internationales Review

In einem ersten Schritt wurde der Ist-Zustand der Sammlung und Verwertung von Alttextilien und Schuhen in Österreich erhoben. Parallel dazu erfolgte ein systematisches Review internationaler Sammel- und Verwertungssysteme (u. a. Niederlande, Frankreich), um Erfolgsfaktoren und übertragbare Gestaltungselemente zu identifizieren. Ergänzend wurde eine Umfeldanalyse durchgeführt, die exogene Rahmenbedingungen wie Marktentwicklungen, Technologietrends und rechtliche Vorgaben auf EU-Ebene analysiert.

2.2 Modellvergleich und Stakeholderdialog

Auf Basis der erhobenen Grundlagen wurden vier EPR-Modellvarianten analysiert, und zwar (A) herstellergetragenes Modell mit einer zentralen Non-Profit-Organisation (PRO-Monopol), (B) wettbewerbsorientiertes Modell mit mehreren zugelassenen Systembetreibern (PROs im Wettbewerb), (C) Fondsmodell und (D) Vertragsmodell. Nur die Modelle A und B wurden für einen weiteren vertiefenden Vergleich ausgewählt, da die ARRL mindestens eine PRO vorschreibt und die Modelle C und D auch aufgrund ihres Verwaltungsaufwands und ihrer begrenzten Kosteneffizienz ausgeschlossen wurden.

Der Stakeholderdialog umfasste 35 Einzel- und Gruppeninterviews mit Vertreterinnen und Vertretern von 60 nationalen und internationalen Organisationen aus den Bereichen Textilindustrie und -handel, Miettextilien, karitativen Organisationen, kommunalen Einrichtungen, NGOs sowie Behörden. Ergänzend fand am 1. Juni 2026 ein Workshop mit über 80 Teilnehmerinnen und Teilnehmern statt, in dem die bisherigen Ergebnisse des Projektes vorgestellt und Gestaltungsoptionen interaktiv diskutiert wurden.

2.3 Bewertung von Gestaltungsoptionen

Die Gestaltungsoptionen wurden sowohl im Lichte der ARRL als auch des österreichischen Abfallwirtschaftsrechts bewertet. Die Bewertung unterscheidet zwischen Optionen, die unabhängig vom gewählten EPR-Modell umsetzbar sind (z.B. Festlegung der Zielfraktion, Öffentlichkeitsarbeit), und solchen, die modellabhängig sind (z.B. Vergabe, Eigentum Sammelware).

3 ERGEBNISSE

3.1 Status quo und Mengengerüst

Das Gesamtaufkommen an Alttextilien und Schuhen gemäß Anhang IVc der ARRL betrug in Österreich im Jahr 2024 rund 179.000 Tonnen. Davon wurden lediglich 26,5 % getrennt gesammelt, während 73,5 % über gemischte Abfallströme erfasst wurden. Dies verdeutlicht das erhebliche Potenzial, das durch die verpflichtende getrennte Sammlung mobilisiert werden kann.

Die EU ist bei Bekleidung und konfektionierten Textilien stark importabhängig; gleichzeitig bestehen europäische Produktionskapazitäten in höherwertigen Segmenten und bei technischen Textilien. Die heutige europäische Textilsortierung ist überwiegend Re-Use-orientiert und basiert primär auf manueller Sortierung. Automatisierte, materialbasierte Sortiersysteme gelten als zentrale Zukunftstechnologie für textile Recyclingprozesse, können die manuelle Re-Use-Sortierung derzeit jedoch nicht ersetzen.

3.2 Umfeldanalyse

Die Umfeldanalyse zeigt, dass das wahrscheinlichste Szenario für ein österreichisches Textilien-EPR-System durch folgende Rahmenbedingungen gekennzeichnet ist:

- Re-Use-orientierte Alttextilsammlung mit Zuzahlungen des EPR-Systems
- Open-Loop-Recycling nahe der Kostendeckungsgrenze, ohne nennenswerte Markterlöse
- Ökologische Differenzierungskriterien gemäß Art. 8a (4) (b) ARRL
- Verschärfte Rahmenbedingungen für Online-Handel (EU-Zollreform, Digital product pass)

Dieses Szenario erfordert (v.a. in den ersten Jahren) eine EPR-Systemfinanzierung, die nicht auf Markterlöse angewiesen ist. Die Systemgestaltung muss daher von Anfang an auf Kostendeckung ohne Nettovermarktungserlöse ausgerichtet sein. Kontinuierliches Monitoring sowie die technologische Weiterentwicklung in Richtung Closed-Loop-Recycling sind dabei essenziell.

3.3 Vergleich der EPR-Modellvarianten

Der Vergleich der beiden analysierten Modellvarianten (A: PRO-Monopol; B: PROs im Wettbewerb) auf Basis von adelphi (2025), Colelli et al. (2022) und Favot et al. (2022) ergibt ein konsistentes Muster: Zentralisierte Systeme (Modell A) zeigen Vorteile hinsichtlich Finanzierungssicherheit, Standardisierung, Transparenz, sozialer Inklusion, während wettbewerbsorientierte Systeme (Modell B) bei Kosteneffizienz, Marktdruck und Innovationspotenzial überlegen sind. Tab. 1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Unterschiede.

Tab. 1: Vergleich der EPR-Modellvarianten A und B (Auswahl zentraler Kriterien)

Kriterium	**Modell A:** PRO-Monopol	**Modell B:** PROs im Wettbewerb
Finanzierungssicherheit	Hoch (einheitliche Beiträge)	Mittel (Konkurrenz um Beiträge)
Kosteneffizienz	Mittel	Hoch (Wettbewerbsdruck)
Transparenz / Kontrolle	Hoch	Mittlerer Aufwand
Soziale Inklusion (Sozialwirtschaft)	Gut integrierbar	Erfordert spezifische Regulierung
Innovationspotenzial	Gering	Hoch

Als übergreifendes Ergebnis lässt sich ableiten, dass nicht nur die Marktstruktur (Monopol oder Wettbewerb), sondern die konkrete Systemgestaltung und die Qualität der regulatorischen Rahmenbedingungen über den Erfolg eines EPR-Systems entscheiden. Dies deckt sich mit Befunden aus internationalen Vergleichssystemen (z.B. Frankreich: Modell A; Niederlande: Modell B).

3.4 Gestaltungsoptionen

Für die Ausgestaltung eines österreichischen EPR-Systems wurden zahlreiche Gestaltungsoptionen identifiziert und analysiert, darunter:

- Inverkehrsetzung: Festsetzung der Lizenzgebühren anhand ökologischer Differenzierungskriterien gemäß Art. 8a (4) (b) ARRL, Registrierung und Monitoring der Inverkehrsetzer, …
- Operative Sammlung: Definition der Zielfraktionen, Anforderungen an die Sammelnetzdichte, Planungshoheit und Beauftragung, …
- Finanzierung der Sammlung: Abgeltungsmodelle für Behälterinfrastruktur, Datenerfassung, Abgeltung gemischt erfasster Textilien, …
- Sozialwirtschaft: Sicherung des Teilnahmerechts, Mindestmengenzuteilung, Monitoring und Kostenabgeltung, …
- Sortierung und Verwertung: Sortieranforderungen, Kostenabgeltung, F&E-Förderung für innovative Recyclingverfahren, …

Die Bewertung der Gestaltungsoptionen erfolgt entlang der europarechtlichen Perspektive (ARRL) als auch entlang des österreichischen Abfallwirtschaftsrechts (Abfallwirtschaftsgesetz, 2002), um nationale Verankerung und Umsetzbarkeit sicherzustellen.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die Zwischenergebnisse zeigen, dass die Einführung eines EPR-Systems für Textilien in Österreich eine komplexe Abwägung rechtlicher, organisatorischer, wirtschaftlicher und sozialer Aspekte erfordert. Weder das monopolistische PRO-Modell noch das Wettbewerbsmodell ist per se überlegen – ausschlaggebend ist die Systemgestaltung. Folgende Schlussfolgerungen lassen sich aus den bisherigen Projektarbeiten ableiten: Erstens muss das System von Beginn an ohne Nettovermarktungserlöse finanzierbar sein. Zweitens sind die bestehenden kommunalen und karitativen Strukturen aktiv in das EPR-System einzubinden, da sie einen wesentlichen Beitrag zur Sammelleistung und zur sozialen Dimension leisten. Drittens besteht im Bereich der Sortier- und Verwertungstechnologien erheblicher Entwicklungsbedarf, den das EPR-System durch gezielte F&E-Förderung unterstützen sollte. Der Abschlussbericht mit detaillierten Handlungsempfehlungen für die nationale Umsetzung ist für Herbst 2026 in Abstimmung mit dem BMLUK geplant. Die endgültigen Ergebnisse werden im Rahmen des Vortrags bei der DepoTech 2026 präsentiert.

LITERATURVERZEICHNIS

adelphi. (2025). Erweiterter Vergleich von EPR-Systemen im Textilbereich – Internationale Erfahrungen und Gestaltungsoptionen. Berlin: adelphi research.

Abfallwirtschaftsgesetz (2002). Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 - AWG 2002), Wien.

Colelli, F. P., Moretti, L. & Tavoni, M. (2022). Effectiveness of extended producer responsibility schemes for electronics and batteries. Resources, Conservation and Recycling, 185, 106477.

Europäisches Parlament und Rat der EU. (2025). Richtlinie (EU) 2025/1892 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle (Abfallrahmenrichtlinie, ARRL). Amtsblatt der Europäischen Union.

Favot, M., Grassetti, L. & Massarutto, A. (2022). EPR systems and competition: Evidence from European packaging waste management. Ecological Economics, 200, 107541.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Mag. Peter Beigl
peter.beigl@boku.ac.at
+43 1 47654 81314
Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, BOKU University
https://boku.ac.at/lawi/abfk

Ressourceneffizienz – Ein Ansatz zu deren Bemessung

Stefan Gäth
Justus-Liebig-Universität Gießen, Professur für Abfall und Ressourcenmanagement, Gießen, Deutschland

Am Beispiel der verschiedenen, historisch gewachsenen Beleuchtungen zur “Weihenacht“ – Kerzen, Glühbirnen, LEDs - wird ein Ansatz zur Bemessung der Ressourceneffizienz vorgestellt, der gleichsam auch als Instrument in der Abfallwirtschaft Verwendung finden kann.

Die Verantwortung für einen nachhaltigen Umgang mit unserer Umwelt ist eines der zentralen Ziele von Unternehmen und wird bei der Neu- und Weiterentwicklung unserer Produkte immer wieder kritisch auf den Prüfstand gestellt.
Selbstverständlich setzen die Anforderungen an die Präzision und den Einsatzzweck unserer Produkte hin und wieder Grenzen in unserem nachhaltigen Handeln, dennoch sind wir bestrebt, uns und unsere Produkte stetig im Sinne der Nachhaltigkeit zu verbessern.

Unterstützt werden wir dabei durch verschiedene unabhängige wissenschaftliche Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen.

Zur Bewertung der Nachhaltigkeit unserer Produkte betrachten wir deren Ressourceneffizienz. Sie stellt für ein Produkt in einem transparenten Bewertungsprozess den Nutzen eines Produktes den dafür notwendigen Einsatz an Ressourcen in Form von Rohstoffen und/oder Energie gegenüber. Das folgende Beispiel veranschaulicht den Bewertungsprozess.

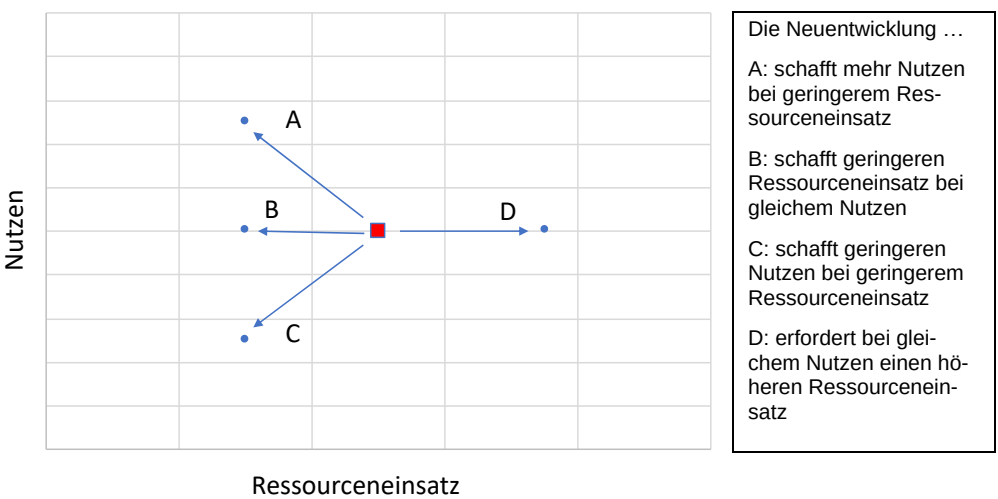


Abb. 1: Schema zur Klassifizierung der Ressourceneffizienz

Bei einem bestehenden Produkt (roter Punkt) soll es zu einer Weiter- bzw. Neuentwicklung und anschließender Markteinführung kommen.

Im Fall A ist die Ressourceneffizienz am höchsten, da zum einen der Ressourceneinsatz gesenkt wird, zum anderen der Nutzen vermehrt wurde. Die Abnahme des Ressourceneinsatzes kann dabei durch vielfältige Maßnahmen erfolgen, wie zum Beispiel die Nutzung von weniger Primärrohstoffen und/oder den Einsatz von Recyclingmaterialien.
Die Steigerung des Nutzens kann durch eine höhere Praktikabilität unter Wahrung der Sicherheit sowie zum Beispiel durch die Förderung des Recyclings nach Ablauf der Nutzungsphase geschaffen werden.

Im Fall B wird der Ressourceneinsatz zwar gleichermaßen gesenkt, allerdings bleibt der Nutzen auf gleichem Niveau, was bedeutet, dass die Ressourceneffizienz insgesamt im Vergleich zum Fall A nur nachrangig gesenkt wurde.

Der Fall C erreicht zwar eine Senkung des Ressourcenverbrauchs allerdings zu Lasten der Nutzenvielfalt, was die Ressourceneffizienz im Vergleich zum Ausgangsprodukt mindert.

Der letzte Fall D symbolisiert unter den 4 Beispielen das schlechteste Szenario, in dem bei gleichem Nutzen der Ressourcenverbrauch deutlich zunimmt.

Die Bewertung der Ressourceneffizienz erfolgt Produkt spezifisch bzw. jeweils für eine Produktkategorie (z.B. Weihnachtsbaumbeleuchtung), da der Anwendungszweck den Hauptnutzen definiert. Unter dem Begriff Nutzen werden verschiedene Anforderungen beispielhaft an die Weihnachtsbaumbeleuchtung betrachtet und gemäß eines Punktesystems bewertet (15 für „ausgezeichnet“ bis 0 für „ungenügend“):

- Praktikabilität und Energieverbrauch
- Lichtfarbe und Treibhausgasemissionen
- Beständigkeit und Recyclingfähigkeit
- ...

Vor dem Hintergrund, dass die Weihnachtszeit in wenigen Tagen „vor der Türe steht“, wird der Fokus in diesem Beitrag auf die Weihnachtsbaumkerzenbeleuchtung gelegt. Drei Formen kommen dabei in Betracht, die in den Familien/Haushalten je nach Geschmack zum Einsatz kommen:

- Wachskerzen
- Glühlampenkerzen
- LED-Kerzen.

Traditionelle Wachskerzen werden aus Parafin/Wachs hergestellt und haben den Vorteil, dass sie auch ohne Energieverbrauch in Form von Strom „brennen“, aber für die Herstellung einen „hohen“ CO_2-Fußabdruck haben.
Für den Nutzer sind Wachskerzen traditionell und romantisch!

Die folgenden Daten sind im Rahmen einer Recherche im Internet und verfügbaren Datenbanken, wie PROBAS und GEMIS, erhoben worden. Die CO_2-Emissionen sind sehr gut als vergleichender Indikator geeignet, da damit der Energieverbrauch impliziert ist.

Die CO_2-Emissionen während der Produktion und der Nutzung von Wachskerzen betragen ca. 3,0 bis 3,4 kg CO_2 pro Monat und Kerze. Dabei wird als funktionelle Einheit ein Monat – die Weihnachtszeit ist ungefähr ein Monat - und eine Kerze mit 25 g berücksichtigt.

Nach den Wachskerzen wurden Lichterketten mit Glühkerzen entwickelt und eingesetzt. Der Glühfaden ist in erster Linie der Materialintensive Bestandteil.

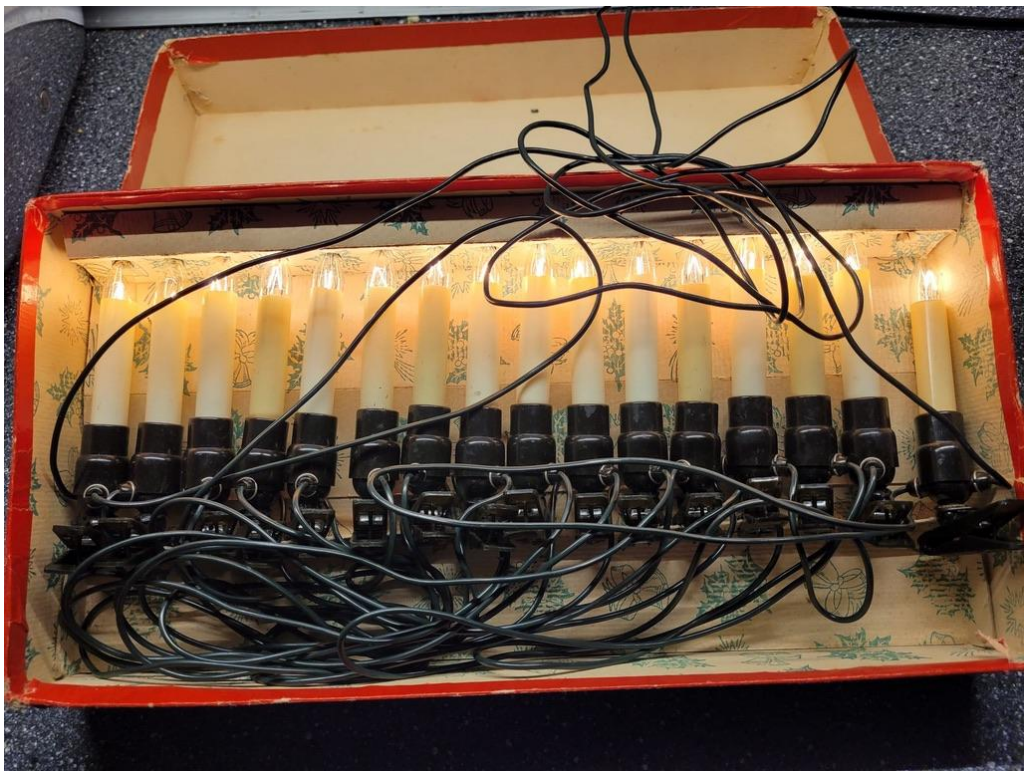


Abb. 2: Glühkerzen in Form einer Lichterkette

Die CO_2-Emission pro Monat Nutzungsdauer und Glühbirne beträgt 0,1 bis 0,15 kg CO_2 pro Monat und Glühbirne. Die Glühbirnen werden einzeln oder als Lichterketten mit 10-20 Glühkerzen angewendet. Im Vergleich zu den Wachskerzen haben 20-30 Glühkerzen die gleichen CO_2-Emissionen wie eine Wachskerze.



Abb. 3: Weihnachtsbaum mit LEDs

Der letzte Entwicklungsschritt sind für die Weihnachtsbeleuchtung LED-Lampen und -Ketten. In diesem Fall betragen die CO_2-Emissionen 0,02 bis 0,03 kg pro Monat und LED.

Im Vergleich zu den Wachskerzen sind 120-130 LEDs pro Wachskerze einzusetzen, um die gleiche CO_2-Emission zu erreichen.

Zwischen Glühkerzen und LEDs liegt der Multiplikator bei 5.

In der Regel werden bei „normalen“ Weihnachtsbäumen 10-20 Wachskerzen genutzt, was bedeutet, dass Lichterketten mit 1.200 bis 2.600 LEDs zum Einsatz kommen dürfen. – Mit Sicherheit ist diese Anzahl zu hoch, so dass eine Zunahme der Ressourceneffizienz mit den Entwicklungsschritten gegeben ist.

Methodenkonzept zur Durchführung gebündelter Abfallanalysen zur Überprüfung der Diskrepanzen zwischen in Verkehr gebrachten Stoffstrommengen und davon ordnungsgemäß zurückgeführten Abfallmengen

Bertram Zwisele[1] & Leonie Theresia Wachtler[1]
[1)] ARGUS Statistik und Informationssysteme in Umwelt und Gesundheit GmbH, Berlin, Deutschland

KURZFASSUNG: Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines Methodenkonzepts für regelmäßige, gebündelte Abfallanalysen zur Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung gemischter Siedlungsabfälle. Damit sollen die von der Europäischen Kommission geforderten Daten zu Kunststoffverpackungen, Verpackungen, Lebensmittelabfällen, Alttextilien und Altbatterien sowie weitere vom Umweltbundesamt benannte Stoffströme (Elektro- und Elektronikaltgeräte, Bioabfälle im Restmüll und gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle) in verschiedenen Entsorgungspfaden ermittelt werden.
Zur Schließung bestehender Datenlücken werden insbesondere nicht-bestimmungsgemäße Entsorgungspfade untersucht und Fehlwürfe quantifiziert. Das Methodenkonzept definiert hierfür relevante Entsorgungspfade, standardisierte Untersuchungsmethoden und technische Anleitungen. Bestehende Abfallanalysen werden soweit möglich integriert und mit neuen Untersuchungen harmonisiert. Ein einheitlicher Stoffgruppenkatalog ermöglicht die vergleichbare Auswertung aller Stoffströme und den Abgleich mit den in Verkehr gebrachten Mengen. Das Methodenkonzept bildet damit die Grundlage für künftige Basis- und Folgeuntersuchungen.

1 EINLEITUNG

Die ARGUS GmbH hat im Auftrag des Umweltbundesamtes federführend zusammen mit vier weiteren Ingenieurbüros (1) ein Methodenkonzept zur effizienten Durchführung regelmäßiger und gebündelter Abfallanalysen (2) entwickelt.
Hintergrund der Entwicklung des Methodenkonzeptes und der darauf aufbauenden Abfallanalysen gemischt anfallender Siedlungsabfälle ist die Entscheidung der EU-Kommission 2005/270/Europäische Gemeinschaft (EG) der EU-KOM, zuletzt geändert am 26.04.2019, den Ansatz des Inverkehrbringens relevanter Stoffströme, wie z. B Kunststoffverpackungen zu überprüfen und durch die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung gemischt anfallender Abfälle zu ergänzen und ggf. auszugleichen.
Mit dem Ansatz sogenannter Cross-Checks soll eine Erklärung der Diskrepanzen, zwischen der in Verkehr gebrachten und der ordnungsgemäß zurückgeführten und damit verwerteten bzw. recycelbaren Menge, festgestellt werden. Die Cross Checks sind ab dem Jahr 2023 vorzunehmen, die dafür benötigten Daten dürfen maximal vier Jahre alt sein. In Anbetracht der letzten Datengrundlage vom Jahr 2020 werden spätestens ab dem Berichtsjahr 2025 neue Primärdaten in einem Abstand von vier Jahren benötigt.
Für vier Stoffströme (Kunststoffverpackungsabfälle (3), Verpackungsabfälle (4), Lebensmittelabfälle (5), Altbatterien (6)) bestanden zu Beginn des Vorhabens zur Methodenentwicklung im März 2024 bereits konkrete europäische Berichtspflichten, während für die anderen Stoffströme (Alttextilien, Elektro(nik)altgeräte (EAG), Bioabfälle im Restmüll und gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle) ein erhöhter nationaler Monitoringbedarf identifiziert wurde. Insgesamt waren daher für acht Stoffströme die Voraussetzungen für Cross Checks durch Abfallanalysen gemischt anfallender Siedlungsabfälle (im weiteren auch Entsorgungspfade) zu ermitteln. Die Hauptaufgabe bestand darin, für die Stoffströme die erforderlichen Entsorgungspfade zu ermitteln und die darin enthaltenen Fehlwürfe durch qualifizierte bundesweite Abfallanalysen zu bestimmen.

Da Abfallanalysen sehr kosten- und zeitaufwändig sind, ist eine effiziente Abwicklung geboten. Durch die Bündelung von insgesamt 12 Abfallarten (Entsorgungspfade) für insgesamt acht Stoffströme, unter Berücksichtigung einer möglichen Erweiterung, galt es die verschiedenen Anforderungen (z. B. Stoffgruppen, Stichprobenplanung, Sortierung und Auswertung) zu bündeln und damit Synergien zu nutzen.

2 ENTWICKLUNG DES METHODENKONZEPTES

Die Entwicklung des Methodenkonzeptes orientierte sich an den Datenanforderungen, die sich aus den bestehenden Berichts- und Untersuchungspflichten der betrachteten Stoffströme ergeben. Des Weiteren werden je Stoffstrom die relevanten Entsorgungspfade, sowie Messpunkte und Zugriffsebenen, analysiert. Besonderheiten des Stoffstroms werden durch Anforderungen und Diskrepanzen in der Abfallanalytik beschrieben.
Die Beschreibung der unterschiedlichen Stoffströme in Kombination mit der erforderlichen Datenanforderung für die Berichts- bzw. Untersuchungspflicht (in Kapitel 2 des Methodenkonzeptes) führt zu der Identifikation der relevanten Entsorgungspfade. Tab. 1 zeigt, wie die betrachteten Abfallströme in den Entsorgungspfaden bestimmungsgemäß und nicht-bestimmungsgemäß anfallen können, sowie die Möglichkeit, dass mehrere Stoffströme innerhalb eines Entsorgungspfades analysiert werden können.

Tab. 1: Entsorgungspfade für Stoffströme mit Berichts- bzw. Untersuchungspflicht oder gesteigertem Monitoringbedarf

Entsorgungspfade **Stoffströme (Berichts-Untersuchungspflicht, Monitoring)**	**01 Hausmüll**	**02 Sperrmüll**	**03 LVP**	**04 Bioabfall[2]**	**05 Alttextilien**	**06 Littering**	**07 Abfälle von überörtlichen Straßen**	**08 Papierkörbe**	**09 Gemischte Bau- und Abbruchabfälle**	**10 Gemischte gewerbliche**	**11 Altmetalle[3]**	**12 EAG[3]**
01 Kunststoffverpackungsabfälle	X			(X)		X	(X)	X	X	X		
02 Verpackungsabfälle	X			(X)		X	(X)	X	X	X	(X)	
03 LMA			(X)			X				X		
04 Altbatterien[1]	X		(X)			(X)	(X)	(X)		X		X
05 Bioabfälle	X					X		(X)		X		
06 Alttextilien	X					X			(X)	X		
07 EAG	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	
08 Gewerbliche Siedlungsabfälle[4]												

[1] Die Untersuchungspflicht bezieht sich auf Geräte- und LV-Altbatterien. Der Entsorgungspfad „EAG“ kann Altbatterien bestimmungsgemäß und nicht-bestimmungsgemäß enthalten.
[2] Der Entsorgungspfad Bioabfall wird aufgrund von Synergien im Rahmen der Bündelung der Abfalluntersuchungen differenziert auf die nach Berichtspflicht geforderten Sortierstoffgruppen für Kunststoffverpackungsabfälle analysiert.
[3] Kein Teilbericht mit Methodenbeschreibung
[4] Kann in dieser Systematik nicht dargestellt werden
Grau: bestimmungsgemäße Entsorgungspfade
X: nicht-bestimmungsgemäße Entsorgungspfade
(X): nicht bestimmungsgemäße Entsorgungspfade, deren Untersuchungsrelevanz vor der Durchführung von Analysen zu prüfen ist

3 KERNELEMENTE DER BÜNDELUNG

Bei der Entwicklung des Methodenkonzeptes wurde der Ansatz verfolgt, bestehende, geeignete Analysen (sog. Sekundäruntersuchungen) soweit als möglich einzubinden, um die Anzahl der Primäranalysen, die im Rahmen des Vorhabens durchzuführen sind – und damit die Kosten - zu minimieren. Beide Analysetypen können in Standard- bzw. Sonderuntersuchungen eingeteilt werden, Standarduntersuchungen entsprechen den bereits existierenden Vorgaben für Abfallanalysen. Sonderuntersuchungen werden integriert, wenn z. B. eine weitergehende Differenzierung der Stoffgruppen innerhalb eines Entsorgungspfad erforderlich ist. Ein zentrales Element des entwickelten Konzepts ist der Stoffgruppenkatalog, welcher je Entsorgungspfad entwickelt wurde und durch entsprechende Filterung für alle Abfallanalysen anzuwenden ist. Durch die Verwendung eines zentralen Stoffgruppenkatalogs können Ergebnisse aus unterschiedlichen Analysen ohne einen zusätzlichen Harmonisierungsschritt zusammengeführt werden. Der Stoffgruppenkatalog beinhaltet Standardstoffgruppen, diese können je Entsorgungspfad variieren, und Stoffgruppen für Sonderuntersuchungen. Der Stoffgruppenkatalog stellt ein Schlüsselelement zwischen homogenen Stoffströmen und heterogenen Abfallströmen dar und fungiert somit als wesentliches Verbindungselement zwischen Rohstoffen und Abfällen.

4 METHODISCHE UMSETZUNG IN DEN ENTSORGUNGSPFADEN

Für die Sortieranalysen in den bestimmungsgemäßen und nicht-bestimmungsgemäßen Entsorgungspfaden (Tab. 1) wurde jeweils ein praktischer Leitfaden (in separaten Teilberichten) veröffentlicht. Bei der Entwicklung dieser Anleitungen wurde ein harmonisierter Ansatz verfolgt, um Synergieeffekte zwischen den unterschiedlichen Entsorgungspfaden zu nutzen und eine einheitliche Anwendung der Untersuchungsmethoden zu gewährleisten.
Im Teilbericht „Methodische Grundlagen der Stichprobenplanung und Hochrechnung“ werden die statistischen Grundprinzipien für die Planung, Durchführung und Auswertung repräsentativer Abfallanalysen beschrieben. Die dort dargestellten Verfahren dienen als Grundlage für die Entwicklung der entsorgungspfadspezifischen Untersuchungsmethoden und Hochrechnungsverfahren.
Alle Teilberichte gliedern sich in einen regionalen (örE Ebene) sowie einen nationalen (Bundesebene) Untersuchungsteil. Für beide Ebenen werden die erforderlichen Rahmendaten für die Untersuchungsplanung definiert. Diese umfassen allgemeine Rahmendaten, beispielsweise Jahreszeitliche Einflüsse und Einwohnerstrukturdaten, sowie untersuchungsspezifische Parameter, beispielsweise die Schichtung (Siedlungsstrukturen), die Anzahl der Untersuchungskampagnen und die erforderlichen Stichprobenumfänge.
Darauf aufbauend werden die Durchführung der Abfallanalysen, die Probenahme, die Vorgaben zur Siebung und Sortierung sowie die Anwendung des Stoffgruppenkatalogs beschrieben. Für die Auswertung und Hochrechnung wurden Verfahren entwickelt, die auf Grundlage der erhobenen Daten in Kombination mit den allgemeinen Rahmendaten eine mehrstufige, geschichtete Hochrechnung der Ergebnisse ermöglichen.

5 FAZIT

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein Methodenkonzept für die praktische Anwendung von Abfallanalysen unterschiedlicher Entsorgungspfade entwickelt. Die Untersuchungsanforderungen und die daraus abgeleiteten Arbeitsschritte wurden analysiert und so weit als möglich gebündelt. Dadurch konnten Untersuchungsaufwände reduziert, bestehende Datenquellen eingebunden, ein einheitlicher Stoffgruppenkatalog erstellt und Synergien optimal genutzt werden. Die Bündelung der Abfallanalysen vermeidet Mehrfachuntersuchungen für verschiedene Stoffströme und damit erhebliche Einsparungen der Kosten. Durch die standardisierte Struktur der Untersuchungsmethoden und die Berücksichtigung sowohl regionaler als auch nationaler Auswertungsebenen schafft das Konzept die Grundlage für eine langfristige vergleichbare Datenerhebung.
Insgesamt stellt das entwickelte Methodenkonzept einen praxisnahen Ansatz zur Unterstützung nationaler und europäischer Berichtspflichten dar und ermöglicht eine effiziente Bereitstellung aktueller Daten für Monitoring, Planung und Bewertung der Kreislaufwirtschaft.

LITERATURVERZEICHNIS

(1) Witzenhausen-Institut; INTECUS GmbH; Cyclo GmbH, u.e.c. GmbH
(2) Umweltbundesamt (Hrsg.) (2026): Konzeptentwicklung für regelmäßige, gebündelte Abfalluntersuchungen zum Monitoring ausgewählter Abfallströme: Abschlussbericht. https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/2026-04/57_2026_TEXTE.pdf (abgerufen am 02.07.2026).
(3) Kunststoffverpackungsabfälle gemäß Art. 2 Abs. 15 und Art. 3 Abs. 2 bis 4 der neuen Durchführungsverordnung (EU) 2023/595
(4) Verpackungsabfälle aller Materialien gemäß dem Guidance-Dokument zur Entscheidung 2005/270/EG der EU-KOM
(5) LMA gemäß Anhang III des Delegierten Beschlusses (EU) 2019/1597
(6) Altbatterien gemäß Art. 69 Abs. 5 der Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG (2020/0353 (COD))

KONTAKT

Dr.-Ing. Bertram Zwisele
zwisele@argus-statistik.de
+49 30 398060-0
ARGUS Statistik und Informationssysteme in Umwelt und Gesundheit GmbH
www.argus-statistik.de

Systematische Auswahl sozialer Aspekte zur Nachhaltigkeitsbewertung technischer Prozesse mittels social Life Cycle Assessment

Theresa Angerler[1], Klaus Doschek-Held[1] & Julia Graf[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Die Berücksichtigung sozialer Nachhaltigkeitsaspekte gewinnt bei der Bewertung technischer Prozesse zunehmend an Bedeutung, da sie wesentlich zur gesellschaftlichen Akzeptanz und erfolgreichen Umsetzung Innovationen beiträgt. Im Gegensatz zu ökologischen und ökonomischen Bewertungsdimensionen sind soziale Aspekte in der Technikfolgenabschätzung bislang nur begrenzt methodisch verankert. Diese Arbeit entwickelt daher einen systematischen Ansatz zur Auswahl und Priorisierung sozialer Indikatoren auf Basis des Social Life Cycle Assessment (sLCA). Hierfür werden bestehende sLCA-Rahmenwerke, internationale Leitlinien sowie aktuelle wissenschaftliche Ansätze analysiert und miteinander verglichen. Aufbauend auf den sechs Stakeholder-Kategorien des sLCA wird ein anwendungsorientierter Indikatorenkatalog entwickelt, der Prozessspezifikationen, Datenverfügbarkeit und Relevanz entlang der Wertschöpfungskette berücksichtigt. Ziel ist die Entwicklung eines übertragbaren Entscheidungs- und Bewertungsansatzes, der sich flexibel auf unterschiedliche technische Prozesse anwenden lässt. Die Methodik wird exemplarisch an einem Recyclingprozess zur Inwertsetzung mineralischer Reststoffe erprobt. Das Ergebnis ist ein praxisnaher und übertragbarer Indikatorenkatalog zur systematischen Integration sozialer Nachhaltigkeitsaspekte in die Bewertung technischer Prozesse.

1 EINLEITUNG

Die erfolgreiche Einführung neuer Technologien und Prozesse in gesellschaftliche Strukturen. ist nicht nur eine Frage der technischen Machbarkeit, der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit (Sharp & Miller, 2016). Während ökologische und ökonomische Aspekte der Nachhaltigkeitsbewertung bereits methodisch etabliert sind, besteht im Bereich der sozialen Dimension weiterhin Bedarf an systematischen und anwendungsorientierten Bewertungsansätzen. (Gian, Obydenkova, & van der Meer, 2025) listet die verschiedenen Methoden sowie deren Vor- und Nachteile zur sozialen Nachhaltigkeitsbewertung auf. Unter anderem wird dabei die sLCA beschrieben, welche folgende drei Hauptziele verfolgt: (i) das Messbarmachen von positiven und negativen Auswirkungen von Produkten (ii) (Cadena et al., 2019). Bei der Bewertung von Prozessen mit niedrigem Technology Readiness Level (TRL) ergeben sich vielfältige Problemstellungen; (Matthews et al., 2019). Diese basiert auf der Funktion des Produkts für den Verbraucher und ermöglicht quantitative Analysen sowie einen Vergleich der Auswirkungen (Cadena et al., 2019). Meist wird die soziale Nachhaltigkeit von Unternehmen bewertet, und nicht von Produkten oder Prozessen bewertet (Lehmann et al., 2013). Die verschiedenen TRLs sind in Abb. 1 abgebildet, je höher der TRL, desto mehr Daten sind über ein Produkt oder einen Prozess vorhanden. Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz soll sich auf niedrige bis mittlere TRLs beziehen.

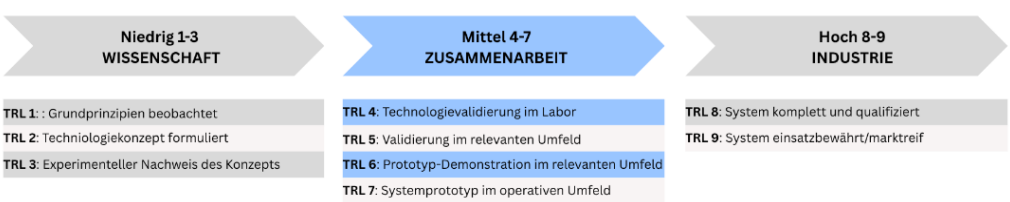


Abb. 1: Beschreibung der TRL inklusive zuständige Bearbeiter:innen nach (Hannouf et al., 2025)

Trotz der Relevanz sozialer Aspekte beziehen sich die meisten Nachhaltigkeitsbewertungen auf ökologische und ökonomische Aspekte und klammern die soziale Betrachtung aus. Meist aufgrund dessen, dass es für die soziale Nachhaltigkeitsbewertung keine praktikablen Ansätze zur Implementierung gibt (Hannouf et al., 2025). Auch die Problematik der Vergleichbarkeit von sLCAs wird häufig angeführt (Kühnen & Hahn, 2017). Allerdings ist es gerade in der Entwicklungsphase neuer Prozesse oder Produkte sinnvoll, die ganzheitliche Nachhaltigkeit zu berücksichtigen, um so früh wie möglich in den Gestaltungsprozess einzugreifen. Vom hier zutreffenden Eco-Design-Problem wird des Öfteren in Studien berichtet (Matthews et al., 2019). Es beschreibt den Zusammenhang zwischen Datenverfügbarkeit, des Reifegrades eines Produktes oder Prozesses und der Möglichkeit zur Adaption dieses Produktes/Prozesses (Chebaeva et al., 2021). Das Eco-Design-Problem unterstreicht die Wichtigkeit der Integration von Nachhaltigkeitsbewertung in der frühen Entwicklungsphase. Betrachtet wird ein TRL zwischen 4 und 7. In diesem Stadium erfolgt die Technologieentwicklung in Zusammenarbeit zwischen Industrie und Wissenschaft. Ab diesem Stadium ist eine sLCA laut Hannouf et al. (Hannouf et al., 2025) umsetzbar. Die Bewertung kann dazu beitragen, die direkten und indirekten sozialen Auswirkungen der Technologie zu verstehen und zu steuern. Die Einbindung von Stakeholdern ist dabei besonders wichtig, um soziale Akzeptanz zu fördern (Olakitan Atanda, 2019; Pereira, et al., 2025). Laut Huang et al. (Huang, et al., 2025) gibt es zwei Typen der sLCA, die in Tab. 1 inklusive Limitierungen und Vorzügen aufgelistet sind.

Tab. 1: Überkategorien Typ I und Typ II der sLCA nach (Pollok et al., 2021; Hosseinijou et al., 2014)

	Typ I	**Typ II**
Datenerhebung	gewichtet Ergebnisse basierend auf semi-quantitative Wichtigkeit	verlinkt quantitative Bestandsindikatoren mit den Funktionseinheiten
Limitierung	Probleme beim methodischen Identifizieren von Stakeholdern	Probleme beim Erstellen von Auswirkungswegen welche die Beziehungen korrekt darstellen
Anwendung	Geeignet für standortspezifische Daten	Geeignet für größere Maßstäbe
Unterkategorien	Scoring-, Checklist- und Datenbasierte Methode	Empirische- und E-LCI[1] Datenbasis Methode

[1)] E-LCI Environment Life Cycle Inventory

Für Prozesse, wie jene die in dieser Arbeit betrachtet werden und sich im Bereich TRL 4-7 befinden, eignet sich Typ I. Die Daten, welche erhoben werden können, stammen in den meisten Fällen von den integrierten Stakeholdern,und sind daher standortspezifisch und semi-quantitativ bis qualitativ. Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, einen Indikatorenkatalog für die soziale Nachhaltigkeitsbewertung neuer Prozesse zu erstellen, die Abfallströme in Sekundärrohstoffe umwandeln. Im Fokus stehen dabei die Identifikation, Strukturierung und Priorisierung sozialer Indikatoren, die sowohl den wissenschaftlichen Qualitätsanforderungen als auch den praktischen Anwendungsbedingungen gerecht werden. Hierzu werden bestehende sLCA-Rahmenwerke, internationale Leitlinien sowie aktuelle wissenschaftliche Ansätze analysiert und kritisch verglichen. Auf dieser Basis wird ein Indikatorenkatalog entwickelt, der auf den sechs Stakeholder-Kategorien der sLCA basiert. Die methodische Auswahl der sozialen Aspekte erfolgt unter Berücksichtigung der Prozessspezifika, der Datenverfügbarkeit und der Relevanz entlang der Wertschöpfungskette. Die Anwendung des entwickelten Auswahlprozesses auf das Projekt MINREC-HT („Innovative Sortier- und Recyclingverfahren für mineralische Reststoffe zur Inwertsetzung in Hochtemperaturanwendungen“) ermöglichte bereits die Identifikation relevanter Stakeholdergruppen. Das daraus resultierende Stakeholder-Mapping bildet die Grundlage für die nachfolgende Delphi-basierte Priorisierung sozialer Aspekte.

2 METHODIK

Dieser Beitrag folgt einem kombinierten Forschungsansatz. In Abb. 2 stellt die Methodik der Arbeit dar.

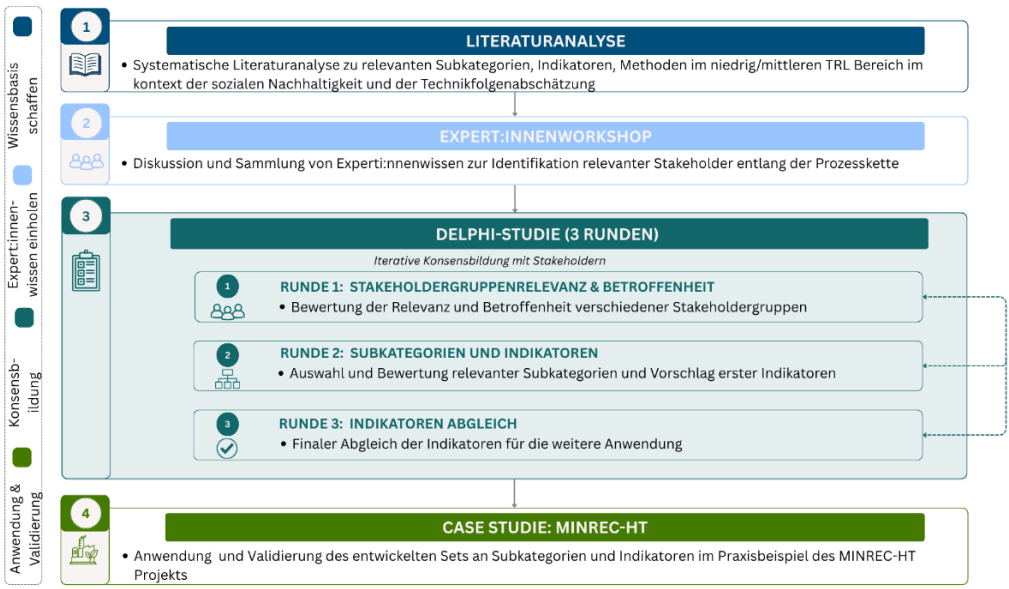


Abb. 2: Methode zur Entwicklung eines Indikatorenkatalogs auf Basis einer Literaturanalyse und einer Transdisziplinären Delphi-Studie

Schritt 1: Gestartet wurde mit einer systematischen Literaturrecherche auf Scopus und Web of Science mit dem Ziel, den Stand der Technik im Bereich sLCA bzw. Technikfolgenabschätzung für niedrige TRL-Prozesse abzubilden. Hierfür wurde folgender Searchstring verwendet: ("social life cycle assessment" OR sLCA OR "social sustainability assessment" OR "social impact assessment") AND ("technology assessment" OR "anticipatory assessment" OR "responsible research and innovation" OR "constructive technology assessment") AND ("low TRL" OR "technology readiness level" OR "early-stage" OR "early development" OR "emerging technology" OR "novel technology") AND ("process" OR "industrial process" OR "process development"). Als zeitlicher Horizont wurde die Spanne 2016 – 2026 gewählt. Nach aussortieren von Duplikaten hat diese Suche 146 Ergebnisse hervorgebracht. Nach einem Titelscreening, bei dem 64 Papers exkludiert wurden, die entweder reine LCA oder LCC betrachtet haben oder zu stark auf ethische Aspekte eingegangen sind, konnte ein Abstract-screening durchgeführt werden. Dabei wurden weitere 21 Paper exkludiert. Zuletzt wurden 10 Paper exkludiert, nachdem diese mittels AI mit ChatGPT Plus auf den Inhalt der Schlagwörter: „SLCA, social sustainability assessment, technology assessment, novel technologies, Stakeholder“ durchsucht wurden, und diese nicht aufgewiesen haben. Die identifizierten Publikationen wurden gesichtet und aufgrund mangelnder Relevanz ausgeschlossen. Durch eine Schneeballsuche wurde noch ein weiteres Paper zur Volltextanalyse hinzugefügt. Das Vorgehen für die systematische Literaturrecherche kann Abb. 3 entnommen werden.

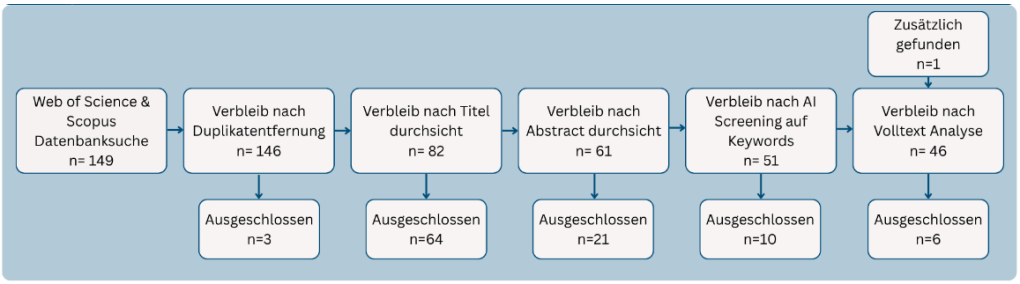


Abb. 3: Stufen der systematischen Literaturanalyse zu relevanten Subkategorien, Indikatoren, Methoden im niedrig/mittleren TRL Bereich im Kontext der sozialen Nachhaltigkeit und der Technologiefolgenabschätzung

Schritt 2: Im Zuge eines Expert:innenworkshops werden relevante Stakeholder und vulnerable Gruppen entlang des Prozesses identifiziert. Ebenso sollen die Systemgrenzen genau abgesteckt und eine funktionelle Einheit definiert werden. Der geführte Onlineworkshop findet im Rahmen des MINREC-HT Konsortiums, bestehend aus wissenschaftlichen Partner:innen und Industriebetrieben, statt.

Schritt 3: Mithilfe einer Delphi-Umfrage, einem strukturierten Expertenbefragungsverfahren, bei dem mehrere anonyme Befragungsrunden mit kontrolliertem Feedback durchgeführt werden, um schrittweise einen Konsens zu einem komplexen Thema oder einer zukünftigen Entwicklung zu erreichen, soll in der ersten Runde die Relevanz der Stakeholdergruppen sowie die Betroffenheit ebendieser erhoben werden. Diese Methode hat sich schon in anderen Studien wie zum Beispiel in der von Olakitan Atanda (Olakitan Atanda, 2019) bewehrt. Eine Anzahl von drei Befragungsrunden hat sich dabei als am effektivsten herausgestellt. Mit einer offen gestalteten Umfrage können alle im Zuge des Workshops gefundenen Stakeholder den Fragebogen erweitern. Nach der Auswertung werden Stakeholder Kategorien entfernt, die im Durchschnitt unter eine gewisse Mindestrelevanz fallen. Im zweiten Teil der Delphi-Umfrage werden die vorher definierten Kategorien mit den Subkategorien und Indikatoren laut United Nations Environment Programme (UNEP/SETAC, 2021) ausgesendet. Die Indikatoren werden durch literaturgefundene Indikatoren erweitert. Die Teilnehmer:innen bewerten in diesem Schritt die Relevanz der Subkategorien und der Indikatoren. Die Möglichkeit, weitere Indikatoren hinzuzufügen, besteht zu diesem Zeitpunkt. Nach der Auswertung der Ergebnisse wird eine dritte Umfrage ausgesendet, in dieser wird der Indikatorenkatalog von allen Teilnehmer:innen bewertet. Sollte es zu groben Unstimmigkeiten kommen, folgt eine weitere Umfrage; stimmen die Ergebnisse der dritten Umfrage zu einem gewissen Prozentsatz überein, wird das Ergebnis in einen finalen Indikatorenkatalog umgewandelt.

Schritt 4: Der in Schritt 3 gefundene Indikatorenkatalog wird anhand des Projektes MINREC-HT validiert. Über die Dauer des Projektes werden Daten gesammelt, jene Indikatoren, für die keine Daten erhoben werden können, werden neutral bewertet oder aus dem Case-spezifischen Indikatorenkatalog gestrichen.

3 ERGEBNIS UND DISKUSSION

Die Literaturrecherche ergab für den Zeitraum 2016 – 2026 insgesamt 46 relevante Publikationen im Themenfeld Technology Assessment und sLCA für Technologien mittlerer Technologiereife. Der überwiegende Teil der Arbeiten (n = 20) kombiniert die Entwicklung methodischer Rahmenwerke mit deren Anwendung in Fallstudien. Darüber hinaus wurden siebzehn Literaturübersichten, sechs reine Fallstudien sowie drei Publikationen mit ausschließlichem Fokus auf die Entwicklung methodischer Rahmenwerke identifiziert. Eine genaue Auflistung nach Jahreszahl ist in Abbildung 4 (links) ersichtlich.

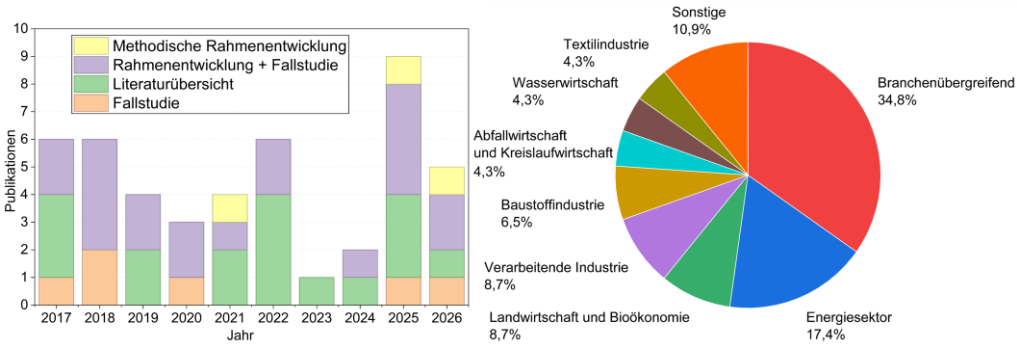


Abb. 4: (links) Publikationen pro Jahr, Aufteilung in Entwicklung eines methodischen Rahmens, Literaturübersicht, Rahmenentwicklung mit angeschlossener Fallstudie und Fallstudie; (rechts) Branchenaufteilung der Publikationen

Die Auswertung der 46 identifizierten Publikationen zeigt, dass etwa 35 % der Studien branchenübergreifend angelegt sind. Damit stellt diese Kategorie den größten Anteil der untersuchten Literatur dar. Die Kategorie „Sonstige“ umfasst Studien aus den Bereichen Informations- und Kommunikationstechnologien, Bergbau und Rohstoffgewinnung, Mobilität und Verkehr, Forstwirtschaft und biobasierte Materialien sowie der chemischen Industrie. Die vollständige Verteilung der Publikationen auf die verschiedenen Branchen ist in Abbildung 4 (rechts) dargestellt.

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die soziale Nachhaltigkeitsbewertung technischer Prozesse steht insbesondere bei Technologien mittlerer Entwicklungsreife vor der Herausforderung, aus einer Vielzahl möglicher Stakeholdergruppen, Subkategorien und Indikatoren jene Aspekte auszuwählen, die für den konkreten Anwendungsfall tatsächlich relevant und bewertbar sind. Etablierte sLCA-Leitfäden bieten hierfür eine breite methodische Grundlage, liefern jedoch nur begrenzt Orientierung für die systematische Reduktion und Priorisierung dieser Aspekte in frühen Entwicklungsphasen.

Der zentrale Beitrag dieser Arbeit liegt daher nicht in einer weiteren sLCA-Anwendung, sondern im vorgeschlagenen Auswahlprozess selbst. Durch die Kombination aus Literaturrecherche, Expert:innenwissen und Delphi-Verfahren wird ein strukturierter und dokumentierter Weg geschaffen, um relevante soziale Aspekte nachvollziehbar auszuwählen. Damit entsteht die Grundlage, soziale Nachhaltigkeitsbewertungen über verschiedene technische Prozesse hinweg vergleichbarer zu machen und soziale Erkenntnisse frühzeitig in die Prozessgestaltung zu integrieren.

Die Anwendung im Projekt MINREC-HT dient als praxisnaher Erprobungsfall, um die Übertragbarkeit und Anwendbarkeit des Vorgehens zu überprüfen. Langfristig kann der entwickelte Ansatz dazu beitragen, die soziale Dimension stärker in Technologieentwicklungsprozesse zu integrieren und dort eine methodische Auswahllogik bereitzustellen.

5 AUSBLICK

Das Projekt MINREC-HT verfolgt das Ziel, mineralische Reststoffe als wertvolle Sekundärrohstoffe nutzbar zu machen. Durch die Kombination innovativer Sortier- und Recyclingtechnologien werden hochwertige Ressourcen gewonnen und für die Herstellung nachhaltiger Feuerfestprodukte sowie für Bindemittel eingesetzt. Um die Nachhaltigkeit in der Entwicklung zu verankern und Verlagerungseffekte zu vermeiden, soll eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung durchgeführt werden. Im Rahmen des Projektes wird der Indikatorenkatalog hinsichtlich Praktikabilität und Vollständigkeit evaluiert. Schwachstellen sollen iterativ optimiert werden, um am Ende eine

solide und übertragbare Methodik für zukünftige sLCA für Recyclingprozessentwicklung zu etablieren.

LITERATURVERZEICHNIS

Cadena, E., Rocca, F., Gutierrez, J. A., & Carvalho, A. (2019). Social life cycle assessment methodology for evaluating production process design: Biorefinery case study. *Journal of Cleaner Production*.

Chebaeva, N., Lettner, M., Wenger, J., Schöggl, J.-P., Hesser, F., Holzer, D., & Stern, T. (2021). Dealing with the eco-design paradox in research and development projects: The concept of sustainability assessment levels. *Journal of Cleaner Production*.

Gian, M., Obydenkova, S. V., & van der Meer, Y. (2025). Key aspects in the social dimension of sustainability for assessment and reporting. *Sustainable Production and Consumption*.

Hannouf, M. B., Padilla-Rivera, A., Assefa, G., & Gates, I. (2025). Social life cycle assessment (S-LCA) of technology systems at different stages of development. *Int J Life Cycle Assess (The International Journal of Life Cycle Assessment)*.

Hosseinijou, S. A., Mansour, S., & Shirazi, M. A. (2014). Social life cycle assessment for material selection: a case study of building materials. *Int J Life Cycle Assess (The International Journal of Life Cycle Assessment)*.

Huang, Q., Sun, Y., Guo, Q., Li, Q., Zhang, Y., Li, X., & Wang, L. (2025). Social life cycle assessment and its methodological challenges: A bibliometric and content analysis. *J of Industrial Ecology (Journal of Industrial Ecology)*.

Kühnen, M., & Hahn, R. (2017). Indicators in Social Life Cycle Assessment: A Review of Frameworks, Theories, and Empirical Experience. *J of Industrial Ecology (Journal of Industrial Ecology)*.

Lehmann, A., Zschieschang, E., Traverso, M., Finkbeiner, M., & Schebek, L. (2013). Social aspects for sustainability assessment of technologies—challenges for social life cycle assessment (SLCA). *Int J Life Cycle Assess (The International Journal of Life Cycle Assessment)*.

Matthews, N. E., Stamford, L., & Shapira, P. (2019). Aligning sustainability assessment with responsible research and innovation: Towards a framework for Constructive Sustainability Assessment. *Sustainable Production and Consumption*.

Olakitan Atanda, J. (2019). Developing a social sustainability assessment framework. *Sustainable Cities and Society*.

Pereira, C., Zarghami, A., Teixeira, E., & Araújo, E. (2025). Stakeholder Mapping for a Nature-Based Solutions Project: A Comprehensive Approach for Enhanced Participation and Co-Creation. *Sustainability*.

Pollok, L., Spierling, S., Endres, H.-J., & Grote, U. (2021). Social Life Cycle Assessments: A Review on Past Development, Advances and Methodological Challenges. *Sustainability*.

Sharp, B. E., & Miller, S. A. (2016). Potential for Integrating Diffusion of Innovation Principles into Life Cycle Assessment of Emerging Technologies. *Environmental science & technology*.

UNEP/SETAC. (2021). *The Methodological Sheets for Sub-categories in Social Life Cyyle Assessment (S-LCA).*

DANKSAGUNG

Das Projekt MINREC-HT wird im Rahmen der nationalen Ausschreibung Ressourcenwende 2025 vom Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) gefördert. Die Abwicklung erfolgt durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG). FFG-Projektdatenbank: https://projekte.ffg.at/projekt/5145339

Vom Alltag zur CO_2-Bilanz: Digitales Tool und erste Haushaltserhebungen für klimafreundlichen Konsum

Elisabeth Schmied[1], Silvia Schütz[1] & Gudrun Obersteiner[1]
[1)] BOKU University, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Das Horizon-Europe-Projekt CARE verfolgt das Ziel, haushaltsbedingte Treibhausgasemissionen durch Lebensmittelverschwendung sowie den Konsum von Bekleidung und Wäsche zu reduzieren und gleichzeitig nachhaltiges Wohlbefinden zu fördern. Hierfür wurde das CARE CO_2-Tool entwickelt, das Emissionen in den relevanten Konsumbereichen erfasst, bewertet und in Form verständlicher Rückmeldungen visualisiert. Im Unterschied zu allgemeinen CO_2-Fußabdruckrechnern konzentriert sich das Tool ausschließlich auf die projektrelevanten Bereiche und ermöglicht dadurch eine detaillierte und handlungsorientierte Bewertung individueller Konsumpraktiken. Regionsspezifische Datensätze und eine mehrsprachige Benutzeroberfläche gewährleisten eine hohe Anwendbarkeit in unterschiedlichen europäischen Kontexten. Die unmittelbare Rückmeldung zu Emissionseinsparungen sowie die kontinuierliche Fortschrittsdarstellung unterstützen Nutzerinnen und Nutzer bei der Umsetzung nachhaltiger Verhaltensänderungen. Durch die Verbindung von wissenschaftlich fundierter Emissionsbewertung und praxisorientierter Nutzerführung schließt das CARE CO_2-Tool die Lücke zwischen Datenerhebung, Bewertung und alltagsnaher Umsetzung klimafreundlicher Konsumentscheidungen.

1 EINLEITUNG

Das Horizon-Europe-Projekt CARE konzentriert sich auf haushaltsbezogene Konsum- und Nutzungspraktiken in den Bereichen Ernährung, Bekleidung und Wäsche. Ziel ist es, jene Verhaltensweisen zu identifizieren und zu fördern, die ein hohes Potenzial zur Verringerung von Treibhausgasemissionen besitzen und zugleich praktikabel in den Alltag integriert werden können. Dazu werden unterschiedliche Maßnahmen in den zwei Schwerpunktthemen gemeinsam mit den Haushalten implementiert. Das Ziel ist es, insgesamt 100 Haushalte in fünf europäischen Ländern zu Modellhaushalten der Kreislaufwirtschaft umzugestalten. Das Ergebnis der Transformation soll auch hinsichtlich der Umweltauswirkungen evaluiert werden. Um den Haushalten direktes Feedback zum Erfolg ihrer Anstrengungen zu geben sollte ein CO_2-Fußabdruckrechner zum Einsatz kommen.

Im Rahmen der Projektvorbereitung wurden verschiedene etablierte CO_2-Fußabdruckrechner – darunter der Consumer Footprint Calculator (EU-JRC), „Mein ökologischer Rucksack“, der WWF Footprint Calculator, der Ducky Footprint Calculator sowie der PS Lifestyle Test – hinsichtlich ihrer Eignung für die Projektziele bewertet. Die Analyse zeigte, dass diese Anwendungen den gesamten Lebensstil abbilden und dadurch zahlreiche Bereiche wie Mobilität oder Freizeit einbeziehen. Für die spezifischen Fragestellungen des CARE-Projekts bieten sie daher weder die erforderliche thematische Fokussierung noch die notwendige Detailtiefe in den Bereichen Lebensmittel und Bekleidung.

Vor diesem Hintergrund wurde ein eigenständiges Open-Source-Tool entwickelt. Das CARE CO_2-Tool ermöglicht die strukturierte Erfassung haushaltsbezogener Aktivitäten, berechnet die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen und stellt deren Auswirkungen in verständlicher Form dar. Die Anwendung verbindet wissenschaftlich fundierte Emissionsberechnungen mit einer intuitiven Benutzerführung und unterstützt Haushalte dabei, wirksame Maßnahmen zur Emissionsreduktion zu identifizieren, umzusetzen und langfristig nachzuverfolgen.

2 KERNFUNKTIONEN DES CARE CO_2-TOOLS

Das CARE CO_2-Tool wurde entwickelt, um wissenschaftlich fundierte Emissionsberechnungen mit einer benutzerfreundlichen Anwendung zu verbinden. Im Mittelpunkt stehen die Erfassung, Bewertung und Visualisierung haushaltsbezogener Treibhausgasemissionen in den Bereichen Ernährung, Bekleidung und Wäsche. Die Funktionalitäten des Tools sind gezielt auf die Anforderungen des CARE-Projekts ausgerichtet und unterstützen Haushalte dabei, Emissionen nachvollziehbar zu dokumentieren sowie konkrete Einsparpotenziale zu identifizieren.

2.1 Fokussierung auf projektrelevante Konsumbereiche

Im Gegensatz zu allgemeinen CO_2-Fußabdruckrechnern konzentriert sich das CARE CO_2-Tool ausschließlich auf die drei projektrelevanten Konsumbereiche Ernährung, Bekleidung und Wäsche. Diese thematische Spezialisierung ermöglicht eine differenzierte Erfassung der jeweiligen Konsumpraktiken sowie eine präzisere Bewertung der daraus resultierenden Treibhausgasemissionen. Die Rückmeldungen beziehen sich unmittelbar auf die eingegebenen Aktivitäten und verdeutlichen den Einfluss individueller Alltagsentscheidungen auf den persönlichen CO_2-Fußabdruck.

2.2 Unmittelbare Rückmeldung und Fortschrittsdarstellung

Nach jeder Dateneingabe werden die entsprechenden Emissionseinsparungen automatisch berechnet und in verständlicher Form dargestellt. Die Ergebnisse stehen den Nutzerinnen und Nutzern unmittelbar zur Verfügung und werden im persönlichen Dashboard fortlaufend dokumentiert. Dadurch können Veränderungen des eigenen Konsumverhaltens über einen längeren Zeitraum nachvollzogen und erzielte Fortschritte transparent dargestellt werden. Die kontinuierliche Visualisierung der Einsparungen unterstützt die Motivation zur langfristigen Umsetzung klimafreundlicher Verhaltensweisen.

2.3 Mehrsprachigkeit und regionsspezifische Datengrundlage

Das CARE CO_2-Tool steht derzeit in den Sprachen Deutsch, Englisch, Estnisch, Finnisch, Norwegisch und Schwedisch zur Verfügung. Die Emissionsberechnungen basieren auf regionsspezifischen Datensätzen, wodurch landesspezifische Unterschiede berücksichtigt und eine hohe Aussagekraft der Ergebnisse gewährleistet werden. Die Kombination aus Mehrsprachigkeit und regional angepasster Datengrundlage ermöglicht den Einsatz des Tools in unterschiedlichen europäischen Anwendungsgebieten.

2.4 Community-Anbindung und Wissensaustausch

Neben der individuellen Datenerfassung unterstützt das Tool den Erfahrungsaustausch zwischen den teilnehmenden Haushalten. Über die Verknüpfung mit der CARE-Website und der Community-Plattform können Maßnahmen, Erfahrungen und bewährte Vorgehensweisen ausgetauscht werden. Dieser Wissenstransfer fördert das gegenseitige Lernen und kann die Umsetzung nachhaltiger Konsumpraktiken zusätzlich unterstützen.

2.5 Kontinuierliche Weiterentwicklung

Das CARE CO_2-Tool befindet sich im kontinuierlichen Echtzeitbetrieb und wird fortlaufend weiterentwickelt. Technische Optimierungen, funktionale Erweiterungen sowie Fehlerkorrekturen werden iterativ umgesetzt und basieren auf den Rückmeldungen der Nutzerinnen und Nutzer.

Dieses Vorgehen trägt dazu bei, Bedienbarkeit, Funktionalität und Qualität der Emissionsberechnungen kontinuierlich zu verbessern und die langfristige Anwendbarkeit des Tools sicherzustellen.

3 STRUKTUR, BEDIENUNG UND NUTZERFÜHRUNG

Das CARE CO_2-Tool wurde mit dem Ziel entwickelt, eine wissenschaftlich fundierte Emissionsbewertung mit einer intuitiven Benutzerführung zu verbinden. Die Systemarchitektur unterstützt sowohl eine einfache Dateneingabe als auch eine transparente Darstellung individueller Emissionseinsparungen. Gleichzeitig gewährleistet sie eine strukturierte Datenerfassung für die wissenschaftliche Begleitung der Pilotstudien.

3.1 Zugang und Benutzeroberfläche

Der Zugang zum CARE CO_2-Tool erfolgt über eine frei zugängliche Informationsoberfläche (Open Access Area), die grundlegende Informationen zum Projekt, eine Einführung für neue Nutzerinnen und Nutzer sowie Hintergrundinformationen zur Berechnung des CO_2-Fußabdrucks bereitstellt. Der geschützte Login-Bereich ist derzeit ausschließlich Haushalten vorbehalten, die am CARE-Projekt teilnehmen. Nach der Anmeldung werden entsprechend der Zuordnung zum jeweiligen Pilotbereich ausschließlich jene Funktionen freigeschaltet, die für den individuellen Interventionsschwerpunkt relevant sind. Im persönlichen Dashboard werden die erfassten Aktivitäten sowie die kumulierten CO_2-Einsparungen übersichtlich dargestellt und fortlaufend aktualisiert.

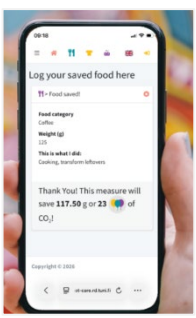


Abb. 1 Screenshot Bedienungsoberfläche CARE CO_2-Tool

3.2 Dokumentation nachhaltiger Verhaltensänderungen

Das Tool ermöglicht die systematische Erfassung von Maßnahmen zur Reduktion haushaltsbezogener Treibhausgasemissionen. Dokumentiert werden können beispielsweise die Vermeidung von Lebensmittelverschwendung, die Entscheidung für Secondhand-Bekleidung anstelle von Neuanschaffungen oder Veränderungen des Waschverhaltens. Nach jeder Eingabe werden die daraus resultierenden Emissionseinsparungen unmittelbar berechnet und visualisiert. Dadurch wird die Wirkung einzelner Maßnahmen nachvollziehbar und die Entwicklung des individuellen CO_2-Fußabdrucks kontinuierlich dokumentiert.

3.3 Emissionsberechnung und Rückmeldesystem

Die Berechnung der Treibhausgasemissionen basiert auf einer lebenszyklusorientierten Methodik nach dem Product Environmental Footprint (PEF)-Ansatz. Die berechneten Ergebnisse werden in verständliche Rückmeldungen überführt, die Nutzerinnen und Nutzern eine Einordnung ihrer Konsumpraktiken ermöglichen und Handlungsfelder mit hohem Einsparpotenzial aufzeigen.

Der kontinuierliche Prozess aus Datenerfassung, Emissionsbewertung und Rückmeldung unterstützt eine evidenzbasierte Anpassung des Konsumverhaltens und fördert die langfristige Umsetzung klimafreundlicher Maßnahmen.

3.4 Datenmanagement und Administration

Das CARE CO_2-Tool steht derzeit in sechs Sprachen zur Verfügung und nutzt regionsspezifische Datensätze, um die Emissionsberechnungen an nationale Rahmenbedingungen anzupassen. Für die teilnehmenden Haushalte stehen Funktionen zum Export, Ausdruck und zur Löschung der eigenen Datensätze zur Verfügung. Dadurch werden Transparenz sowie die Kontrolle über die erhobenen Daten gewährleistet. Darüber hinaus umfasst das System einen Administrationsbereich für Projektverantwortliche, über den länderspezifische Datensätze für wissenschaftliche Auswertungen und Maßnahmen der Qualitätssicherung exportiert werden können.

3.5 Qualitätssicherung und Weiterentwicklung

Das CARE CO_2-Tool wird im Echtzeitbetrieb kontinuierlich weiterentwickelt. Funktionale Erweiterungen, technische Optimierungen und Fehlerkorrekturen werden iterativ umgesetzt und orientieren sich an den Rückmeldungen der Nutzerinnen und Nutzer. Ergänzend ist eine strukturierte Evaluation im Rahmen der Pilotstudien vorgesehen, um Erkenntnisse zur Bedienbarkeit, Funktionalität und Nutzerakzeptanz systematisch in die Weiterentwicklung des Tools einfließen zu lassen. Dieser kontinuierliche Verbesserungsprozess trägt zur langfristigen Qualität und Anwendbarkeit des Systems bei.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Das im Rahmen des Horizon-Europe-Projekts CARE entwickelte CO_2-Tool verbindet wissenschaftlich fundierte Emissionsberechnungen mit einer anwenderorientierten Benutzerführung und unterstützt Haushalte dabei, die klimarelevanten Auswirkungen ihres Konsumverhaltens nachvollziehbar zu erfassen. Im Unterschied zu vielen bestehenden CO_2-Fußabdruckrechnern konzentriert sich das Tool gezielt auf die Bereiche Ernährung, Bekleidung und Wäsche. Obwohl diese Konsumfelder häufig weniger Beachtung finden als Mobilität oder Energieverbrauch, tragen sie wesentlich zu den Treibhausgasemissionen des Alltags bei und bieten ein erhebliches Potenzial zur Emissionsminderung.
Die unmittelbare Rückmeldung zu den erzielten Emissionseinsparungen, die kontinuierliche Fortschrittsdarstellung sowie die Verwendung regionsspezifischer Datensätze fördern die Nachvollziehbarkeit individueller Verhaltensänderungen und unterstützen deren langfristige Umsetzung. Ergänzend leisten die mehrsprachige Ausgestaltung des Tools und seine kontinuierliche Weiterentwicklung einen Beitrag zur nachhaltigen Nutzung im Projektkontext.
Insgesamt stellt das CARE CO_2-Tool ein praxisorientiertes Instrument dar, das die Lücke zwischen wissenschaftlicher Emissionsbewertung und alltagsbezogenem Handeln schließt. Durch die Verbindung von Datenerfassung, Emissionsberechnung und verständlicher Rückmeldung unterstützt es die Entwicklung klimafreundlicher Konsumpraktiken und trägt zur Erreichung der im CARE-Projekt angestrebten Emissionsreduktionen.

KONTAKT

DI Elisabeth Schmied
Elisabeth.schmied@boku.ac.at
+43 1 47654 81331
Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft; BOKU University
https://boku.ac.at/lawi/abfk

Beprobung der Textildeponien in der Atacama Wüste

Sebastian Rosenbusch[1], Andreas Bartl[1] & Gabriela Veronica Aguirre Martinez[2]
[1)] TU Wien, Mechanische Verfahrenstechnik, Wien, Österreich
[2)] Arturo Prat University, Centro Andaluz de Ciencia y Tecnologia Marinas (CACYTMAR), Iquique, Chile

KURZFASSUNG: Die globale Textilindustrie zählt zu den ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren; insbesondere das Fast-Fashion-Modell führt zu stetig wachsenden Mengen exportierter Textilabfälle in Länder des Globalen Südens. Ein besonders drastisches Beispiel sind die ausgedehnten illegalen Textilmülldeponien in der chilenischen Atacama-Wüste, in denen unverkaufte Neuware und ausrangierte Gebrauchttextilien akkumulieren und erhebliche ökologische, gesundheitliche und ressourcenbezogene Herausforderungen verursachen. Der vorliegende Beitrag stellt eine laufende Feldstudie vor, die Materialcharakterisierung mit ökotoxikologischer und Luftfilter Untersuchung kombiniert, um Umweltbelastung und Recyclingfähigkeit der dort abgelagerten Textilien zu bewerten. Im Rahmen eines mehrwöchigen Forschungsaufenthalts in der Region Tarapacá (Iquique und Alto Hospicio) wurden über eine Tonne Textilabfälle sowie Boden- und Wasserproben gesammelt und teilweise bereits analysiert; die angewandte Probenahme- und Charakterisierungsmethodik orientiert sich an einer vergleichbaren Untersuchung in Wien. Erste Ergebnisse zeigen eine von Baumwolle (45 %) und Polyethylenterephthalat (32 %) dominierte Faserzusammensetzung, während akute Ökotoxizitätstests mit Ostrakoden an Textileluaten unter den gewählten Testbedingungen keine signifikante Toxizität nachweisen konnten. Keimtests, Boden- und Salzwassereluat-Untersuchungen sowie die chemische Analytik der Luftfilter auf persistente organische Schadstoffe und Mikroplastik – Letztere in Zusammenarbeit mit RECETOX, Masaryk University Brno – stehen noch aus und werden gemeinsam mit einer vollständigen Massenbilanz sowie einem Vergleich mit dem Wiener Datensatz in einer nachfolgenden Vollpublikation dargestellt.

1 EINLEITUNG

Die globale Textilindustrie zählt zu den umweltintensivsten Wirtschaftssektoren. Schätzungen zufolge verursacht die Modeindustrie weltweit jährlich über 92 Millionen Tonnen Textilabfall und einen Wasserverbrauch von rund 79 Billionen Litern und ist zugleich für etwa 8–10 % der globalen CO_2-Emissionen verantwortlich (Niinimäki et al., 2020). Haupttreiber dieser Entwicklung ist das Fast-Fashion-Geschäftsmodell, dessen ökologische Auswirkungen in der Forschung zunehmend systematisch untersucht werden (Olivar Aponte et al., 2024).

Ein erheblicher Teil der in Industrieländern anfallenden Gebrauchttextilien wird über internationale Handelsströme in Länder des Globalen Südens exportiert (Morell-Delgado et al., 2025). Chile zählt zu den größten Importeuren von Gebrauchttextilien weltweit und nimmt in Lateinamerika eine Spitzenposition ein; die Importmengen haben sich dort innerhalb von zwei Jahrzehnten um rund 500 % erhöht, während die Bevölkerung im selben Zeitraum nur um etwa 26 % wuchs (Espinoza-Pérez et al., 2022). Ein erheblicher Anteil der importierten Ware ist jedoch nicht für den Wiederverkauf geeignet: Jährlich werden schätzungsweise 60.000 Tonnen Gebrauchttextilien nach Chile importiert, von denen rund 39.000 Tonnen illegal in der Atacama-Wüste abgelagert werden (Brambilla, 2026). Die Region hat sich damit zu einem Aufnahmegebiet für nicht mehr verwertbare Textilien aus dem Globalen Norden entwickelt, mit entsprechenden ökologischen und sozialen Folgen für die betroffene Bevölkerung (Brambilla, 2026).

Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft stellen diese Deponien jedoch gleichzeitig eine bislang kaum genutzte Ressource dar. Wie am Beispiel Wiens gezeigt wurde, hängt die Ausschöpfung des Recyclingpotenzials von Textilabfällen entscheidend von einer detaillierten Kenntnis der Materialzusammensetzung ab; insbesondere die differenzierte Erfassung von Mono- und

Mischfaserfraktionen ist Voraussetzung für die Entwicklung geeigneter Sortier- und Recyclingverfahren (Kählig et al., 2025). Die in diesem Beitrag angewandte Methodik zur Probenahme und Materialcharakterisierung orientiert sich an diesem Ansatz. Carbon-footprint-basierte Untersuchungen für Chile zeigen zudem, dass ein Recyclingprozess gegenüber der Deponierung von Textilabfällen ein erhebliches CO_2-Einsparpotenzial aufweist (Espinoza-Pérez et al., 2022). Eine systematische, vor Ort durchgeführte Charakterisierung der in der Atacama-Wüste abgelagerten Textilien – sowohl hinsichtlich ihrer stofflichen Verwertbarkeit als auch ihrer toxikologischen Belastung – fehlt bislang weitgehend.

2 MATERIAL UND METHODEN

Die Untersuchung wurde im Rahmen eines Forschungsaufenthalts zwischen 21.03. und 04.05.2026 in der Region Tarapacá im Norden Chiles durchgeführt, in Zusammenarbeit zwischen der TU Wien und der Universidad Arturo Prat (Iquique). Untersuchungsschwerpunkte waren die Stadt Alto Hospicio sowie der Ablagerungsbereich Paso La Mula, an dem sich ausgedehnte illegale Textilmülldeponien befinden. Die Probenahme erfolgte nicht mit dem Anspruch der Repräsentativität für den gesamten regionalen oder globalen Textilstrom, sondern als stichprobenbasierte Fallstudie an realen Ablagerungen.

Aus den Ablagerungen wurden mehrere Chargen von Abfalltextilien gesammelt. Die Charakterisierungsmethodik orientierte sich an dem von Kählig et al. (2025) für Wien entwickelten Ansatz und umfasste die Erfassung von Masse, Fotodokumentation, Faserzusammensetzung anhand der Pflegeetiketten sowie die Identifikation von Monomaterialien. Mehrschichtige Textilien (z. B. Jacken) wurden in Außenschicht und Innenfutter zerlegt und getrennt gewogen; zusätzliche Komponenten wie Metallteile, Aufdrucke, Beschichtungen und elastische Elemente wurden dokumentiert. Aus ausgewählten Monomaterialien wurden ca. 5 g schwere Proben für weiterführende Recyclinguntersuchungen entnommen; zufällig ausgewählte Proben wurden zusätzlich nach Wien transportiert, um eine polyamidreiche Fraktion für spätere Recyclingprozesse zu identifizieren.

Bodenproben (insgesamt ca. 10 kg) wurden an mehreren Stellen im Deponiebereich hinter Alto Hospicio entnommen; Bereiche mit aktiven Bränden wurden aus Sicherheitsgründen gemieden. Aus den Bodenproben wurden wässrige Eluate in zwei Konzentrationen hergestellt (25 g bzw. 75 g Boden je 50 ml Wasser, entsprechend 100 % bzw. 300 % Eluat) und 24 h auf einer Schüttelplatte bewegt. Zusätzlich wurden Süß- und Salzwassereluate aus Textilien angesetzt (93 g Textil je 930 ml Wasser, 100 g/l bzw. 1:10 m/V), ebenfalls 24 h bei 200 rpm geschüttelt, mittels Vakuumfiltration abgetrennt und vor den Bioassays mit Umgebungsluft belüftet.

Zur Bewertung der ökotoxikologischen Wirkung der Eluate wurden Keimtests mit Quinoa und Salat (Lactuca sativa) sowie Mortalitätstests mit Ostrakoden durchgeführt. Für die Keimtests wurden je 25 Samen auf Filterpapier in sterilen Petrischalen unter kontrollierten Bedingungen ausgelegt. Für die Ostrakodentests wurden ca. 200 Tiere aus der Aufzuchtstation der Universidad Arturo Prat isoliert und in einer Verdünnungsreihe des Textil-Süßwassereluats (100 %, 33,3 %, 11,1 %, 3,7 %, 1,2 %, 0 %; je 6 Tiere in 20 ml) exponiert.

Zur Erfassung persistenter organischer Schadstoffe (POPs) und von Mikroplastik in der Umgebungsluft wurde eine zwölftägige Messkampagne mit einem High Volume Sampler CAV-A/MSb durchgeführt. Für die POP-Analytik wurden bei 350 °C über 24 h kalzinierte Quarzfaserfilter (Ahlstrom Munktell) eingesetzt, für die Mikroplastik-Erfassung nicht kalzinierte Filter. Die Probenahme erfolgte in 24-Stunden-Intervallen mit morgendlichem und nachmittäglichem Filterwechsel.

Für eine künftige Gesamtmassenbilanz werden die dokumentierten Mengen an gesammelten, analysierten und entsorgten Textilien sowie an Boden- und Wasserproben zusammengeführt; eine abschließende, überschneidungsfreie Bilanzierung steht noch aus.

3 ERGEBNISSE UND STATUS DER UNTERSUCHUNG

Da die Feldarbeiten erst kürzlich (März/April 2026) abgeschlossen wurden, liegt ein Teil der laboranalytischen Auswertung zum Zeitpunkt dieses Beitrags noch nicht vor. Im Folgenden werden der erreichte Stand sowie erste vorliegende Ergebnisse dargestellt.

Die bislang ausgewertete Faserzusammensetzung der gesammelten Textilien ergab einen Anteil von 45 % Baumwolle, 32 % Polyethylenterephthalat (PET) und 7 % Viskose; die verbleibenden rund 16 % entfallen auf weitere Fasertypen. Eine chargenspezifische Auswertung sowie eine Aufschlüsselung des Mono- gegenüber dem Mischmaterialanteil sind derzeit in Bearbeitung.
Die akute Toxizität des Textil-Süßwassereluats wurde mittels Ostrakoden-Bioassay in mehreren validen Testdurchgängen untersucht. Dabei zeigte sich unter den gewählten Testbedingungen keine signifikante Mortalität oder Mobilitätshemmung gegenüber der Kontrolle.

Die Auswertung der Keimtests, der Boden- und Salzwassereluat-Bioassays sowie der chemischen Analytik der Luftfilter (persistente organische Schadstoffe, Mikroplastik) – Letztere in Zusammenarbeit mit RECETOX, Masaryk University Brno – liegt derzeit noch nicht vor. Diese Ergebnisse sowie eine vollständige, überschneidungsfreie Massenbilanz der gesammelten und analysierten Textilmengen werden Gegenstand einer nachfolgenden Vollpublikation sein.

4 DISKUSSION

Die bislang vorliegende Faserzusammensetzung der untersuchten Textilien (45 % Baumwolle, 32 % PET, 7 % Viskose) zeigt erste Parallelen zu Befunden aus anderen Charakterisierungen von Textilabfallströmen: Auch bei der von Kählig et al. (2025) für Wien durchgeführten Untersuchung stellte Baumwolle mit rund der Hälfte der Fasermasse die dominierende Faserart dar. Eine direkte Vergleichbarkeit ist jedoch erst nach Abschluss der chargenspezifischen Auswertung sowie der Bestimmung des Mono- gegenüber dem Mischmaterialanteil möglich, da insbesondere Letzterer maßgeblich über die Eignung als Recyclinginput entscheidet (Kählig et al., 2025). Mit einem Anteil von 32 % liegt PET in der untersuchten Ablagerung deutlich über den von Kählig et al. (2025) für Wien ermittelten Werten (17 % im Mischsiedlungsabfall bzw. 20 % in der getrennten Sammlung), bleibt jedoch klar unter dem globalen Produktionsanteil von PET-Fasern von rund 54 % (Textile Exchange, zit. n. Kählig et al., 2025). Synthetische Fasern scheinen in der untersuchten Ablagerung demnach eine größere Rolle zu spielen als im mitteleuropäischen Siedlungsabfall, ohne jedoch das global hohe Aufkommen synthetischer Fasern vollständig widerzuspiegeln. Der erhöhte PET-Anteil eröffnet einerseits Chancen für ein textilbasiertes Recycling, birgt andererseits aber auch Risiken wie eine verstärkte Mikroplastikfreisetzung durch UV-Abbau oder das mögliche Vorhandensein halogenierter Flammschutzmittel.

Das Ausbleiben einer akuten Toxizität im Ostrakoden-Bioassay ist nicht mit einer generellen Unbedenklichkeit der untersuchten Textilmatrix gleichzusetzen. Der angewandte Test erfasst lediglich einen einzelnen akuten Endpunkt (Mortalität bzw. Mobilitätshemmung) entlang eines spezifischen Expositionspfads (wässriges Süßwassereluat); chronische bzw. subletale Effekte, alternative Expositionsmatrices (Salzwasser- und Bodeneluate) sowie inhalative Expositionspfade über partikelgebundene Luftschadstoffe wurden damit nicht abgebildet. Darüber hinaus schließt ein negativer ökotoxikologischer Befund das Vorhandensein toxikologisch relevanter Substanzen in der Textilmatrix nicht aus, da deren Bioverfügbarkeit unter den gewählten Testbedingungen – etwa hinsichtlich Löslichkeit, Sorption an Partikel oder Eluationsverfahren – limitiert sein kann. Eine belastbare Risikobewertung erfordert daher weiterhin die Verknüpfung stofflich-chemischer mit ökotoxikologischer Charakterisierung über mehrere Expositionspfade und Endpunkte hinweg.

Insgesamt unterstreichen die ersten Befunde den im Abstract formulierten Doppelcharakter der untersuchten Deponien als Umweltproblem und Ressourcenschatz: Die nennenswerten Anteile

an Baumwolle und PET deuten auf relevantes Recyclingpotenzial hin (vgl. Espinoza-Pérez et al., 2022), während die noch ausstehende toxikologische und materialchemische Vollanalyse erforderlich ist, um eine fundierte Risikobewertung vorzunehmen.

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen eines mehrwöchigen Forschungsaufenthalts in der Region Tarapacá wurde ein kombinierter Ansatz aus Materialcharakterisierung, Ökotoxikologie und Luftmessung zur Untersuchung illegaler Textilmülldeponien in der Atacama-Wüste etabliert. Es wurden über eine Tonne Textilien sowie Boden- und Wasserproben gesammelt und analysiert. Erste Ergebnisse zeigen eine von Baumwolle und PET dominierte Faserzusammensetzung sowie – im Ostrakoden-Bioassay – keine akute Toxizität des Textil-Süßwassereluats.

Der vorliegende Beitrag stellt einen Zwischenstand dar. Eine nachfolgende Vollpublikation wird insbesondere die chargenspezifische Materialbilanz, die Ergebnisse der Keimtests sowie der Boden- und Salzwassereluat-Bioassays, die chemische Analytik der Luftfilter auf persistente organische Schadstoffe und textilspezifische Marker (in Zusammenarbeit mit RECETOX, Masaryk University Brno) sowie eine abschließende Massenbilanz darstellen. Zusätzlich ist ein Vergleich mit einer analog durchgeführten Charakterisierung von Alttextilien in Wien (Kählig et al., 2025) sowie die Bewertung einer polyamidreichen Fraktion für nachfolgende Filamentversuche vorgesehen.

LITERATURVERZEICHNIS

Brambilla, E. M. (2026). Policy, waste, and power: Textile dumping in Chile's Atacama Desert. *Latin American Policy, 17*(2), Article e70053. https://doi.org/10.1111/lamp.70053

Espinoza-Pérez, L. A., Espinoza-Pérez, A. T., & Vásquez, Ó. C. (2022). *Exploring an alternative to the Chilean textile waste: A carbon footprint assessment of a textile recycling process* [Preprint]. SSRN. https://ssrn.com/abstract=4002416

Kählig, P., Ipsmiller, W., Bartl, A., & Lederer, J. (2025). Characterisation of waste textiles from mixed MSW and separate collection—A case study from Vienna, Austria. *Sustainability, 17*(12), Article 5484. https://doi.org/10.3390/su17125484

Morell-Delgado, G., Talens Peiró, L., & Toboso-Chavero, S. (2025). The journey of a discarded T-shirt: From the Global North to the Atacama dumpsite. *Circular Economy and Sustainability, 5*, 4957–4984. https://doi.org/10.1007/s43615-025-00618-z

Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment, 1*, 189–200. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9

Olivar Aponte, N., Hernández Gómez, J., Torres Argüelles, V., & Smith, E. D. (2024). Fast fashion consumption and its environmental impact: A literature review. *Sustainability: Science, Practice and Policy, 20*(1), Article 2381871. https://doi.org/10.1080/15487733.2024.2381871

KONTAKT

Sebastian Rosenbusch
Sebastian.rosenbusch@tuwien.ac.at
+4915568084443
Univ.Ass.
TU Wien
https://www.linkedin.com/in/sebastian-rosenbusch-76197a156/

Setting Recycling Rates: Gut Feeling versus Scientific Rationale

Helmut Rechberger & Stefani Rivić
TU Wien, Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement, Forschungsbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Zur Erreichung der ambitionierten Recyclingziele der Europäischen Union für Kunststoffverpackungen sind erhebliche Investitionen in Sammlung, Sortierung und Recycling erforderlich. Gleichzeitig haben die Marktverwerfungen während der COVID-19-Pandemie gezeigt, dass sinkende Rohölpreise und die damit verbundenen niedrigen Preise für Primärkunststoffe die Wettbewerbsfähigkeit von Rezyklaten stark beeinträchtigen können. Die Folgen waren überfüllte Zwischenlager, wirtschaftliche Belastungen der Recyclingbranche und Insolvenzen einzelner Unternehmen. Vor diesem Hintergrund fordert die Recyclingwirtschaft seit Jahren eine verpflichtende Mindestrezyklateinsatzquote, um eine stabile Nachfrage nach Rezyklaten sicherzustellen. Deren tatsächliche Wirksamkeit wurde bislang jedoch nur unzureichend untersucht. Im vorliegenden Beitrag wird ein integrierter Modellierungsansatz entwickelt, der eine Materialflussanalyse (MFA) des österreichischen Kunststoffverpackungssystems mit einem ökonomischen Gleichgewichtsmodell kombiniert. Dadurch lassen sich Stoffströme, Marktstrukturen, Preisbildungsmechanismen und regulatorische Rahmenbedingungen konsistent gemeinsam analysieren. Die mathematische Abbildung realer Marktmechanismen verdeutlicht dabei die hohe Systemkomplexität und den Bedarf an wissenschaftlich fundierter Regulierung. Das Modell wurde anhand empirischer Daten des österreichischen Kunststoffverpackungssystems kalibriert und validiert und ermöglicht die Analyse verschiedener Szenarien und politischer Maßnahmen. Die Ergebnisse reproduzieren reale Marktmechanismen mit hoher Genauigkeit. Gleichzeitig zeigen die Simulationen, dass eine verpflichtende Mindestrezyklateinsatzquote allein nicht ausreicht, um die angestrebten ökonomischen und ökologischen Ziele zu erreichen.

1 EINLEITUNG

Die Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe stellt eine der zentralen Herausforderungen der europäischen Ressourcen- und Umweltpolitik dar. Hintergrund sind einerseits die weiterhin steigende Produktion und der zunehmende Verbrauch von Kunststoffen (Statista, 2021), andererseits nach wie vor niedrige Recyclingquoten sowie die damit verbundenen Umweltbelastungen durch Kunststoffabfälle und Mikroplastik (Delphine Kawecki, 2018). Vor diesem Hintergrund verfolgt die Europäische Union das Ziel, den Materialkreislauf von Kunststoffen zu schließen und den Einsatz von Rezyklaten deutlich zu erhöhen ((EU), 2018). Neben verbindlichen Recyclingquoten werden hierfür zunehmend Mindestrezyklateinsatzquoten als politisches Instrument diskutiert.

Die praktische Umsetzung dieser Ziele gestaltet sich jedoch komplex. Das Kunststoffrecyclingsystem wird nicht ausschließlich durch gesetzliche Vorgaben bestimmt, sondern gleichzeitig durch ökonomische Rahmenbedingungen beeinflusst. Insbesondere die Entwicklungen während und nach der COVID-19-Pandemie haben gezeigt, wie empfindlich der Recyclingmarkt auf externe Schocks reagiert. Der starke Rückgang der Rohölpreise führte zu sinkenden Preisen für Primärkunststoffe und verringerte dadurch die Wettbewerbsfähigkeit von Rezyklaten erheblich. Gleichzeitig belasteten steigende Energiepreise und eine rückläufige Nachfrage nach Kunststoffprodukten die Recyclingwirtschaft zusätzlich (EUWID, 2023). Obwohl die gesetzlichen Recyclingziele weiterhin erfüllt werden mussten, verschlechterten sich die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Recyclingunternehmen deutlich.

Vor diesem Hintergrund wird vielfach argumentiert, dass verpflichtende Mindestrezyklateinsatzquoten die Nachfrage nach Rezyklaten stabilisieren und damit die Recyclingwirtschaft langfristig stärken könnten. Ob eine solche Maßnahme jedoch tatsächlich zu höheren Recyclingmengen und einer Verbesserung der Kreislaufwirtschaft führt, ist bislang nur unzureichend untersucht. Die Wechselwirkungen zwischen Materialströmen, Marktmechanismen und regulatorischen Vorgaben sind hochkomplex und lassen sich mit rein stoffstrombasierten oder ausschließlich ökonomischen Modellen nur eingeschränkt analysieren.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines integrierten Modellansatzes, der eine Materialflussanalyse des österreichischen Kunststoffverpackungssystems mit einem allgemeinen ökonomischen Gleichgewichtsmodell kombiniert. Dadurch werden physische Stoffströme, Marktstrukturen, Preisbildungsmechanismen sowie regulatorische Randbedingungen innerhalb eines gemeinsamen Modellrahmens abgebildet. Das Modell ermöglicht eine konsistente Analyse der Wechselwirkungen zwischen Recyclingwirtschaft, Kunststoffproduktion und politischen Instrumenten unter Berücksichtigung realer Materialflüsse.

2 METHODIK

Für die Entwicklung des Modells führen wir zunächst eine Materialflussanalyse *(MFA)* des österreichischen Kunststoffverpackungshaushalts aus. Diese integrieren wir in ein ökonomisches Gleichgewichtsmodell *(partial equilibrium model)*, indem wir ausgehend von der Materialflussanalyse die teilnehmenden Sektoren sowie die Märkte identifizieren.

Wir beginnen mit dem Haushaltssektor. Dieser konsumiert in erster Linie Güter und somit in zweiter Hand auch Kunststoffverpackungen, in beiden Fällen gehen wir von exogenen Zeitreihen aus. Die Effizienz, mit der die Kunststoffabfälle von den Haushalten gesammelt werden, ergibt sich aus den Sammelanstrengungen des Recyclingsektors und bestimmt die maximale Menge an Kunststoffabfällen, die dem Recyclingsektor zur Verfügung steht.

Im Recyclingsektor nehmen nur wenige Betriebe teil, wir finden hier somit einen oligopolistischen Markt vor. Jeder Betrieb übernimmt eine gewisse Menge an Abfällen vom Haushaltssektor und produziert daraus Rezyklate, die ihrerseits von den Kunststoffverpackungsherstellern nachgefragt werden. Die Produktionskosten der Recycler ergeben sich aus den Ressourcen, die sie in ihre Sammel- und Sortiereffizienz investieren sowie der Menge an Abfällen, die sie verarbeiten. Des Weiteren übernehmen die Recyclingbetriebe die Verantwortung für die Erfüllung eines staatlich vorgegebenen Recyclingziels. Im Gegenzug erhalten sie im Rahmen der erweiterten Produzentenverantwortung (EPR) Lizenzgebühren für die Verarbeitung des Abfalls von den Inverkehrbringern von Kunststoffverpackungen.

Letztere stellen den dritten Sektor dar. Dieser erzeugt aus Rezyklaten und Primärkunststoffen Kunststoffverpackungen, welche an Konsumgüterproduzenten verkauft werden. Dabei stehen die Kunststoffverpackungsproduzenten in einem vollkommenen Wettbewerbsverhältnis und optimieren dementsprechend ihre Profite. Der Anteil an Rezyklat, der verarbeitet wird, kann über eine Mindestrezyklateinsatzquote gesteuert werden. Den Kreis schließen die Konsumgüterproduzenten. Wie bereits erwähnt, entnehmen wir hier einer exogenen Zeitreihe Nachfrage und Angebot an den Haushaltssektor.

3 LÖSUNG UND KALIBRIERUNG

Die Lösung des Gesamtsystems erfolgt simultan über die Gleichgewichte auf dem Markt für Kunststoffverpackungen, dem Rezyklatmarkt sowie dem Markt für Kunststoffabfälle. Hierfür werden die Optimierungsprobleme aller Marktakteure miteinander verknüpft und so weit wie möglich analytisch, andernfalls numerisch gelöst. Die Implementierung erfolgte in der Programmiersprache Julia.

Für die Parametrisierung des Modells wurden die österreichischen Stoffströme des Jahres 2019 als Referenzsystem herangezogen. Verfügbare empirische Daten stammen aus veröffentlichten Materialflussanalysen sowie amtlichen Statistiken. Nicht öffentlich verfügbare Parameter, insbesondere Kostenparameter und Preisfunktionen, wurden im Rahmen einer numerischen Kalibrierung bestimmt. Ziel der Kalibrierung war es, die beobachteten Materialflüsse, Preise, Sammel- und Sortierquoten sowie Rezyklatanteile möglichst realitätsnah zu reproduzieren und gleichzeitig ein robustes Modellverhalten sicherzustellen.

Nach erfolgreicher Kalibrierung dient das Modell als Simulationswerkzeug zur Analyse verschiedener Szenarien. Im Mittelpunkt stehen dabei die Auswirkungen externer Marktveränderungen, insbesondere schwankender Primärkunststoffpreise, sowie die Einführung einer verpflichtenden Mindestrezyklateinsatzquote. Dadurch können politische Maßnahmen hinsichtlich ihrer ökonomischen und ökologischen Wirksamkeit innerhalb eines konsistenten analytischen Modellrahmens bewertet werden.

4 ERGEBNISSE

Ein Vergleich der Modellergebnisse mit Daten aus der Literatur zeigt, dass die wesentlichen Materialflüsse, Marktpreise sowie Sammel- und Recyclingraten des österreichischen Kunststoffverpackungssystems realitätsnah reproduziert werden können. Damit bildet das Modell eine geeignete Grundlage für die Analyse regulatorischer und ökonomischer Veränderungen.

Im Rahmen der Szenarioanalysen wurden zunächst die Auswirkungen des starken Rückgangs der Primärkunststoffpreise infolge der COVID-19-Pandemie untersucht. Die Simulationen reproduzieren die beobachteten Marktreaktionen qualitativ sehr gut. Insbesondere zeigen sich deutliche Preisrückgänge bei Primärkunststoffen und Rezyklaten, während die Recyclingmengen aufgrund der regulatorischen Vorgaben weitgehend konstant bleiben.

Darüber hinaus wurde die Einführung einer verpflichtenden Mindestrezyklateinsatzquote im Verpackungssektor analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass eine solche Maßnahme zwar die Nachfrage nach Rezyklaten seitens der Verpackungsproduzierenden erhöht, jedoch allein nicht ausreicht, um die angestrebte Stärkung der gesamten Recyclingwirtschaft oder eine deutliche Erhöhung der Recyclingleistung zu erreichen. Vielmehr verschieben sich Marktgleichgewichte, wodurch zusätzliche ökonomische Effekte entstehen, die bei der Ausgestaltung zukünftiger Regulierungsmaßnahmen berücksichtigt werden sollten.

Die Analysen verdeutlichen darüber hinaus, dass die Wirksamkeit politischer Maßnahmen maßgeblich von den zugrunde liegenden Marktstrukturen abhängt. Eine ausschließlich stoffstrom- oder abfallwirtschaftlich motivierte Bewertung greift daher zu kurz, wenn ökonomische Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Akteuren unberücksichtigt bleiben. Erst die gemeinsame Betrachtung physischer Materialflüsse und ökonomischer Anreizstrukturen ermöglicht eine belastbare Bewertung regulatorischer Eingriffe.

Insgesamt bestätigt die Anwendung des Modells, dass die Kombination aus Materialflussanalyse und allgemeinem Gleichgewichtsmodell geeignet ist, komplexe Wechselwirkungen zwischen Stoffströmen, Marktmechanismen und politischen Instrumenten konsistent abzubilden. Dadurch

können politische Maßnahmen bereits vor ihrer Umsetzung systematisch bewertet und hinsichtlich ihrer potenziellen Wirkungen analysiert werden.

5 SCHLUSSFOLGERUNG

Mit dem entwickelten Modell steht erstmals ein integrierter Modellierungsansatz zur Verfügung, der eine Materialflussanalyse mit einem allgemeinen ökonomischen Gleichgewichtsmodell für das österreichische Kunststoffverpackungssystem kombiniert. Dadurch können physische Stoffströme, Marktmechanismen und regulatorische Rahmenbedingungen innerhalb eines konsistenten analytischen Modells simultan und wechselwirkend betrachtet werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell die beobachteten Marktmechanismen und Materialflüsse realitätsnah abbildet und sich daher zur Bewertung politischer Maßnahmen eignet. Insbesondere wird deutlich, dass eine verpflichtende Mindestrezyklateinsatzquote allein nicht ausreicht, um die wirtschaftliche Situation der Recyclingbranche nachhaltig zu verbessern oder höhere Recyclingleistungen zu erzielen. Vielmehr verdeutlichen die Simulationen, dass der Erfolg regulatorischer Maßnahmen entscheidend von den zugrunde liegenden Marktstrukturen und ökonomischen Anreizmechanismen abhängt.

Die Arbeit zeigt damit, dass eine ausschließlich abfallwirtschaftliche Betrachtung für die Entwicklung wirksamer politischer Instrumente nicht ausreichend ist. Erst die Verknüpfung von Materialflussanalyse und ökonomischer Modellierung erlaubt es, sowohl physische als auch ökonomische Systemzusammenhänge zu berücksichtigen und politische Maßnahmen evidenzbasiert zu bewerten. Der vorgestellte Modellansatz stellt damit eine wissenschaftlich fundierte Entscheidungsgrundlage für die Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft dar. Detaillierte Informationen zur Modellstruktur, Parametrisierung sowie zu den durchgeführten Szenarioanalysen sind dem zugrunde liegenden Journalbeitrag zu entnehmen.

LITERATURVERZEICHNIS

(EU), D. (2018). DIRECTIVE (EU) 2018/852 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. *EU Directive* . Official Journal of the European Union 852.

A. Banerjee, J. J. (1993). Cointegration, Error Correction, and the Econometric Analysis of Non-Stationary Data. *Oxford University Press*.

Adrian Trapletti, K. H. (n.d.). Time Series Analysis and Computational Finance. R.

Delphine Kawecki, P. R. (2018). Probabilistic Material Flow Analysis of Seven Commodity Plastics in Europe. *Environmental Science & Technology*, pp. 9874–9888.

EUWID. (2023). Markt für PET: Aufkommen and Neuware und Rezyklaten übersteigt weiterhin Bedarfe. *EUWID*, p. 43.

Hyndman, R. a. (2008). Automatic time series forecasting: The forecast package for R. *Journal of Statistical Software*, 26(3).

Jinghan Di, B. K. (2021). United States plastics: Large flows, short lifetimes, and negligible recycling. *Resources, Conservation & Recycling*, p. 117.

Statista. (2021, Februar 5). *Weltweite und europäische Kunststoffproduktion in den Jahren von 1950 bis 2019.* Retrieved from Statista: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950/#statisticContainer

Abfallanalysen als Beitrag für kreislaufwirtschaftliche Strategien

Victoria Menedetter[1] & Christian Pladerer[1]
[1)] pulswerk GmbH, Kreislaufwirtschaft und Abfall, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Abfallanalysen sind ein zentrales Instrument der modernen Abfallwirtschaft und schaffen die Datengrundlage für fundierte Entscheidungen. Durch die systematische Untersuchung der stofflichen Zusammensetzung von Abfallströmen lassen sich Mengenanteile einzelner Fraktionen, Fehlwürfe sowie Verwertungs- und Optimierungspotenziale ermitteln. Die Ergebnisse unterstützen Gemeinden, Abfallverbände und Unternehmen bei der Bewertung und Weiterentwicklung von Sammel- und Verwertungssystemen sowie bei der Umsetzung von Maßnahmen im Sinne der Kreislaufwirtschaft. Voraussetzung für belastbare und vergleichbare Ergebnisse sind standardisierte Probenahme- und Sortierverfahren sowie eine qualitätsgesicherte Auswertung. pulswerk führt seit vielen Jahren normgerechte Abfallanalysen für unterschiedliche Abfallströme, von Restmüll und Altstoffsammlungen über Gewerbe- und Sperrmüll bis hin zu Littering-Abfällen, durch. Die Ergebnisse werden in strukturierter Form aufbereitet und im Rahmen einer Berichtslegung zur Verfügung gestellt und schaffen damit eine nachvollziehbare und belastbare Grundlage für strategische und operative Entscheidungen in der Abfallwirtschaft.

1 DATEN ALS SCHLÜSSEL ZUR KREISLAUFWIRTSCHAFT

Eine leistungsfähige Abfallwirtschaft basiert auf belastbaren Daten. Nur wenn bekannt ist, welche Materialien in welchen Mengen und Qualitäten in den unterschiedlichen Abfallströmen enthalten sind, können Sammelsysteme bewertet, Verwertungsströme optimiert und Ressourcen effizient genutzt werden. Abfallanalysen schaffen diese Datengrundlage. Sie ermöglichen einen objektiven Blick auf die tatsächliche Zusammensetzung von Abfällen und bilden damit die Basis für technische, organisatorische und strategische Entscheidungen.

Mit den steigenden Anforderungen an Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft gewinnt die Qualität dieser Informationen zunehmend an Bedeutung. Europäische und nationale Zielvorgaben fordern höhere Recyclingquoten, eine bessere Ausschöpfung von Sekundärrohstoffen und eine kontinuierliche Weiterentwicklung bestehender Sammel- und Verwertungssysteme. Ob diese Ziele erreicht werden können, lässt sich nur beurteilen, wenn die zugrunde liegenden Stoffströme bekannt sind. Abfallanalysen sind ein geeignetes Instrument, um diese Wissenslücken zu schließen.

In Österreich kommen Abfallanalysen sowohl im kommunalen als auch im gewerblichen Bereich zum Einsatz. Sie unterstützen Gemeinden, Abfallverbände, Unternehmen und Behörden bei der Optimierung von Sammelsystemen, der Erstellung von Abfallwirtschaftsplänen und der Umsetzung nationaler sowie europäischer Zielsetzungen im Bereich Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft.

2 VOM ABFALL ZUR INFORMATION

Abfälle sind keine homogene Masse. Selbst innerhalb derselben Sammelkategorie können Zusammensetzung und Qualität je nach Region, Siedlungsstruktur, Jahreszeit oder Nutzerverhalten erheblich variieren. Eine Restmüllprobe aus einem dicht besiedelten Stadtgebiet unterscheidet sich oftmals deutlich von jener einer ländlichen Gemeinde. Ebenso verändern sich Wertstoffanteile im Laufe der Zeit, etwa durch neue Verpackungssysteme, geändertes Konsumverhalten oder Informationskampagnen.

Abfallanalysen machen diese Unterschiede sichtbar. Sie zeigen, welche Stoffe tatsächlich im jeweiligen Abfallstrom enthalten sind, wie hoch der Anteil verwertbarer Materialien ist und wo Fehlwürfe oder Optimierungspotenziale bestehen. Damit liefern sie weit mehr als reine Mengenangaben: Sie schaffen Transparenz über Stoffströme und ermöglichen eine sachliche Bewertung bestehender Systeme.

Gerade in der kommunalen Abfallwirtschaft bilden diese Informationen häufig die Grundlage für weitreichende Entscheidungen. Ob Sammelsysteme angepasst, Behälterstandorte erweitert oder Informationsmaßnahmen entwickelt werden – fundierte Entscheidungen setzen belastbare Daten voraus.

3 VON DER PROBENAHME BIS ZUM ANALYSEBERICHT

Eine Abfallanalyse beginnt lange vor der eigentlichen Sortierung. Bereits in der Planungsphase werden Untersuchungsziel, Abfallstrom, Stichprobenumfang und erforderlicher Detaillierungsgrad festgelegt.

Anschließend erfolgt die Probenahme nach definierten Verfahren, um sicherzustellen, dass die ausgewählten Proben den untersuchten Abfallstrom möglichst repräsentativ abbilden. Je nach Fragestellung können Proben direkt aus Sammelfahrzeugen, Sammelbehältern oder Abfallhaufen entnommen werden.

Im Sortierprozess werden die Proben manuell in zuvor definierte Abfallfraktionen getrennt und einzeln verwogen. Die Einteilung orientiert sich an standardisierten Sortierkatalogen, kann jedoch projektspezifisch erweitert oder angepasst werden.

Im Anschluss werden sämtliche Messergebnisse statistisch ausgewertet. Neben Mittelwerten werden Streuungen und Konfidenzintervalle berücksichtigt, um die Aussagekraft der Ergebnisse beurteilen zu können. Gleichzeitig erfolgt eine Plausibilitätskontrolle der Massenbilanz, wodurch eine hohe Datenqualität sichergestellt wird. Österreichische Leitfäden fordert beispielsweise, dass die Summe der Fraktionsmassen nur geringfügig von der Gesamtprobenmasse abweichen darf. Um dies gewährleisten zu können, werden in den meisten Fällen bereits bei der Sortierung Kontrollmechanismen eingebaut.

Standardisierte Vorgehensweisen sind dabei weit mehr als eine formale Anforderung. Sie gewährleisten, dass Ergebnisse über mehrere Jahre hinweg vergleichbar bleiben und Entwicklungen zuverlässig bewertet werden können. Insbesondere Daten, die über viele Jahre hinweg erhoben werden, gewinnen angesichts sich verändernder gesetzlicher Anforderungen und technischer Entwicklungen zunehmend an Bedeutung.

4 VON DER ANALYSE ZUR OPTIMIERUNG

Der eigentliche Wert einer Abfallanalyse liegt nicht in der Datenerhebung selbst, sondern in der Interpretation der Ergebnisse. Erst aus der fachlichen Einordnung entstehen konkrete Handlungsmöglichkeiten.

So können hohe Anteile organischer Abfälle im Restmüll auf Verbesserungsbedarf bei der Bioabfallsammlung hinweisen. Auffällige Mengen an Verpackungen können Anlass sein, Sammelsysteme oder Informationsangebote zu überprüfen. Fehlwürfe in Altstoffsammlungen wiederum beeinflussen unmittelbar die Qualität der erfassten Wertstoffe und damit deren weitere Verwertung.

Die Ergebnisse liefern damit eine objektive Grundlage für zahlreiche Fragestellungen:

- Wie effizient funktioniert das bestehende Sammelsystem?
- Welche Wertstoffe gehen derzeit für das Recycling verloren?
- Wo bestehen Fehlwürfe oder Qualitätsprobleme?
- Welche Maßnahmen versprechen den größten Nutzen?
- Welche Entwicklungen lassen sich über mehrere Jahre beobachten?

Abfallanalysen ersetzen dabei keine politischen oder organisatorischen Entscheidungen. Sie schaffen jedoch die notwendige Faktenbasis, auf der diese Entscheidungen nachvollziehbar getroffen werden können.

5 ANWENDUNGSFELDER IN DER PRAXIS

Die Einsatzmöglichkeiten von Abfallanalysen sind vielfältig. Einen Schwerpunkt bilden Untersuchungen von Restmüll, bei denen insbesondere das verbleibende Potenzial an getrennt erfassbaren Wertstoffen und Bioabfällen untersucht wird. Die Ergebnisse zeigen häufig, welche Stoffgruppen trotz bestehender Sammelsysteme weiterhin im Restmüll landen und welche Maßnahmen zur Verbesserung der getrennten Sammlung sinnvoll sein können.

Ebenso wichtig sind Analysen getrennt gesammelter Altstoffe. Hier steht weniger die Quantität als vielmehr die Qualität der Sammlung im Mittelpunkt. Verunreinigungen oder Fehlwürfe können den Recyclingprozess erheblich beeinträchtigen und zusätzliche Aufbereitungsschritte erforderlich machen. Regelmäßige Qualitätskontrollen unterstützen daher sowohl Kommunen als auch Entsorgungsunternehmen bei der kontinuierlichen Verbesserung ihrer Sammelsysteme.

Auch Gewerbeabfälle, Sperrmüll oder achtlos im öffentlichen Raum entsorgte Abfälle („Littering“) werden untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen unter anderem der Planung geeigneter Verwertungsströme, der Optimierung betrieblicher Stoffstromkonzepte oder der Entwicklung kommunaler Maßnahmen gegen Littering.

6 EINHEITLICHE STANDARDS SCHAFFEN VERTRAUEN

Damit Ergebnisse unterschiedlicher Untersuchungen miteinander vergleichbar sind, kommt standardisierten Verfahren eine zentrale Bedeutung zu. In Österreich bilden insbesondere die ÖNORM-Serie S 2097 für Sortieranalysen sowie die ÖNORM S 2127 zur Probenahme und grundlegenden Charakterisierung von Abfällen den methodischen Rahmen. Ergänzende Leitfäden konkretisieren diese Vorgaben für unterschiedliche Anwendungsbereiche und tragen dazu bei, dass Untersuchungen nach einheitlichen Qualitätsstandards durchgeführt werden.

Diese Standardisierung schafft Vertrauen in die Ergebnisse. Auftraggeber erhalten belastbare Daten, die auch Jahre später noch mit neuen Untersuchungen verglichen werden können. Gleichzeitig ermöglicht sie eine einheitliche Interpretation der Ergebnisse über unterschiedliche Regionen und Projekte hinweg.

7 ERFAHRUNG VERBINDET METHODIK UND PRAXIS

pulswerk begleitet seit vielen Jahren öffentliche Auftraggeber, Abfallverbände und Unternehmen bei der Planung und Durchführung von Abfallanalysen. Das Spektrum reicht von Restmüll- und Altstoffanalysen über Untersuchungen von Gewerbe- und Sperrmüll bis hin zu Analysen von Littering-Abfällen. Je nach Fragestellung werden Untersuchungsumfang, Fraktionskatalog und Auswertung an die jeweiligen Anforderungen angepasst.

Die Ergebnisse werden in strukturierter Form aufbereitet und als Datengrundlage im Rahmen der Berichtslegung zur Verfügung gestellt. Diese bildet die Basis für weiterführende Bewertungen und Entscheidungsprozesse durch die jeweiligen Auftraggeber oder zuständigen Stellen, etwa im Kontext der Systemplanung, Abfallwirtschaftsplanung oder Maßnahmenentwicklung.

8 AUSBLICK

Die Bedeutung von Abfallanalysen wird in den kommenden Jahren weiter zunehmen. Mit steigenden Anforderungen an Recycling, Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft wächst auch der Bedarf an belastbaren Daten über die Zusammensetzung von Abfallströmen. Gleichzeitig eröffnen digitale Datenerfassung, automatisierte Sortiertechnologien und datenbasierte Auswertungsmethoden neue Möglichkeiten, Stoffströme zu erfassen und Entwicklungen frühzeitig zu erkennen.

Unabhängig von technischen Innovationen bleibt jedoch eine Erkenntnis bestehen: Eine zukunftsfähige Abfallwirtschaft benötigt fundierte Informationen als Grundlage ihres Handelns. Abfallanalysen schaffen diese Grundlage – systematisch, nachvollziehbar und praxisorientiert. Sie verbinden methodische Qualität mit konkretem Nutzen und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung einer ressourcenschonenden und kreislauforientierten Abfallwirtschaft.

KONTAKT

Victoria Menedetter, BSc.
menedetter@pulswerk.at
+43 699 15 23 61 16
Kreislaufwirtschaft und Abfall
pulswerk GmbH
www.pulswerk.at

Österreichische Carbon Management Strategie

Markus Lehner
Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Die bereits 2024 veröffentlichte „Österreichische Carbon Management Strategie“ zielt darauf ab, einen Handlungsrahmen für nicht vermeidbare Treibhausgasemissionen zu entwickeln, um das Netto-Null-Ziel zu erreichen. Für die einzelnen Optionen zur Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung bestehen unterschiedliche Entwicklungsgrade und Herausforderungen. Allen gemeinsam ist, dass für eine Implementierung dringend ein regulatorischer Rahmen geschaffen werden muss. Darüber hinaus bedarf es zielgerichteter F&E-Aktivitäten sowie staatlicher Anreize und Anschubfinanzierung, um die klimapolitisch notwendige Umsetzung in den nächsten Jahren auf den Weg zu bringen.

1 EINLEITUNG

Das europäische Klimagesetz (European Commission 2020) verpflichtet die Mitgliedstaaten, die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu reduzieren und bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen. Darauf basierend skizzieren die nationalen Energie- und Klimapläne (NEKP) die jeweiligen Strategien zur Erreichung dieser Ziele. Der österreichische NEKP (BMK 2024) priorisiert Emissionsreduktions- und Energieeffizienzmaßnahmen und beinhaltet das ambitionierte Ziel, bis 2040 Netto-Null-Emissionen zu erreichen. Ein progressives Berechnungsszenario prognostiziert jedoch rund 14,8 Mio. Tonnen $CO_{2,eq}$ sogenannter „schwer zu reduzierender“ Emissionen, die hauptsächlich aufgrund technologischer und prozessbedingter Einschränkungen im Industrie- und Energiesektor fortbestehen (Hochmeister 2024). Andere Quellen (BMF 2024) sind etwas optimistischer, errechnen aber immer noch rund 11 Mio. Tonnen $CO_{2,eq}$ für 2040 (Tab. 1). Daher wird der Einsatz von Technologien zur Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung (CCUS) zur Erreichung des Netto-Null-Zieles vorgeschlagen. Diese Strategie wurde im Jahr 2024 als „Österreichische Carbon Management Strategie“ von der Bundesregierung veröffentlicht (BMF 2024). Darin wird ein Aktionsplan entworfen, der in einer ersten Phase die Schaffung des grundlegenden rechtlichen Rahmens vorsieht und darauf aufbauend in einer zweiten Phase den Infrastrukturaufbau und die Maßnahmenumsetzung. Nachfolgend wird zunächst auf die zu erwartende Entwicklung der Treibhausgasemissionen eingegangen. Darauf aufbauend werden die in der Carbon Management Strategie ausgeführten Optionen im Bereich CCUS vorgestellt, wobei besonders die Rahmenbedingungen und die jeweiligen Herausforderungen diskutiert werden.

2 ENTWICKLUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN NACH SZENARIEN

In Abb. 1 ist die bisherige und zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Österreich nach verschiedenen Szenarien dargestellt. Zunächst ist erkennbar, dass die Treibhausgasemissionen in Österreich ab 2005 einen fallenden Trend aufweisen. Es wird aber auch deutlich, dass selbst unter dem anspruchsvollsten Szenario „Transition 2023“ die Nulllinie bis 2040 nicht erreicht werden kann, wobei in diesem Szenario zudem noch der Gradient der Emissionsreduktion deutlich erhöht ist, was erhebliche - zu bestehenden zusätzliche - Maßnahmen erfordern würde. Tab. 1 zeigt, dass ab 2040 die Emissionen aus der Industrie und aus nicht-industriellen Sektoren sich in etwa die Waage halten, wobei der landwirtschaftliche Sektor größter Emittent im nicht-industriellen Bereich sein wird, dessen Treibhausgasfreisetzung nur durch negative Emissionen ausgeglichen werden kann.

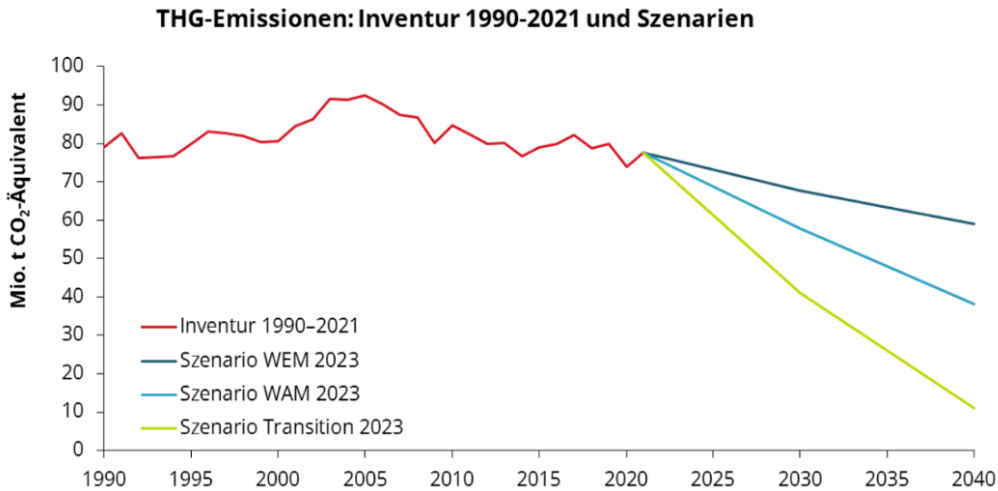


Abb. 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Österreich nach verschiedenen Szenarien (BMK 2024)

Tab. 1: Abschätzung der verbleibenden, schwer-zu-vermeidenden Emission bis 2050 nach Sektoren (BMF 2024)

Mt CO_2-eq	OLI 2024	Transition 2023	Transition 2023
	2022	2040	2050
non-Industry	**39,5**	**5,7**	**5,0**
Mobility	20,7	0,1	0,0
Buildings	7,4	0,2	0,1
Agriculture, energetic	0,9	0,1	0,1
Agriculture, non-energetic	7,3	4,2	3,7
Fluorinated Gases	1,4	0,2	0,1
Waste Management without combustion	1,2	0,8	0,7
Other Emissions	0,6	0,2	0,2
Industry	**33,3**	**5,3**	**4,4**

3 CARBON MANAGEMENT MASSNAHMEN

Die möglichen Maßnahmen im Bereich des Carbon Management können unterteilt werden in CO_2-Entnahme, -Nutzung und -Speicherung.

3.1 CO_2-Entnahme: Carbon Dioxide Removal (CDR)

Der IPCC definiert CO_2-Entnahme (CDR) als „anthropogene Aktivitäten, die CO_2 aus der Atmosphäre entfernen und es dauerhaft in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Ablagerungen oder in Produkten speichern“ (Pathak, M. 2022). Dabei wird zwischen „technischer“ (tCDR) und „natürlicher“ (nCDR) CO_2-Entnahme unterschieden. Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS), Bioenergy and Carbon Capture and Storage (BECCS), beschleunigte Verwitterung, technische Mineralkarbonisierung sowie Biokohle zählen zu den technischen Optionen. Sie erzeugen negative Emissionen, wenn das CO_2 aus der Luft entnommen wird, was bei allen angeführten Optionen der Fall ist außer bei der technischen Mineralkarbonisierung, bei der auch CO_2

aus industriellen Prozessen verwendet werden kann. (Schinnerl, 2024) Zur natürlichen CO_2-Entnahme gehören die Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung in Landnutzungs- und Forstflächen (Feucht- und Torfgebiete, Wälder) sowie die Aufforstung. Intakte Ökosysteme erfüllen vielfältige Funktionen, darunter die Kohlenstoffspeicherung. Im Bereich von nCDR ist das übergeordnete Ziel die Stärkung der Resilienz von Ökosystemen, sodass diese als Kohlenstoffsenke fungieren können. Ab 2026 gilt für Österreich ein linearer Zielpfad, der bis 2030 zu einer Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung im Bereich Landnutzung und Forstwirtschaft (LULUCF) um rund 880.000 t CO_2-Äquivalent gegenüber 2016–2018 führen soll (LULUCF-Verordnung) (European Commission, 2018). Mit dem Fortschreiten des Klimawandels entstehen erhebliche Risiken für natürliche Kohlenstoffsenken. Um diese Risiken im Rahmen einer nachhaltigen Land- und Forstwirtschaft zu minimieren, liegt der Fokus auf der Optimierung der Kohlenstoffaufnahme durch Resilienz fördernde Maßnahmen.

Die Schaffung des notwendigen (inter-)nationalen Regulierungs- und Rechtsrahmens zur Sicherstellung der Lagerkapazität von CDR-Aktivitäten ist eine notwendige Grundlage für die Entwicklung und Anwendung von CDR, wobei die Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der verschiedenen CDR-Technologien entscheidend ist für die Optimierung ihrer Entwicklung und zukünftigen Nutzung. Mögliche Bewertungsdimensionen sind dabei die Lagerkapazität, der technologischer Reifegrad (TRL), die Skalierbarkeit, die aktuellen und zukünftigen Kosten, sowie die allgemeinen Umweltauswirkungen und der Platzbedarf. Die Herausforderungen im Bereich CDR sind allerdings derzeit noch enorm: Für die einzelnen CDR-Optionen bestehen erhebliche Unterschiede hinsichtlich des technologischen Reifegrads (TRL), der aktuellen und zukünftigen Kosten, des erforderlichen Energieverbrauchs und des Platzbedarfs. Daher ist weitere Forschung dringend erforderlich, um das Potenzial der einzelnen Technologien zur Erzeugung negativer Emissionen in Österreich und ihren möglichen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele genauer bewerten zu können.

3.2 CO_2-Abscheidung, Transport und Nutzung (CCU)

CCU bezeichnet eine Kette von Technologien zur Reduzierung von CO_2-Emissionen durch die Abscheidung von CO_2 und dessen Nutzung – üblicherweise in hoher Konzentration – zur Herstellung von Produkten in chemischen und biotechnologischen Prozessen. (Lehner, 2021) Innovation, Forschung und Lernkurven sowie Skaleneffekte sind für die Weiterentwicklung von CO_2-Abscheidungstechnologien von zentraler Bedeutung. Darüber hinaus muss ein nationales Pipelinesystem die verschiedenen großen Industrieanlagen (Punktquellen) mit geologischen Speichern oder anderen Abnehmern/Nutzern von CO_2 verbinden. Zur Bewertung der Klimarelevanz der CO_2-Nutzung sollte ein standardisiertes Bewertungsverfahren entwickelt werden, was eines der großen Herausforderungen neben der noch fehlenden Anrechnung im EU-ETS System ist. Ein koordinierter, zeitnaher Auf- und Ausbau der Infrastruktur zur CO_2-Abscheidung und zum CO_2-Transport sind sowohl für CCU als auch für CCS unabdingbare Voraussetzung für die Implementierung dieser Technologien. In diesem Zusammenhang fehlen noch völlig die regulatorischen Vorgaben hinsichtlich Finanzierung, Betrieb und Haftung. Zusätzlich ist bei CCU der hohe zusätzliche Energiebedarf für die Prozesse der CO_2-Abscheidung, des Transports und der Nutzung nicht außer Acht zu lassen, sowohl hinsichtlich der Verfügbarkeit als auch hinsichtlich der damit verbundenen Kosten. (Lehner 2024)

3.3 Geologische CO_2-Speicherung (CCS)

Für die geologische Speicherung von CO_2 bestehen folgende Optionen für Österreich: inländische Kohlenwasserstofffelder, inländische Salzwasseraquifere, sowie Speicherstandorte in anderen europäischen Ländern. Während die Kohlenwasserstofffelder, wie ausgebeutete Erdgaslagestätten, gut exploriert sind, ist das für Salzwasseraquifere nicht der Fall. Die Nutzung dieser Speicheroption wäre in Österreich mittelfristig zwischen 2030 und 2040 möglich. Für die Nutzung von anderen europäischen Standorten, aber auch für die inländische Speicherung, ist, wie in 3.2

bereits ausgeführt, ein Transportnetz in Form von CO_2-Pipelines unabdingbar. Darüber hinaus ist die Aufhebung des derzeit geltenden Bundesgesetzes, das die geologische Speicherung von Kohlendioxid verbietet, notwendig als auch die vollständige Umsetzung der EU-CCS-Richtlinie in nationales Recht. Darüber hinaus wird das Problem der konkurrierenden Nutzung des geologischen Untergrunds für Geothermie, Speicherung von CO_2 sowie grünem Wasserstoff, aber auch von synthetischem Methan, diskutiert.

4 NOTWENDIGE SCHRITTE FÜR DIE UMSETZUNG

Zunächst ist die Schaffung des rechtlichen Rahmens notwendig: Aufhebung des Verbots der geologischen CO_2-Speicherung in Österreich und Schaffung des notwendigen Rechtsrahmens für die geologische CO_2-Speicherung, Bewertung und Anpassung der Rechtslage für den CO_2-Transport per Pipeline, weitere rechtliche (begleitende) Maßnahmen und Reformschritte entlang der gesamten CCUS/tCDR-Kette sowie eine Verbesserung der internationalen Zusammenarbeit und Koordination sowie Weiterentwicklung der technischen Grundlagen und des rechtlichen, wirtschaftlichen und politischen Rahmens. Weiters sind die notwendigen Infrastrukturmaßnahmen voranzutreiben durch Schaffung einer wissenschaftlich fundierten, ganzheitlichen, Szenario gestützten und zeitlich differenzierten Planungsgrundlage, die alle relevanten Teilbereiche für den nationalen und grenzüberschreitenden Ausbau der notwendigen CCUS/tCDR-Infrastruktur und deren Betrieb abdeckt.

LITERATURVERZEICHNIS

BMK (2024) Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich

BMF (2024) Bundesministerium Finanzen, Carbon Management Strategie – Ein Beitrag für eine kosteneffektive Erreichung der Klimaziele www.bmf.gv.at/themen/klimapolitik/carbon_management.html

European Commission (2020), Directorate-General for Communication, The European Climate Law, Publications Office of the European Union https, 2020. https://doi. org/10.2775/790913.

European Commission (2018), Verordnung 2018/841 des Euro. Parlaments und des Rates vom 30.05.2018 über die Einbeziehung der Emissionen und des Abbaus von Treibhaus-gasen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0841&from= de

Hochmeister S., Kühberger L.,Kulich J., Ott H., Kienberger T. (2024) A methodology for the determination of future carbon management strategies: a case study of Austria, Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag 41, 108–124, https://doi.org/10.54337/ ijsepm.8280.

Lehner M. (2021). *Carbon Capture and Utilization - Factsheet Nr. 32.* Graz und Wien: CCCA.

Lehner M. (2024) CO2 Recycling. In: R. Pomberger et al. (Eds) Recy&DepoTech 2024 Vorträge Konferenzband, Leoben, 2024, pp 81-84.

Pathak M., S. R.-M.-V. (2022). *Technical Summary. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Schinnerl F., Sattler T., Noori-Khadjav G., Lehner M. (2024) Direct aqueous mineral carbonation of secondary materials for carbon dioxide storage. Journal of CO2 Utilization 88 (2024) 102942 https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102942

Erschließung neuer Verwertungspfade für mineralische Reststoffe als CO_2-Senke durch wässrige Karbonatisierung

Sarah Reiter[1], Sophie Zotter[1], Leo Buchegger[1] & Markus Lehner[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Karbonatisierung ermöglicht die dauerhafte Bindung von CO_2 in stabilen Karbonatphasen und eröffnet gleichzeitig neue Nutzungsperspektiven für mineralische Reststoffe. Im Rahmen dieses Beitrags werden Rostasche aus der thermischen Abfallverwertung, Magnesia-Kohlenstoff-haltiger Feuerfestofenbruch und Bypasstaub aus der Zementproduktion hinsichtlich ihrer CO_2-Aufnahme durch wässrige Karbonatisierung untersucht. Die Ergebnisse zeigen deutliche materialabhängige Unterschiede: Bypasstaub erreicht aufgrund seiner hohen Reaktivität CO_2-Aufnahmen von bis zu 270 kg CO_2 t^{-1} Rohmaterial. Das Feuerfestmaterial zeigt eine deutliche temperaturabhängige Steigerung der Aufnahme infolge der kinetisch limitierten Magnesiumkarbonatisierung, während Rostasche ein Bindungspotenzial von 80 kg t^{-1} aufweist. Bezogen auf das jährliche Aufkommen dieser drei Materialien in Österreich ergibt sich daraus ein kumulatives Speichervolumen von 57 kt CO_2, wodurch Karbonatisierung dieser Reststoffe als ergänzender Baustein innerhalb zukünftiger Carbon-Management-Strategien bewertet werden kann.

1 MINERALISCHE RESTSTOFFE ALS CO_2-SENKE

Mineralische Karbonatisierung beschreibt die Reaktion von primär calcium- und magnesiumhaltigen Mineralphasen mit CO_2 zu stabilen Karbonaten, wodurch eine dauerhafte CO_2-Bindung ermöglicht wird. Neben natürlichen Silikatgesteinen, wie beispielsweise Serpentinit, stellen industrielle Reststoffe bedeutende Quellen für calcium- und magnesiumhaltige Mineralphasen dar (Schinnerl et al. 2024; Sanna et al. 2014). Darunter fallen auch Stoffströme aus *hard-to-abate*-Sektoren, beispielsweise Reststoffe aus der Zement- und Feuerfestindustrie oder Aschen aus der thermischen Abfallbehandlung, deren prozessbedingten bzw. energetischen CO_2-Emissionen auch mittel- und langfristig als unvermeidbar gelten (BMK 2024). Aus diesem Grund wird Karbonatisierung zunehmend als ergänzende Option innerhalb von Carbon Capture, Utilization und Storage (CCUS)-Strategien untersucht

Zur Bewertung der Integration von Karbonatisierung in Carbon-Management-Strategien werden im Projekt „DeCarbStore“ geeignete Materialströme auf deren CO_2 Speicherkapazität untersucht. Die im Rahmen des Projektes identifizierten Mengenpotenziale sind in Abbildung 1 für Österreich dargestellt. Sie basieren für Sekundärmaterialien auf Abfallwirtschaftsplänen, Industrieangaben und Literaturdaten, während für Serpentinit aktuelle Abbauzahlen als technisch mögliches Potenzial herangezogen werden. Ein Großteil dieser Materialströme wird jedoch bereits etablierten Verwertungsrouten zugeführt. Dennoch sind besonders Rostaschen aus Müllverbrennungsanlagen (MVA) mit einem jährlichen Aufkommen von etwa 404 kt und Bypassstäube aus der Zementproduktion mit 58 kt noch unvollständig in Nutzungskreisläufe integriert. Auch feuerfester Ofenbruch aus Stahlkonvertern weist trotz bestehender Recyclingansätzen einen Deponieanteil von etwa 50 % auf, das 23 kt jährlich entspricht (Feucht et al. 2025).

Zur Erschließung dieser Senken ist direkte wässrige Karbonatisierung eine vielversprechende Prozessroute. Durch die Suspension des Materials in Wasser wird injiziertes CO_2 in der wässrigen Suspension gelöst. Gleichzeitig wird die Freisetzung von Calcium- und Magnesiumionen aus der Feststoffmatrix begünstigt. Die gezielte Anpassung von Temperatur und CO_2-Partialdruck erlaubt eine Steuerung der Reaktionskinetik, wodurch höhere Umsatzraten gegenüber Gas-

Feststoff-Verfahren ermöglicht werden. Dies trägt zu einer effizienten Überführung von CO_2 in Karbonatphasen bei.

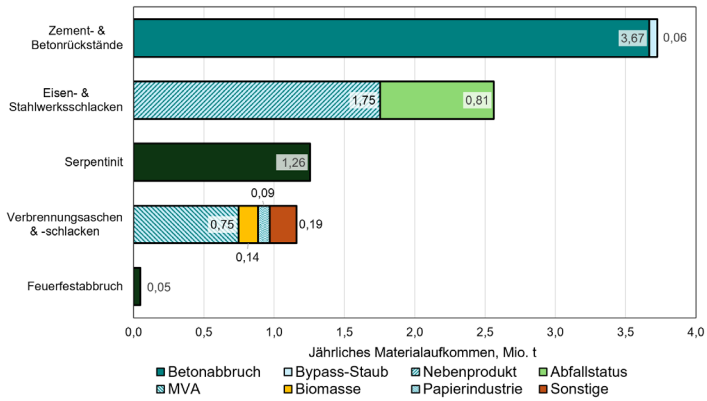


Abb. 1: Jährliches Aufkommen karbonatisierbarer Stoffgruppen und Materialströme in Österreich in Mio. t

2 ZIEL DES BEITRAGS

Aufgrund ihrer Verfügbarkeit und der geringen Nutzungskonkurrenz, werden im Rahmen dieses Beitrags drei industrielle Reststoffe hinsichtlich ihres Potenzials zur CO_2-Bindung durch wässrige Karbonatisierung untersucht: Rostasche aus der thermischen Abfallverwertung (MVA-RA), feuerfester Ofenbruch aus Stahlkonvertern (FF-OB) und Bypassstaub (BPS). In Tabelle 1 sind die Prozessparameter für die Untersuchung der Materialien im Labormaßstab dargestellt.

Tab. 1: Übersicht der untersuchten Prozessparameter der wässrigen Karbonatisierung

Exp. Nr.	CO_2-Partialdruck, bar	Temperatur, °C
1	5	20
2	20	
3		100

3 METHODIK

Die Proben MVA-RA und FF-OB werden gebrochen und gemahlen, wobei die 90-125 µm Fraktion angelehnt an frühere Arbeiten (Schinnerl et al. 2024) für die experimentellen Untersuchung verwendet wird. Aufgrund der natürlich vorkommenden, feinen Korngröße von BPS wird hierfür die Fraktion <125 µm eingesetzt. Alle Proben werden vor der Versuchsdurchführung bei 105 °C für mindestens 2 h getrocknet.

Die Karbonatisierungsexperimente werden in einem gerührten 300-mL-Batchreaktor (Parr Instruments) durchgeführt. Hierzu werden jeweils 9 g Feststoff in 100 mL deionisiertem Wasser suspendiert und in den Reaktor eingebracht. Für Experiment Nr. 3 wird dieser mittels elektrischen Heizmantel auf 100 °C temperiert. Im Anschluss wird CO_2 (Reinheit ≥99,9 %) bis zum Erreichen des gewünschten Betriebsdrucks (5 bzw. 20 ± 0,5 bar) injiziert und während der gesamten Reaktionszeit von 2 h konstant gehalten.

Nach Versuchsabschluss wird der Feststoff abfiltriert (Faltenfilter, Rückhaltebereich 5-13 µm), bei 105 °C für 24 h getrocknet und anschließend zusätzlich zum Ausgangsmaterial mit thermogravimetrischer Analyse mit simultaner Differenzkalorimetrie (TGA/DSC) und gekoppelter FTIR-Gasanalyse sowie Gesamtkohlenstoffanalyse (Total Carbon Analysis, TCA) und Röntgendiffraktometrie (RDA) charakterisiert.

Die CO_2-Aufnahme in kg CO_2 pro Tonne Rohmaterial wird gemäß Formel (1) berechnet, wobei sich CO_{2Roh} auf den CO_2-Gehalt des unbehandelten Ausgangsmaterials bezieht und CO_{2Karb} der

CO_2-Konzentration nach der Karbonatisierung entspricht. Die Berechnung berücksichtigt die Massenveränderung des Rohmaterials während der Karbonatisierung, wobei angenommen wird, dass die mineralische Ausgangsmatrix als inerter Feststoff erhalten bleibt und sich die Massenänderung nach der Reaktion ausschließlich durch die CO_2-Aufnahme, Änderungen des Feuchtegehalts bzw. des strukturell gebunden Wassers sowie – beim Bypassstaub – durch die Löslichkeit von Sylvin (KCl) ergibt.
Das theoretische Potenzial U_{th} errechnet sich nach Formel (2) (Huntzinger et al. 2009) und beschreibt die maximale theoretische CO_2-Aufnahme bei vollständiger Umsetzung aller calcium- und magnesiumhaltiger Phasen zu Karbonaten, abzüglich bereits vorhandener Karbonatphasen. Die erforderliche Zusammensetzung wird durch Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) der Rohprobe bestimmt. Schließlich errechnet sich die Karbonatisierungseffizienz (CE) als prozentuelles Verhältnis der experimentellen zur theoretischen CO_2-Aufnahme (Formel (3)).

$$\text{CO}_2\text{-Aufnahme (kg t}^{-1}) = \frac{\text{CO}_{2_{Karb}}(\%) - \text{CO}_{2_{Roh}}(\%)}{100 - \text{CO}_{2_{Karb}}(\%)} \times \frac{1000\ (\text{kg t}^{-1})}{100\ (\%)} \quad (1)$$

$$U_{th}\ (\text{kg t}^{-1}) = [0{,}785 \times (\text{CaO}(\%) - 0{,}56 \times \text{CaCO}_3(\%)) + 1{,}091 \times (\text{MgO}(\%) - 0{,}48 \times \text{MgCO}_3(\%))] \times \frac{1000\ (\text{kg t}^{-1})}{100\ (\%)} \quad (2)$$

$$\text{CE}\ (\%) = \frac{\text{CO}_2\text{-Aufnahme}\ (\text{kg t}^{-1})}{U_{th}\ (\text{kg t}^{-1})} \times 100(\%) \quad (3)$$

4 ERGEBNISSE

Für die Proben errechnet sich eine theoretische CO_2-Aufnahme von 160 kg t^{-1} für MVA-RA, 734 kg t^{-1} für FF-OB und 288 kg t^{-1} für BPS. MVA-RA zeichnet sich durch eine heterogene Matrix mit verschiedenen Silikatphasen und einem hohen Anteil amorpher Bestandteile aus. FF-OB ist vor allem durch Magnesia (MgO), sowie enthaltenen Kohlenstoff geprägt, der während der Herstellung als Binderkomponente eingesetzt wird. BPS weist hingegen einen hohen Anteil calciumhaltiger Phasen wie CaO, C_2S oder $Ca(OH)_2$ auf und enthält zudem relevante Mengen an Sylvin. Aufgrund dieser unterschiedlichen Mineralogie zeigen die experimentellen Ergebnisse in Abbildung 2 deutliche materialabhängige Unterschiede im Karbonatisierungverhalten auf.

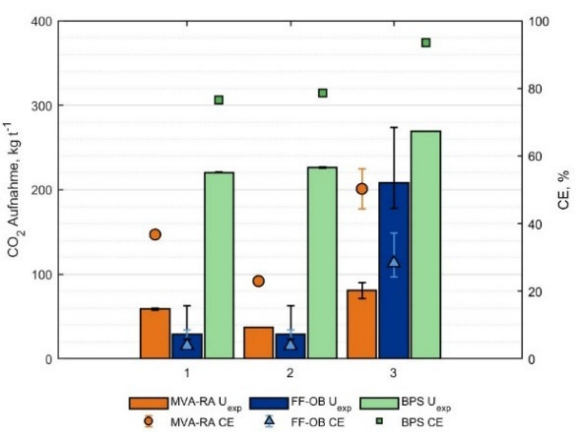


Abb. 2: CO_2-Aufnahme in kg CO_2 t^{-1} Rohmaterial und CE in % der untersuchten Materialien über die drei Versuchsbedingungen

Für BPS wird aufgrund des hohen Anteils an reaktiven Phasen bereits bei den mildesten Bedingungen von Experiment Nr. 1 eine CE von 80 % erreicht. Die höchste CO_2-Aufnahme von 270 kg t^{-1} entspricht einer Karbonatisierungseffizienz von rund 94 %. Aufgrund der hohen Reaktivität ist Bypasstaub potenziell auch für alternative Prozessführungen, beispielsweise trockene Karbonatisierung, von Interesse. Dies würde eine Prozesswasserbehandlung aufgrund der Löslichkeit von Bestandteilen wie Sylvin aus der Probe vermeiden. Das Feuerfestmaterial FF-OB zeigt eine deutliche Temperaturabhängigkeit der CO_2-Aufnahme. Die Steigerung von 30 auf 208 kg t^{-1} bei Erhöhung der Temperatur auf 100°C ist auf die kinetisch limitierte Magnesiumkarbonatisierung bei Raumtemperatur zurückzuführen (Hänchen et al. 2008). Durch weitere Erhöhung der Reaktionstemperatur ist eine zusätzliche Steigerung der CO_2-Aufnahme zu erwarten (Schinnerl et al. 2024). Die hohe Streuung der Werte ist auf den im Material enthaltenen Kohlenstoffbinder zurückzuführen. Für Rostasche ist die Vorhersage der Reaktivität aufgrund der komplexen, ausgeprägten amorphen Struktur begrenzt (Sakita und Nishimura 2016). Dennoch zeigt das Material ein relevantes Karbonatisierungspotenzial von 80 kg t^{-1}.

5 SYSTEMISCHE RELEVANZ VON KARBONATISIERUNG

Bezogen auf die verfügbaren Materialströme ergibt sich aus diesen Ergebnissen ein jährliches Speichervolumen von rund 16 kt für den Bypassstaub. Für das Feuerfestmaterial beträgt das Potenzial bei den untersuchten Bedingungen 5 kt, bei einer durch höhere Prozesstemperaturen realistisch erreichbaren CE von 50 % könnte dieses auf 9 kt erhöht werden. Für Rostasche ergibt sich rechnerisch eine Kapazität von etwa 32 kt, dies dient aufgrund der hohen stofflichen Heterogenität der Matrix jedoch als Abschätzung. Daraus errechnet sich für diese Materialströme ein kumulatives technisches Speicherpotenzial von 57 kt CO_2 jährlich.
Auch wenn die spezifische CO_2-Aufnahme einzelner Materialien begrenzt ist, zeigen die Ergebnisse, dass die untersuchten Stoffströme einen Baustein für zukünftige Carbon-Management-Strategien darstellen können. Die Relevanz von Karbonatisierung liegt hier vor allem in der Nutzung kontinuierlich anfallender und unvermeidbarer Stoffströme, wodurch sich auch bei moderaten spezifischen CO_2-Aufnahmen relevante kumulative Speicherpotenziale erschließen. In Kombination mit der vergleichsweise einfachen Prozessführung stellt Karbonatisierung daher eine Ergänzung bestehender CO_2-Minderungsmaßnahmen dar.

LITERATURVERZEICHNIS

BMK (2024): Österreichische Carbon Management Strategie (CMS). Hg. v. Bundesmisterium für Finanzen, bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. BMK. Wien.

Feucht, Florian; Moderegger, Richard; Neuhold, Simone; Sedlazeck, Klaus Philipp (2025): Analysing material flows and final fate distribution of spent refractories from steel casting ladles and cement rotary kilns in Europe. In: *Resources, Conservation and Recycling* 215, S. 108158. DOI: 10.1016/j.resconrec.2025.108158.

Hänchen, Markus; Prigiobbe, Valentina; Baciocchi, Renato; Mazzotti, Marco (2008): Precipitation in the Mg-carbonate system—effects of temperature and CO2 pressure. In: *Chemical Engineering Science* 63 (4), S. 1012–1028. DOI: 10.1016/j.ces.2007.09.052.

Huntzinger, Deborah N.; Gierke, John S.; Kawatra, S. Komar; Eisele, Timothy C.; Sutter, Lawrence L. (2009): Carbon dioxide sequestration in cement kiln dust through mineral carbonation. In: *Environmental science & technology* 43 (6), S. 1986–1992. DOI: 10.1021/es802910z.

Sakita, Shogo; Nishimura, Kazuyuki (2016): Physical containment of municipal solid waste incineration bottom ash by accelerated carbonation. In: *J Mater Cycles Waste Manag* 18 (4), S. 687–694. DOI: 10.1007/s10163-015-0369-8.

Sanna, A.; Uibu, M.; Caramanna, G.; Kuusik, R.; Maroto-Valer, M. M. (2014): A review of mineral carbonation technologies to sequester CO2. In: *Chemical Society reviews* 43 (23), S. 8049–8080. DOI: 10.1039/c4cs00035h.

Schinnerl, F.; Sattler, T.; Noori-Khadjavi, G.; Lehner, M. (2024): Direct aqueous mineral carbonation of secondary materials for carbon dioxide storage. In: *Journal of CO2 Utilization* 88, S. 102942. DOI: 10.1016/j.jcou.2024.102942.

Recycling mineralischer Feinfraktionen für die Verwendung in Betonen

Lina Baacke[1], Niklas Kappelt[1] & Björn Siebert[1]
[1)] Institut für Baustoffe, Geotechnik, Verkehr und Wasser (IBGVW), Fakultät für Bauingenieurwesen und Umwelttechnik, TH Köln, Köln, Deutschland

KURZFASSUNG: Das Recycling von Baustoffen und der Einsatz von Sekundärrohstoffen gewinnt in der Baubranche und insbesondere im Betonbau zunehmend an Bedeutung. Es wird intensiv daran geforscht, wie konventionelle Gesteinskörnung und Zemente durch alternative Sekundärrohstoffe effizient im Sinne der Ressourcenschonung und der Reduzierung von CO_2-Emissionen in Beton eingesetzt werden können. In aktuellen Forschungsarbeiten der Technischen Hochschule Köln stehen hierzu im Wesentlichen zwei Ansätze im Fokus: Zum einen die Verwendung von mineralischen Sekundärrohstoffen z. B. aus Hausmüllverbrennungsaschen, Gleisschotter und Betonbruch in Beton und Mörtel und andererseits die Aufbereitung von Böden durch Kalzinierung mit dem Ziel, den Klinkergehalt im Bindemittel von Beton zu reduzieren. Nachfolgend werden drei Projekte vorgestellt, die sich mit diesen Themenschwerpunkten befassen.

1 TONHALTIGES TUNNELAUSBRUCHMATERIAL ALS BINDEMITTEL IN BETON

Der Einsatz von Zement und Beton ist verantwortlich für 6 bis 8 % der weltweiten CO_2-Emissionen. Zur Dekarbonisierung des Betonbaus werden vermehrt sogenannte „supplementary cementious materials (SCM)“ verwendet, um traditionellen Portlandzementklinker bei gleichbleibenden Bindemitteleigenschaften anteilig zu substituieren. Bewährte SCMs wie Steinkohleflugasche und Hüttensandmehl werden in absehbarer Zukunft knapper. Während kalzinierte, d.h. temperaturbehandelte Tone ähnliche Eigenschaften aufweisen, werden derzeit immer noch große Mengen tonhaltiger Böden aufgrund fehlender Verwertungswege deponiert. Große Mengen solcher tonhaltigen Böden fallen beispielsweise bei Tunnelbaumaßnahmen an.

Im Forschungsprojekt TOFFEE, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, Förderkennzeichen: 033RK098E), wurde das baustoffliche Verwertungspotenzial der feinen Mineralfraktion von Tunnelausbruchmaterial als kalzinierter Ton untersucht. Dabei standen u. a. Proben der in Tab. 1 dargestellten Böden zur Verfügung, die im Labor für Geotechnik und Tunnelbau der Technischen Hochschule Köln charakterisiert und kalziniert wurden.

Tab. 1: Geotechnische Eigenschaften der untersuchten Böden aus aktuellen Tunnelbaumaßnahmen

Bodenparameter	Paris-Mergel (PTBM)	Frankfurter Ton (FFM)	London Clay (LC)
Konsistenz	Halbplastisch	Plastisch, feinkörnig	Steif
Korngrößenverteilung (prozentuale Anteile an Ton – Schluff – Sand und Kies)	9-53-32-6	55-37-8-0	57-38-5-0
Bodengruppe (DIN 18196)	TA	UA	TA
Wesentliche Tonminerale	Illit/Muskovit (22%), Smektit (20%), Kaolinit (5%)	Illit/Muskovit & Smektit-Einlagerung (36%), Kaolinit (5%)	Illit/Muskovit (20%), Smektit (26%), Kaolinit (8%)
Kalzinierung	4 h bei 800 °C	4 h bei 800 °C	1 h bei 650 °C

Das Ausgangsmaterial wurde zunächst bei 105 °C getrocknet. Anschließend wurde die durch mechanisches Sieben gewonnene Korngruppe 0/0,4 mm im Muffelofen kalziniert. Die Veränderung der mineralogischen Zusammensetzung der Proben ist den Ergebnissen der Röntgendiffraktometrie (XRD) in Abb. 1 zu entnehmen.

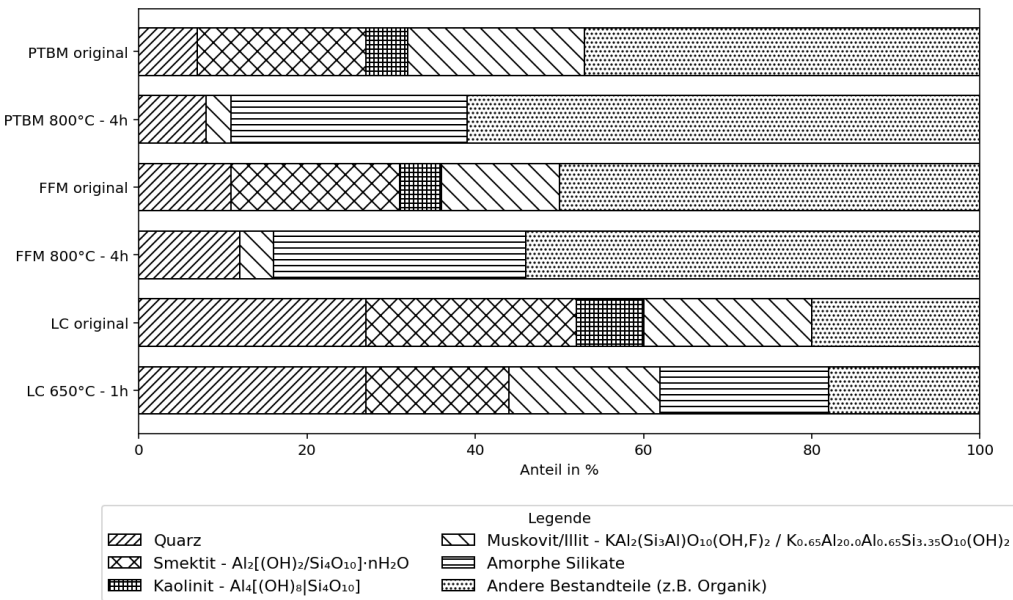


Abb. 1: Anteile der verschiedenen Mineralphasen in den untersuchten Böden, vor und nach der Kalzinierung

Die Wirksamkeit der Kalzinierung misst sich an der Umsetzung der Tonmineralien in amorphes Alumosilikat, da dieses maßgeblich für die Reaktivität als Bindemittel verantwortlich ist. Bei der Kalzinierung von Paris Mergel und Frankfurter Ton wurden Smektit und Kaolinit vollständig und Muskovit/Illit größtenteils umgesetzt. Bei der Kalzinierung des London Clay wurde Kaolinit ebenfalls vollständig umgesetzt, Smektit und Muskovit/Illit jedoch nur teilweise, vermutlich auf-grund der geringeren Temperatur und Einwirkungszeit.

Im Labor für Baustofftechnik der Technischen Hochschule Köln wurde an Bindemittelleimen und Mörteln untersucht, ob und inwieweit sich die kalzinierten Bodenproben als Klinkerersatz in zementgebundenen Baustoffen eignen.

Im Hinblick auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften wurden Bindemittelleime mit 80 M.-% Ze-ment CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N und 20 M.-% kalziniertem Ton (unter Variation der Bodenpro-ben) mit einem Referenzleim aus 100 M.-% Zement verglichen. Zur Einstellung einer einheitlichen Konsistenz (Setzfließmaß von 210 ± 10 mm auf dem Hägermanntisch) waren bei den kalzinierten Bodenproben nur sehr geringe Fließmittelmengen (max. 0,5 M.-% bez. auf den Zementgehalt) erforderlich. Auch die Messungen im Rotationsviskosimeter (Viskomat NT, Fa. Schleibinger) deutete darauf hin, dass sich bei Einsatz der kalzinierten Bodenproben in zementgebundenen Systemen die erforderlichen Verarbeitbarkeitseigenschaften problemlos einstellen lassen.

Die Druckfestigkeit von Mörteln, bei denen der Zement schrittweise durch kalzinierte Bodenproben ersetzt wurde, wurde an Normprismen (40 x 40 x 160 mm³) bestimmt. Ausgehend von der Normrezeptur der Mörtel (1350 g CEN-Sand, 450 g Zement und 225 g Wasser) wurde der Zementanteil sukzessive in Schritten von 10 M.-% durch Proben aus gebranntem Ton und zum

Vergleich mit inertem Kalksandsteinfüller (KSF) bis max. 50 M.-% substituiert. Abb. 2 zeigt die Druckfestigkeiten im Alter von 91 Tagen. Bei einem Zementersatz von 10 M.-% zeigten die Mörtel mit den kalzinierten Böden keine signifikanten Abweichungen in der 91-Tage-Festigkeit vom Referenzmörtel. Tendenziell lag die Festigkeit der Mörtel mit kalziniertem Material sogar leicht über der Festigkeit des Referenzmörtels (100 M.-% Zement), was auf granulometrische Effekte zurückgeführt werden kann. Mit Substitutionsraten von 20 M.-% und höher reduzierte sich die Mörtelfestigkeit, jedoch signifikant weniger als bei Zugabe von KSF. In den Forschungsarbeiten konnte somit gezeigt werden, dass sich durch Kalzinierung von tonigen Böden aus Tunnelbaumaßnahmen wertvolles Material für den Klinkerersatz in mineralischen Bindemitteln gewinnen lässt.

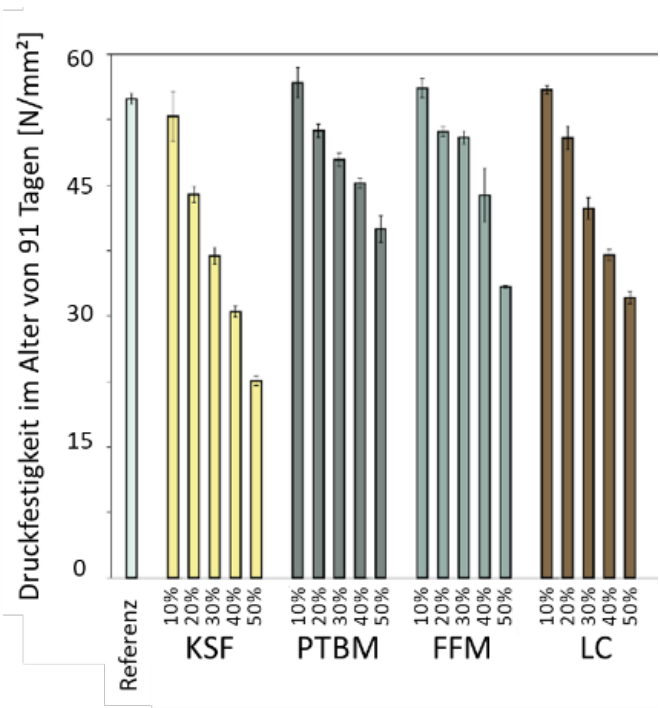


Abb. 2: Druckfestigkeit der Mörtel im Alter von 91 Tagen

2 ALTERNATIVE SEKUNDÄRROHSTOFFE ALS GESTEINSKÖRNUNG IN BETON

2.1 Hausmüllverbrennungsasche

In Deutschland fallen durch die thermische Behandlung von Siedlungsabfällen jährlich rund 6 Millionen Tonnen Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA) an (Spohn, 2020). Da diese Aschen bislang nur eingeschränkt aufbereitet und verwertet werden können, werden sie überwiegend deponiert. Im Rahmen des Forschungsprojekts ASHCON, das ebenfalls vom BMBF gefördert wurde (Förderkennzeichnen: 033R258A), wurden Prozessschritte entwickelt, um aus der mineralischen Fraktion von HMVA eine Gesteinskörnung für Beton zu gewinnen.

Neben „frischen“ HMVA-Proben aus Verbrennungsanlagen in Leverkusen und Bonn wurden auch Proben der Deponie Leppe des Bergischen Abfallwirtschaftsverbands in Lindlar einbezogen, wobei unterschiedliche Lagerungsdauern der Aschen berücksichtigt wurden.

Die Proben der HMVA wurden am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen mittels elektrodynamischer Fragmentierung an den Phasengrenzen aufgespalten (Thome, 2026). Aus der gewonnenen Fraktion 2/8 mm wurden anschließend eisenhaltige und nicht-eisenhaltige Metalle durch Magnet- und Wirbelstromabscheider sowie Glas durch optische Messtechnik entfernt. Der gewonnene Müllverbrennungsreststoff (MVR) setzte sich durchschnittlich zusammen aus ca. 80% Mineralik, ca. 6% eisenhaltigen Metallen, ca. 1% nicht-eisenhaltige Metalle und ca. 14% Glas.

Gemäß den Ergebnissen der Röntgenfluoreszenzanalyse war die Zusammensetzung der augenscheinlich heterogenen Proben und unterschiedlichen Quellen erstaunlich ähnlich. Durchschnittlich ist SiO_2 mit etwas über 56 % Massenanteil die wichtigste Komponente, darauf folgen CaO mit 15%, Fe_2O_3 mit 9.3%, Al_2O_3 mit 8,7%, Na_2O mit 3,3% und MgO mit 2,5%.

Die scheinbaren Rohdichten ρ_a der MVR sind vergleichbar mit denen von Rheinkies, jedoch deutet eine um den Faktor 3 bis 5 höhere Wasseraufnahme nach 24 Stunden auf eine höhere Porosität hin, die sich auch in einer niedrigeren Rohdichte auf ofentrockener Basis ρ_{rd} widerspiegelt.

Im Labor für Baustofftechnik der TH Köln wurde schließlich der Einfluss der MVR als Gesteinskörnung auf wesentliche Frisch- und Festbetoneigenschaften bestimmt. Dazu wurden Betone der Druckfestigkeitsklasse C20/25 mit einem Zement CEM III/A 42,5 N hergestellt. Neben einem Referenzbeton mit 100% natürlicher Gesteinskörnung wurden auch Betone untersucht, bei denen 50% der Gesteinskörnung der Fraktion 2/8 mm durch MVR substituiert wurde. Aufgrund der erhöhten Wasserabsorption von MVR wurde den Betonen Zusatzwasser in Höhe der Absorptionsmenge der jeweiligen Gesteinskörnung nach zehn Minuten hinzugefügt.

Die Betone wurden hinsichtlich ihrer rheologischen Eigenschaften, d.h. Fließgrenze, Viskosität und Ausbreitmaß, charakterisiert. Zwar waren die Viskositäten und Fließgrenzen der Betone mit MVR tendenziell geringer bzw. die Ausbreitmaße höher im Vergleich zum Referenzbeton, wie in Abb. 3, links zu sehen. Allerdings ist zusammenfassend festzustellen, dass sich mit Hilfe konventioneller Betontechnologie die üblichen Anforderungen an Frischbetoneigenschaften ohne Weiteres erfüllen lassen.

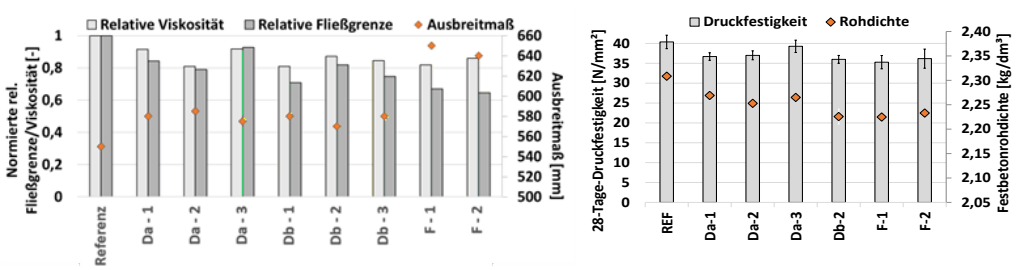


Abb. 3: Rheologie der Frischbetone mit MVR (links) und Festbetoneigenschaften im Alter von 28 Tagen (rechts)

An den Festbetonen wurden die in Abb. 3 dargestellten Rohdichten und Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen bestimmt. Zwar ist tendenziell gegenüber dem Referenzbeton ein Festigkeitsabfall von rd. 40 N/mm² auf rd. 36 N/mm² bei Einsatz von MVR festzustellen. Durch weitere Optimierung der Betonrezeptur (Reduzierung des Wassergehaltes bei MVR-Betonen und damit Vereinheitlichung der Konsistenz) lässt sich dieser Festigkeitsabfall jedoch reduzieren.

Besonders wichtig für die Verwendbarkeit der MVR in der Baupraxis ist der Nachweis der Umweltverträglichkeit. Am Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen wurde festgestellt, dass zulässige Feststoffgrenzwerte für den Abfalleinsatz in Produkten gemäß der Bund/Länder-

Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (Bundesregierung, 2021) in Bezug auf Kupfer, Zink und ggf. Blei überschritten werden. Die geltenden Anforderungen an Eluierbarkeit der Gesteinskörnung bzw. des damit hergestellten Betons wurden von der MVR allerdings erfüllt. Die Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass sich mit dem Verfahren der elektrodynamischen Fragmentierung und anschließender Sortierverfahren eine mineralische Grobfraktion gewinnen lässt, mit der sich verarbeitbare Betone ausreichender Festigkeit herstellen lassen. Offene Frage bestehen insbesondere bei der Bewertung der Umweltverträglichkeit solcher Betone.

2.2 Rezyklierte Gesteinskörnung und Hausmüllverbrennungsasche

Im Forschungsprojekt ÖMoBau, gefördert durch das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), wurde untersucht, ob und inwieweit sich mineralische Bau- und Abbruchreststoffe sowie Müllverbrennungsaschen in Betonen einsetzen lassen, die mit Geopolymeren hergestellt sind. Während im o.g. Projekt TOFFEE darauf abgezielt wurde, den Klinkergehalt im Zement zu reduzieren, verfolgt der betontechnologische Ansatz mit Geopolymeren das Ziel, vollständig auf Portlandzementklinker zu verzichten. Solche Geopolymere sind mineralische Bindemittel, die durch die Polymerisation von Alumosilikat-Verbindungen aus puzzolanischen oder latent-hydraulischen Ausgangsstoffen wie Metakaolin entstehen. Im Gegensatz zu Portlandzement erfolgt die Aushärtung nicht durch Hydratation, sondern durch eine exotherme Polymerisationsreaktion (Davidovits, 2008). Da diese Bindemittel eine deutlich geringere CO_2-Bilanz als konventionelle Zemente aufweisen, sind sie bedeutsam bei der Entwicklung nachhaltiger Betone (Davidovits, 2005).

Im Projekt ÖMoBau wurden drei verschiedene mineralische Sekundärrohstoffe als Gesteinskörnung in Verbindung mit Geopolymerbindern auf Basis von Centrilit NC II der Fa. MC Bauchemie (Metakaolin) und Natronwasserglas untersucht.

Bei dem im Weiteren als Rezyklat (RC) bezeichneten Material handelt es sich um aufbereitetes Abbruchmaterial aus dem Beton- und Stahlbetonbau. Des Weiteren wurde der Abfall aus der Aufbereitung von Gleisschotter verwendet (GS). Hier bleiben die Feinfraktionen in der Regel außerhalb des Recycling-Kreislaufs durch Wiedereinbau und werden deponiert.

Als dritter Sekundärrohstoff wurde Hausmüllverbrennungsasche (HMVA) eingesetzt, die allerdings nur konventionell aufbereitet und nicht wie im Projekt ASHCON elektrodynamisch fragmentiert und sortiert wurde.

Im Labor für Baustofftechnik der Technischen Hochschule Köln wurden Proben der drei Sekundärrohstoffe eingehend baustofftechnologisch quantitativ und qualitativ charakterisiert, klassiert und jeweils entsprechend der Sieblinie eines CEN-Normsandes mit Korngröße 0/2 mm zusammengesetzt. Anhand wesentlicher Merkmale wurden schließlich die Materialien hinsichtlich ihrer Eignung als Gesteinskörnung für Beton bewertet, was Tab. 2 zusammenfasst.

Tab. 2: Bewertung der Eignung von Gleisschotter, Hausmüllverbrennungsasche und Beton-Rezyklat als sekundäre Gesteinskörnung im Vergleich zu Normsand (1 = gut geeignet, 4 = schlecht geeignet)

Gesteinskörnung	Wasseraufnahme	Fließkoeffizient	Verschleißkoeffizient	Rauigkeit **	Kantigkeit **	Gedrungenheit	Gesamt (Summe)
CEN-Sand	1	1	1	1	1	1	6
GS	2	4	3	4	4	2	19
HMVA	4	3	4	3	2	3	19
RC	3	2	2	2	3	2	14

**qualitativ

Während sich Betonbruch (RC) besonders gut für betontechnologische Anwendungen eignet, ist Gleisschotter (GS) vor allem wegen der Oberflächenbeschaffenheit mit feinen Anhaftungen hinsichtlich Verarbeitbarkeit problematisch. HMVA kann aufgrund der ausgeprägten Saugfähigkeit zu ähnlichen Problemen führen. Außerdem weist HMVA im Vergleich die niedrigste Rohdichte auf, was Einfluss auf die Betonfestigkeit haben kann.
An Mörteln mit Geopolymer bzw. Zement (CEM I 42,5 R) wurde die natürliche Gesteinskörnung anteilig bis zu 50 Vol.-% mit den Sekundärrohstoffen Gleisschotter und Betonbruch substituiert. Dabei wurde über die Wasseraufnahme der Sekundärrohstoffe ermitteltes, prozentual erforderliches Saug- bzw. Zusatzwasser zu den Mörtelmischungen hinzugegeben, was zu einer vergleichbaren Verarbeitbarkeit (Ausbreitmaß im Bereich von 160 bis 180 mm auf dem Hägermann-Tisch) führen sollte. Die Verarbeitbarkeit reduzierte sich dennoch mit steigendem Substitutionsgrad (Abb. 4).
Wie Abb. 4 weiterhin zu entnehmen ist, führte die steigende Substitution bei allen Mischungen zu einem Rückgang der Festigkeit. An den zementbasierten Mörteln fiel der Festigkeitsverlust infolge Substitution tendenziell geringer aus als bei den Rezepturen mit Geopolymerbinder. Eine Substitution von 37,5 Vol.-% mit Gleisschotter bzw. Betonbruch führte zu Festigkeitseinbußen von rd. 14 bis 16% bei Geopolymermörtel bzw. von rd. 11 bis 14% bei zementgebundenen Mörteln. Dabei erwies sich die Verringerung der Festigkeiten als annähernd linear zum Substitutionsgrad.

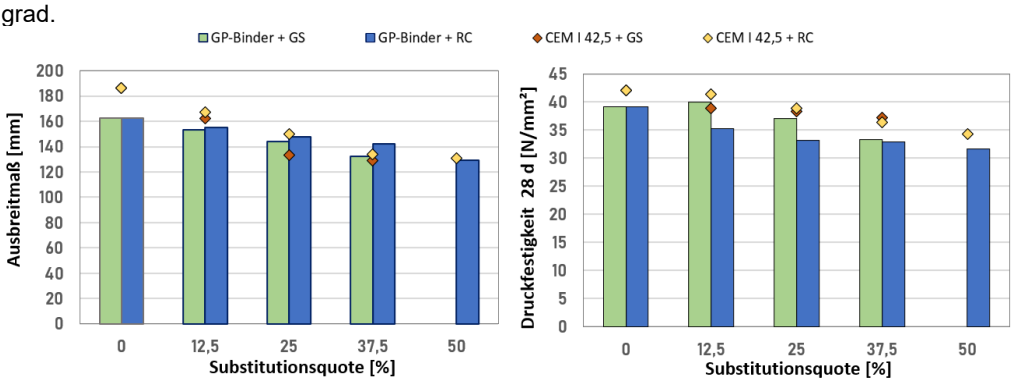


Abb. 4: Ausbreitmaße (links) bzw. 28-Tage-Druckfestigkeiten (rechts) in Abhängigkeit der Substitutionsquote von Hausmüllverbrennungsasche (HMVA), Betonbruch (RC) und Gleisschotter (GS) mit Geopolymer- (GP-) bzw. Zementmörteln

Zweckmäßige Substitutionsgrade hängen letztlich von der erforderlichen Konsistenz und Festigkeit ab. Im Ergebnis der Forschungsarbeiten ließ sich feststellen, dass Gleisschotter und Betonbruch durchaus geeignete Ersatzstoffe für natürliche Gesteinskörnung sowohl in zementgebundenen Betonen als auch in Gepolymerbetonen sein können.

LITERATURVERZEICHNIS

Bundesregierung. (2021). Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV). Bundesanzeiger Verlag.

Davidovits, J. (2005). Geopolymer chemistry and sustainable Development. The Poly(sialate) terminology : a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry. *Proceedings of 2005 geopolymer conference.* Saint-Quentin: Institut Géopolymère.

Davidovits, J. (2008). *Geopolymer: Chemistry & Applications.* Saint-Quentin: Institut Géopolymère.

Spohn, C. (2020). Beitrag der Verwertung von Haus-müllverbrennungsaschen zur CO2-Einsparung. In *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle.* Thome-Kozmiensky.

Thome, V. (2026). *Elektrodynamische Fragmentierung am Fraunhofer IBP*. Abgerufen am 19. 06 2026 von https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/mineralische-werkstoffe-baustoffrecycling/aufbereitungsverfahren/elektrodynamische-fragmentierung.html

Materialtrends in Leiterplatten von Mobiltelefonen: Industriemetalle statt Edelmetalle auf kleinerer Fläche (1998–2021)

Aleksander Jandric[1], Lukas Ginzinger[1] & Stefan Salhofer[1]
[1)] Universität für Bodenkultur Wien, Department für Landschaft, Wasser und Infrastruktur, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Wein, Österreich

KURZFASSUNG: In diesem Vortrag präsentieren wir die Ergebnisse einer Analyse der Materialzusammensetzung von Leiterplatten (PCBs) aus Mobiltelefonen über den Zeitraum von 1998 bis 2021. Insgesamt wurden 45 Geräte verschiedener Generationen mechanisch zerlegt, homogenisiert und mittels einer neu-entwickelten Methode für Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) untersucht, um die Trends in der Metallveränderung zu identifizieren. Unsere Analyse zeigt, dass sich die physikalischen und materiellen Eigenschaften von Leiterplatten in Mobiltelefonen im Zuge der technologischen Entwicklung erheblich verändert haben: 1) Miniaturisierung der PCBs: Trotz eines Anstiegs der Gesamtmasse moderner Smartphones sind die Leiterplatten im Zeitverlauf signifikant kleiner geworden (durchschnittlich ca. –6,9 % pro Jahr). 2) Industriemetalle dominieren: Drei Basismetalle, Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Zinn (Sn), machen einen Großteil der PCB Masse aus und sind weiterhin zentral für elektrische Leitfähigkeit und mechanische Funktion. 3) Rückgang der Edelmetalle: Im Gegensatz dazu zeigen Edelmetalle wie Gold (Au), Silber (Ag) und Palladium (Pd) über die Zeit einen eindeutigen abnehmenden Trend der Gesamtmasse pro PCB. Diese Entwicklungen weisen auf grundlegende Materialverschiebungen hin. Die fortschreitende Miniaturisierung der Leiterplatten sowie der relative Rückgang von Edelmetallkonzentrationen sind Ausdruck technologischer Optimierung und zunehmender Kosteneffizienz. Gleichzeitig behalten Industriemetalle wie Kupfer und Nickel ihre mengenmäßige Bedeutung, was für die Recyclingindustrie angesichts der deutlich geringeren Marktwerte im Vergleich zu Edelmetallen jedoch nur einen begrenzten wirtschaftlichen Ausgleich darstellt. Dennoch sind diese Materialien für Ressourcengewinnung und Recyclingprozesse von zentraler Relevanz. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern wichtige Impulse für die Weiterentwicklung von Recyclingstrategien, die Bewertung von Wertstoffpotenzialen in End-of-Life-Mobiltelefonen sowie für die Abschätzung des Ressourcenpotenzials urbaner Minen.

1 EINLEITUNG

Die Verbreitung von Mobiltelefonen im Alltagsleben hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Ausgehend von den Mobilfunkverträgen ist die Zahl der im Umlauf befindlichen Mobiltelefone von 91 Millionen im Jahr 1995 auf 8,9 Milliarden im Jahr 2023 gestiegen (ITU, 2024). Wenn diese Geräte schließlich ihre Lebensdauer erreicht haben, werden sie weltweit voraussichtlich rund 1,22 Millionen Tonnen Elektroaltgeräte (EAG) Abfall verursachen. Das enorme Volumen dieses Abfallstroms und seine komplexe Materialzusammensetzung können aufgrund unsachgemäßer Entsorgungs- und Recyclingpraktiken zu gesundheitsschädlichen Auswirkungen führen und eine erhebliche Belastung für die Umwelt darstellen (Cesaro et al., 2019).
Die Leiterplatte (PCB) ist die Kernkomponente für den Betrieb der verschiedenen Funktionen eines Mobiltelefons und weist im Vergleich zu allen anderen Komponenten die komplexeste Materialzusammensetzung auf. Die mit Abstand vorherrschende Recyclingtechnologie für die Aufbereitung von PCB Abfällen ist die pyrometallurgische Verarbeitung, die in integrierten Kupferschmelzen stattfindet. Aufgrund der Komplexität des Verfahrens, der Skaleneffekte und der Marktbeherrschung konzentrieren sich diese Anlagen weltweit auf nur eine Handvoll Standorte. Sie betreiben robuste Verfahren, die für die Aufbereitung großer Mengen von PCBs optimiert sind, wobei der Schwerpunkt auf der Rückgewinnung von Gold, Kupfer und einer Handvoll weiterer Elemente liegt, die in relativ hohen Konzentrationen vorhanden sind.

Die nächste Herausforderung, vor der sowohl die Recyclingindustrie als auch die Hersteller stehen, ist jedoch die Rückgewinnung kritischer und strategischer Materialien. Diese Materialien sind deutlich ungleichmäßiger über die Bauteile verteilt und unterliegen technologischen Entwicklungen. Daher gibt es zwei Voraussetzungen, um das Recyclingpotenzial auch für diese Materialien zu eröffnen. Erstens müssen die einzelnen Komponenten von Mobiltelefonen individuell analysiert werden, sowohl hinsichtlich der technologischen Entwicklung als auch der Gesamtmasse und schließlich der Materialzusammensetzung. Zweitens sollte das Analyseverfahren deutlich vereinfacht, beschleunigt und allgemein zugänglicher gemacht werden.
Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein präzises manuelles Demontageverfahren durchgeführt, um einen umfassenden Einblick in die Komponenten von Mobiltelefonen und deren Massenveränderung im Laufe der Zeit zu gewinnen. Im nächsten Schritt wurden die Leiterplatten mechanisch pulverisiert, homogenisiert und mittels tragbarer Röntgenfluoreszenz (pXRF) auf ihre Materialzusammensetzung untersucht. Eine neuartige Post-hoc-Kalibrierung für pXRF, wie sie von Jandric et al. (2024) beschrieben wurde, in Kombination mit der Herstellung methodenspezifischer Probenpellets, verbesserte die Genauigkeit der pXRF-Analyse erheblich. Dieser Ansatz ermöglichte die Analyse eines großen Probensatzes und damit eine detaillierte Trendanalyse der Materialzusammensetzung der Leiterplatten.

2 METHODIK

Eine Stichprobe von 45 verschiedenen gebrauchten Mobiltelefonen wurde nach dem Zufallsprinzip in einem sozialökonomischen Betrieb in Wien, Österreich, gewonnen. Die untersuchten Mobiltelefone wurden nach Hersteller, Modell und Erscheinungsdatum sortiert. Die Stichprobe der Mobiltelefone wurde in zwei Gruppen unterteilt: Tastenhandys (n = 18) und Smartphones (n = 27). Tastenhandy sind definiert als Mobiltelefone, die hauptsächlich über eine physische Tastatur bedient werden und keine Applikationen von Drittanbietern unterstützen. Smartphones sind definiert als Mobiltelefone, die über Touchscreens bedient werden und über erweiterte Internetzugangsfunktionen in Kombination mit Applikationen von Drittanbietern verfügen.
Jedes Mobiltelefon wurde mithilfe eines Reparatur-Sets für Mobiltelefone manuell zerlegt. Das Ergebnis sind klar definierte und mit anderen Studien vergleichbare Komponenten von Mobiltelefons, welche demselben Prinzip wie bei Bookhagen et al. (2018) folgt. Die resultierenden Komponenten wurden in 15 Kategorien eingeteilt und mit einer Laborwaage gewogen.
Die bei der manuellen Demontage anfallenden Leiterplatten wurden als Einzelproben separat behandelt und mechanisch für die Materialzusammensetzungsanalyse mittels tragbarer Röntgenfluoreszenz (pXRF) aufbereitet. Die mechanische Aufbereitung begann mit dem Zerschneiden der Leiterplatte, gefolgt vom Zerkleinern und Mahlen auf eine Partikelgröße von <500 µm. Im letzten Schritt wurden pro Leiterplatte drei zufällig ausgewählte Pulverproben von jeweils ca. 1 g entnommen und mit einer hydraulischen Presse zu Probenpellets gepresst.
Um in dieser Studie die Materialzusammensetzung von Leiterplatten aus Mobiltelefonen mittels pXRF zu analysieren, folgten wir der Methodik und dem Prinzip der Post-hoc-Kalibrierung, sh. Jandric et al. (2024).

3 TRENDS BEI DER MATERIALZUSAMMENSETZUNG VON MOBILTELEFON LEITERPLATTEN

Die Ergebnisse der manuellen Demontage zeigen, dass die Masse der Komponenten in Tastenhandys gleichmäßiger auf die verschiedenen Kategorien verteilt war. Im Gegensatz dazu machen nur vier von fünfzehn Komponenten, nämlich der Akku (35,56 ± 10,83 g), das Display (33,15 ± 7,18 g), das Hauptgehäuse (24,69 ± 12,45 g) und das Gehäuse (17,38 ± 12,94 g), 83 % der Gesamtmasse eines durchschnittlichen Smartphones aus.

Die Analysen von Leiterplatten zeigen einen deutlichen Anstieg der Gesamtkonzentration an Metallen von 369.111 ppm (37 Gew.%) in Leiterplatten von Tastenhandys auf 677.954 ppm

(68 Gew.%) in Leiterplatten von Smartphones. Darüber hinaus machen Cu, Ni und Sn einen erheblichen Anteil aller untersuchten Elemente aus, der von 35 Gew.% in Leiterplatten von Tastenhandys bis zu 65 Gew.% in Leiterplatten von Smartphones reicht. Alle anderen Elemente, einschließlich seltener und kritischer Elemente, machen sowohl in Tastenhandys als auch in Smartphones weniger als 1 Gew.% der Leiterplatte aus (siehe Abb. 1).

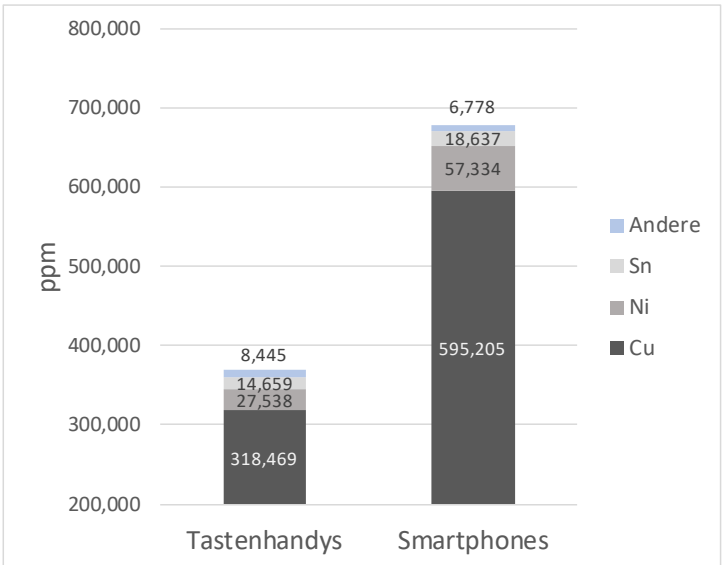


Abb. 1: Gesamtmetallkonzentration in Leiterplatten von Mobiltelefonen

Die Ergebnisse der Trendanalyse zur Gesamtelementkonzentration in Leiterplatten von Mobiltelefonen blieben über den betrachteten Zeitraum relativ konstant. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Anstieg der Elementkonzentration pro Leiterplatte durch die abnehmende Masse der Leiterplatten ausgeglichen wurde. Die Ergebnisse der linearen Regressionsmodelle für einzelne Elemente zeigen für die meisten Elemente rückläufige Gehalte. Bei sieben von zehn Elementen ist dieser Rückgang mit einem p-Wert von < 0,05 statistisch signifikant. Ein besonders starker Rückgang des Gehalts pro Leiterplatte wurde bei den Elementen beobachtet, die durch die RoHS-Richtlinie (engl. *Restriction of Hazardous Substances*) reguliert wurden, d.h. bei Blei (Pb), Arsen (As) und Cadmium (Cd).
Die Masse von Cu und Ni blieb im Zeitverlauf konstant, mit einem Mediangehalt von ca. 5200 für Cu und 480 mg/PCB für Ni, ohne signifikante Unterschiede zwischen Tastenhandys und Smartphones. Diese Stabilität ist auf einen Anstieg der Konzentration zurückzuführen, der durch eine Abnahme der Masse der Leiterplatten ausgeglichen wurde. Der Gehalt an Edelmetallen nahm im Laufe der Zeit deutlich ab, wobei der Bestimmungskoeffizient R^2 zwischen 0,47 für Au, 0,34 für Pd und 0,26 für Ag lag. Eine grafische Darstellung der linearen Trendanalysen ist in Abb. 2 gezeigt.

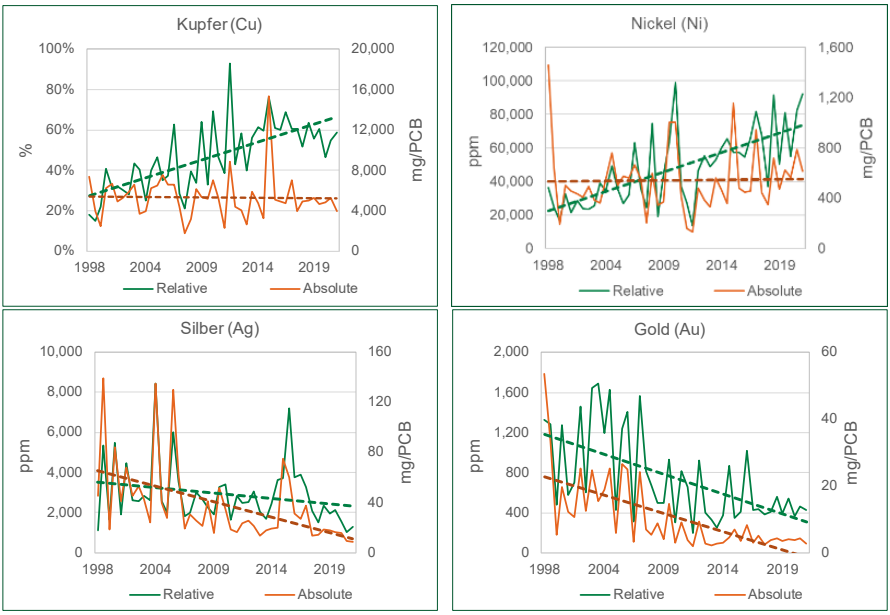


Abb. 2: Trendanalysen zur Materialzusammensetzung von Leiterplatten in Mobiltelefonen

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Materialzusammensetzung von Leiterplatten hat sich im Laufe der Zeit erheblich verändert. Derzeit machen drei Elemente etwa 65 Gew.% einer typischen Smartphone Leiterplatte aus, während alle anderen analysierten Elemente jeweils weniger als 1 Gew.% ausmachen. Der durchschnittliche Goldgehalt pro Leiterplatte verzeichnete einen besonders starken Rückgang. Während eine um das Jahr 2000 produzierte Leiterplatte im Schnitt noch über 20 mg Gold enthielt, lag dieser Wert bei nach 2018 hergestellten Leiterplatte bei durchschnittlich weniger als 5 mg. Auf der Grundlage der in dieser Studie gewonnenen Ergebnisse deuten die Erkenntnisse darauf hin, dass die zunehmende Funktionalität und Rechenleistung der Leiterplatten in Mobiltelefonen der neuen Generation nicht zu einem erhöhten Au-Verbrauch geführt hat. Im Gegenteil, der Bedarf an Au-Beschichtungen für Steckverbinder wurde durch Fortschritte in der Materialtechnologie und die Konsolidierung oberflächenmontierter Bauteile ausgeglichen. Es ist zu erwarten, dass die Auswirkungen dieser Veränderungen bei den Metallen im Laufe der Zeit auf die Recyclingindustrie, bei steigender Konzentration an unedlen Metallen und sinkender Konzentration an Edelmetallen, neuartige, flexiblere Rückgewinnungstechnologien erfordern werden, die sich auf der Grundlage der vorab geprüften Materialzusammensetzung an veränderte Eingangsströme anpassen können.

LITERATURVERZEICHNIS

Bookhagen, B., Obermaier, W., Opper, C., Koeberl, C., Hofmann, T., Prohaska, T., Irrgeher, J., 2018. Development of a versatile analytical protocol for the comprehensive determination of the elemental composition of smartphone compartments on the example of printed circuit boards. Analytical Methods 10, 3864-3871.

Cesaro, A., Belgiorno, V., Gorrasi, G., Viscusi, G., Vaccari, M., Vinti, G., Jandric, A., Dias, M.I., Hursthouse, A., Salhofer, S., 2019. A relative risk assessment of the open burning of WEEE. Environmental Science and Pollution Research 26, 11042-11052.

ITU, 2024. Mobile cellular subscriptions, in: Database, I.T.U.I.W.T.I.I. (Ed.). World Bank.

Jandric, A., Zafiu, C., Hermann, G., Salhofer, S., 2024. A novel calibration method for portable X-ray fluorescence analysis of printed circuit boards.

Zerstörungsfreie Bestimmung versorgungskritischer Rohstoffe und Sortierung mittels PGNAA am Beispiel von Elektroaltgeräten und Metalllegierungen

Helmut Spoo
Dr. Spoo Umwelt-Consulting, Stolberg/Rhld, Deutschland

KURZFASSUNG: Altprodukte oder Abfälle sind wahre „Rohstofflagerstätten“. Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling und die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen mit Primärrohstoffeigenschaften ist die Kenntnis der Rohstoffgehalte und deren Konzentrationen in den einzelnen Produkten.
Diese Bestimmung ist nun zerstörungsfrei und integral (Gesamtgehalt) mit einer neuartigen Messanlage möglich, basierend auf einem innovativen Analyseverfahren, der Prompten-Gamma-Neutronen-Aktivierungs-Analyse (PGNAA).

1 EINLEITUNG

Rohstoffe sind für zahlreiche zivile technologische Anwendungen wie beispielsweise Elektrofahrzeuge oder Windkraftanlagen, aber auch für militärische Zwecke unverzichtbar.
Viele dieser Rohstoffe sind versorgungskritisch. Zum einen wächst die Nachfrage nach diesen Materialien schnell, zum anderen bestehen hohe Abhängigkeiten zu Ländern wie China.

Kritische Rohstoffe sind von entscheidender Bedeutung für die Funktionsfähigkeit und Integrität zahlreicher industrieller Ökosysteme. Die EU hat 34 Rohstoffe als versorgungskritisch identifiziert und mit dem Critical Raw Materials Act die rechtliche Grundlage geschaffen, die gesamte Lieferkette von Schlüsselrohstoffen – vom Abbau über die Raffinierung und Verarbeitung bis zum Recycling – abzusichern.

Da in der Europäischen Union kaum Lagerstätten dieser Rohstoffe bestehen, kommt dem Recycling in Zukunft eine sehr wichtige Bedeutung zu. Leider sind die Effizienz des derzeitigen Recyclings und das Wissen um die in den verschiedenen Produkten enthaltenen Rohstoffe unbefriedigend /1/. Vielfach gehen auch durch unsachgemäßen oder sogar verschwenderischen Umgang mit Altprodukten (z.B. bei Haushaltsauflösungen) versorgungskritische Rohstoffe verloren /2/.

Im folgenden Beitrag wird ein neuartiges Detektions- und Identifikationsverfahren vorgestellt. Die Prompte-Gamma-Neutronen-Aktivierungs-Analyse (PGNAA) ermöglicht die zerstörungsfreie qualitative und quantitative Bestimmung von Rohstoffen, insbesondere versorgungskritischen Rohstoffen. Mit diesem Verfahren soll die beschriebene unbefriedigende Situation beseitigt und eine effiziente Rohstoffrückgewinnung vorangebracht werden.

2 PROMPTE GAMMA NEUTRONEN AKTIVIERUNGS ANALYSE (PGNAA)

Die bisherigen nasschemischen Analyseverfahren sind zeitaufwendig. Das zu untersuchende Material muss zerkleinert und aufgeschlossen werden. Außerdem wird selbst bei ordnungsgemäßer Probennahme (Stichwort repräsentative Analyse) immer von einer kleinen Probenmenge auf die Gesamtmenge des Abfalls geschlossen.

Abhilfe schafft ein neuartiges Analyseverfahren unseres Kooperationspartners AINT /3/, die Prompte-Gamma-Neutronen Aktivierungsanalyse (PGNAA). Die PGNAA ist ein

kernphysikalisches Verfahren zur Elementbestimmung (keine Verbindungen!), bei dem das zu analysierende Gut mit Neutronen bestrahlt wird (Abb. 1). Hierbei wird die Energie, die beim Einfangen des Neutrons durch den Atomkern freigesetzt wird, durch sogenannte prompte Gammaquanten abgestrahlt. Die Energie dieser Promptgammastrahlung ist charakteristisch für jedes individuelle Element. Durch die Spektrenaufnahme während der Bestrahlung des Messguts und unter Anwendung mathematischer Algorithmen kann auf die anteilige Masse eines jeden Elements geschlossen werden. Bei dem Verfahren erfolgt eine kurzzeitige Aktivierung; es entstehen aber keine radioaktiven Substanzen.

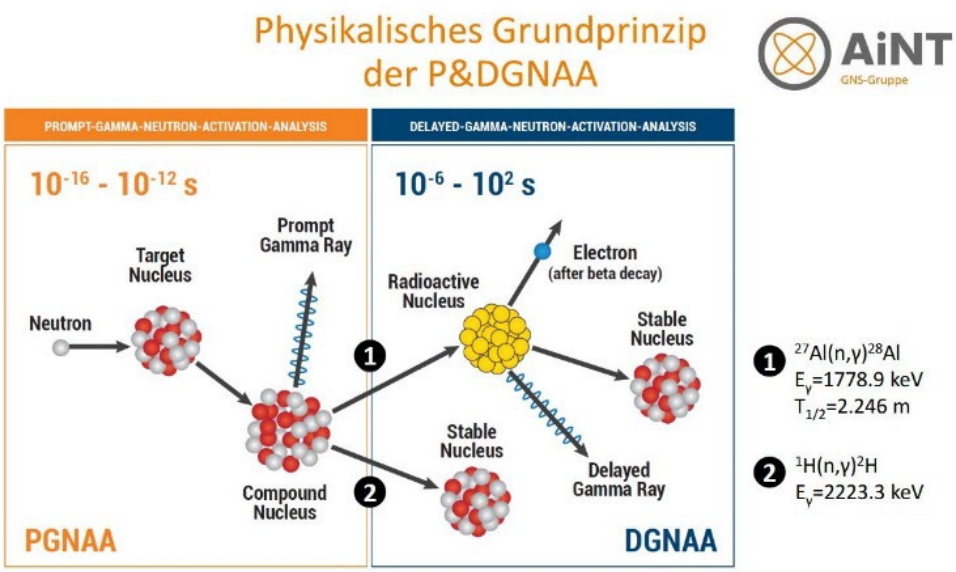


Abb. 1: Prinzip der PGNAA (Quelle: AINT Aachen Institute For Nuclear Training)

Die Materialdurchdringungstiefe hängt ab vom Energiespektrum der Neutronen. Neutronen werden im Gegensatz zur Röntgenstrahlung lediglich durch Beton abgeschirmt (Abb. 2).

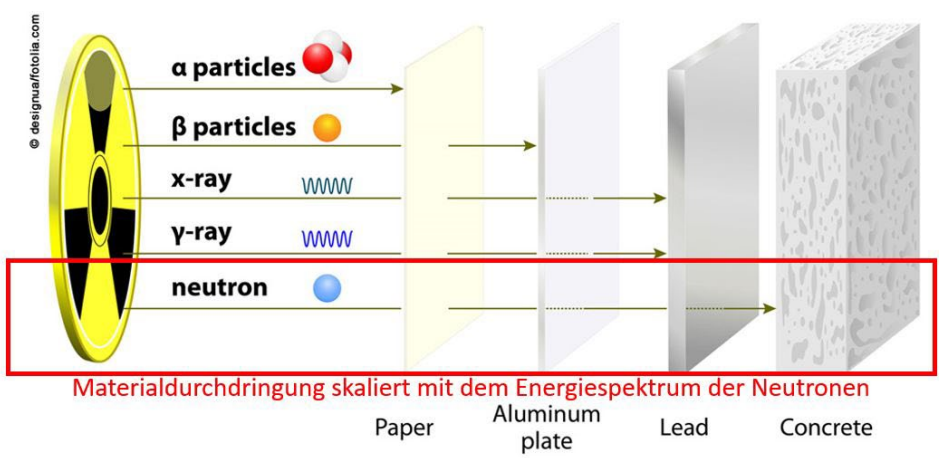


Abb. 2.: Materialdurchdringung bei Neutronen (Quelle: AINT)

Die PGNAA ist höchst sensitiv (ppm-Bereich) und erlaubt eine zerstörungsfreie und schnelle qualitative und quantitative Bestimmung der in Produkten oder Abfällen enthaltenen Elemente. Mit der PGNAA können grundsätzlich sowohl kleine Gerätekomponenten als auch komplette Geräte (z.B. Elektroaltgeräte) oder größere Abfallmengen untersucht werden.

Außerdem kann die Analytik dazu verwendet werden, im Abfall möglicherweise enthaltene Schadstoffe (z.B. chlorierte oder bromierte Verbindungen, Chlor oder Brom als Leitelement) oder Schwermetalle zu identifizieren und somit eine Unterscheidung zwischen gefährlichen und nicht gefährlichen Abfällen vorzunehmen. Die Untersuchung größerer, in Containern gelagerter Materialmengen (beispielsweise Bau- und Abbruchabfälle oder Metallschrotte), ist ebenso möglich (Abb. 3).

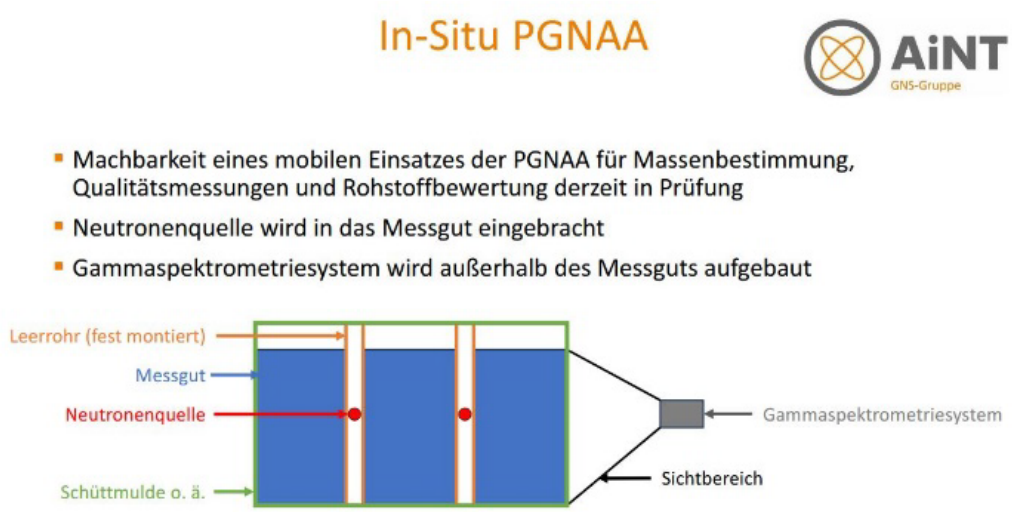


Abb. 3: In-Situ-Messung mittels PGNAA

Im Gegensatz zur **L**aser**I**nduzierten **P**lasma **S**pektroskopie (LIPS), engl. LIBS (laser- induced breakdown spectroscopy), bei der lediglich die Oberfläche des Probenmaterials analysiert wird und die auch Probleme mit verschmutzten Proben hat, erfolgt bei der PGNAA ein „Durchleuchten“ der gesamten Probe.

Die PGNAA hat auch Vorteile gegenüber der Röntgenfluoreszenzanalyse, da auch die Bestimmung von Elementen mit niedriger Ordnungszahl möglich ist. Halogene wie Chlor oder Brom (Flammhemmer!) können mit der PGNAA sehr gut bestimmt werden. Dies gilt auch für Metalle der Seltenen Erden.

3 IDENTIFIKATION UND SORTIERUNG VON ELEKTROALTGERÄTEN

Elektroaltgeräte enthalten eine Vielzahl von versorgungskritischen Rohstoffen, die meist jedoch im einzelnen Gerät nur in geringen Konzentrationen vorliegen. Daher muss künftig die Sammelquote deutlich gesteigert werden, um ein wirtschaftlich rückgewinnbares Rohstoffpotenzial zu erschließen.

Ebenso muss das Wissen um enthaltene Rohstoffe bereits an den Recyclinghöfen deutlich verbessert werden. Dies gilt gleichermaßen für die Erstbehandlungsanlagen, die meist auch nicht wissen, an welchen Stellen versorgungskritische Rohstoffe enthaltende Bauteile verbaut sind.

Daher wird auch die Behandlungsverordnung nach dem deutschen Elektroaltgerätegesetz (ElektroG) nicht oder nur unbefriedigend umgesetzt /4/.

Im Rahmen des künftig hochwertigeren Recyclings von Elektroaltgeräten ist mit der PGNAA die Analyse kompletter Geräte wie z.B. Haushaltsgroßgeräte bzw. deren Einzelkomponenten möglich, ohne die Geräte/Komponenten zu zerstören bzw. nasschemisch zu untersuchen.

Die Analytik mittels PGNAA hat hier folgende Aufgaben:

- Bestimmung der Rohstoffgehalte und Lokalisierung versorgungskritischer Rohstoffe
- Identifikation von Schadstoffen vor der manuellen Demontage bzw. der Materialaufgabe in Trennprozessen
- Verwertungsorientierte Lenkung der separierten Stoffströme/Differenzierung von Metalllegierungen anhand der Legierungsbestandteile und Ausschleusen versorgungskritischer Rohstoffe

Neben der Steigerung der Erfassungsmengen und der Erhöhung der Rohstoffrückgewinnungseffizienz ist der Ausbau der Wiederverwendung von Elektroaltgeräten im Sinne der Abfallhierarchie ein wichtiger Beitrag, versorgungskritische Rohstoffe möglichst lange im Kreislauf zu halten. Die erfordert aber einen völlig anderen Umgang z.B. mit Haushaltsgroßgeräten an den Recyclinghöfen und eine Abkehr von der Sammlung in loser Schüttung.

4. IDENTIFIKATION UND SORTIERUNG UNTERSCHIEDLICHER METALLLEGIERUNGEN

Ressourcen- und Klimaschutz sowie die Einsparung von Energie spielen beim Recycling von Metallen eine immer größere Rolle. Außerdem werden durch die bisher übliche Vermischung wertvolle Stahlveredler entweder herunterverdünnt oder diese werden mit jedem Recyclingvorgang aufkonzentriert. Die steigende Konzentration von Kupfer und Molybdän in Stahlschrotten verursacht Probleme bei der Erzeugung von neuen Produkten. Stahlveredler wie Molybdän, aber auch Buntmetalle wie Kupfer, haben bei der Gewinnung aus Erzen einen hohen CO_2-Fußabdruck. Mit jedem Recyclingvorgang verdoppelt sich der Kupfergehalt in Stahlschrotten. Die Problematik wird im folgenden Beitrag anhand der Metalle Eisen, Kupfer und Aluminium verdeutlicht. Aber auch Sondermetalle, von denen einige versorgungskritisch sind, gewinnen zunehmend an Bedeutung /5/.

Beim Metallrecycling werden mittels PGNAA die verschiedenen Störelemente identifiziert und verschiedene Metalllegierungen anhand der Legierungsbestandteile in verschiedene Legierungsklassen sortiert (am Beispiel Aluminium in Abb. 4 dargestellt).

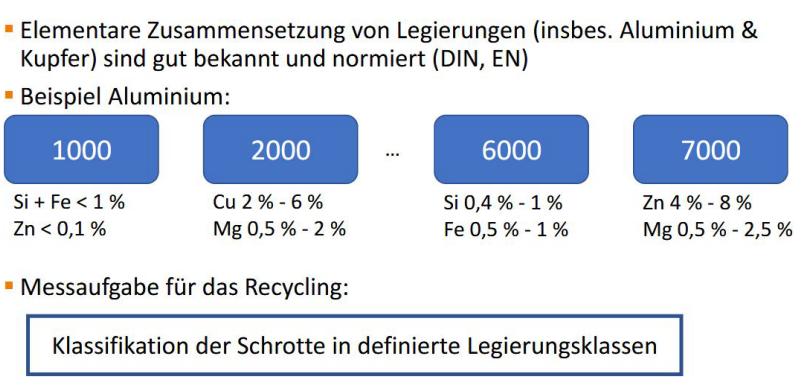


Abb. 4: Sortierung von Aluminium in verschiedene Sortierklassen

Dies funktioniert bei Stahl und Kupfer ebenso gut wie bei Aluminium.

In Abbildung 5 ist das Prinzipbild der Anlage zur Sortierung von Kupfer- und Aluminiumlegierungen im AINT-Technikum dargestellt.

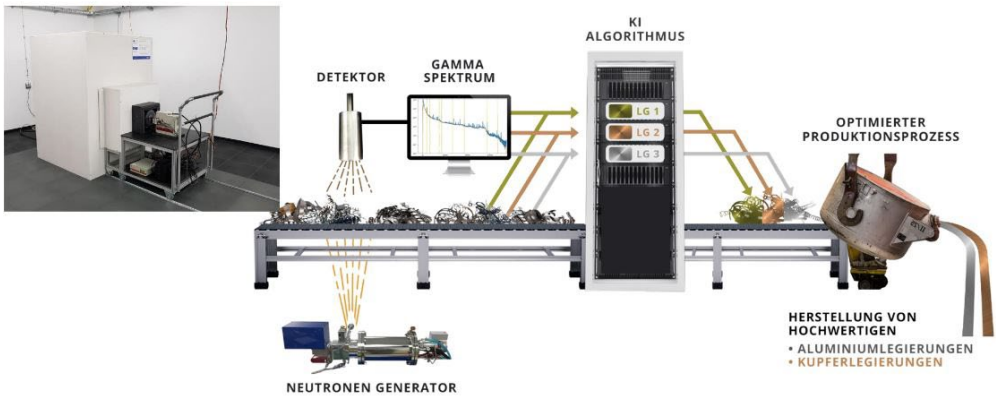


Abb. 5: Messanlage zur Sortierung von Metalllegierungen (Quelle: AINT)

Durch die Vorabsortierung unter Einsatz der PGNAA-Technik werden den Weiterverarbeitungsbetrieben Legierungen mit definierter Zusammensetzung und entsprechender Reinheit zur Verfügung gestellt. Dadurch wird das Metallrecycling insgesamt verbessert. Die Einschmelzkosten in den Gießereibetrieben reduzieren sich beträchtlich, so dass dadurch der gesamte Recyclingprozess deutlich wirtschaftlicher wird.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Rückgewinnung von versorgungskritischen Rohstoffen aus Produkten ist neben der Herstellung recyclingfreundlicher und kreislauffähiger Produkte eine wichtige Herausforderung unserer Zeit. Die bergmännische Gewinnung von Primärrohstoffen erfolgt beispielsweise bei Erzen aus zunehmend größerer Tiefe und ist geprägt durch den Abbau von Armerzlagerstätten, also Rohstofflagerstätten mit vergleichsweise geringen Metallgehalten. Zur Rückgewinnung entsprechender Metallmengen müssen daher große Mengen an Erz gefördert, transportiert, zerkleinert und aufbereitet werden. Hierfür werden erhebliche Energiemengen benötigt. Die Primärrohstoffgewinnung ist mit hohen CO_2-Emissionen verbunden.

Recycling kann hier einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten und im Rahmen einer „globalen Kreislaufwirtschaft“ ebenso zu einer sozial verträglichen Rohstoffgewinnung beitragen, an der viele partizipieren. Ziel dieses Recyclings muss es sein, Rohstoffe mit hoher Effizienz aus Produkten jedweder Art zurückzugewinnen und diese Rohstoffe zurück in den Wirtschaftskreislauf zu führen.

Mit Hilfe der PGNAA-Technik ist eine schnelle und zerstörungsfreie Rohstoffbestimmung und differenzierte Lenkung der zurückgewonnenen Wertstoffströme möglich. Die ermittelten Daten können zur Erstellung des digitalen Produktpasses herangezogen werden, der ab 2027 schrittweise verpflichtend ist.

Damit leistet die PGNAA einen wichtigen Beitrag zur Wiederverwendung von Produkten gem. EU-Abfallhierarchie sowie zum hochwertigen Recycling.

LITERATURVERZEICHNIS

/1/ Spoo, H.: 2017, Wissen, was drin ist, Stolberg/Rhld., Deutschland, Recycling Magazin
/2/ Spoo, H., Wiescher,D.: 2025, Wie verschwenderisch Deutschland mit versorgungskritischen Rohstoffen umgeht, Stolberg/Rhld., Deutschland, Müll und Abfall
/3/ Aachen Institute for Nuclear Training (AINT), Cockerillstr. 100, D-52222 Stolberg/Rhld.
/4/ Spoo, H., Wiescher, D.: 2025, Ein Gesetz für die Tonne?, Stolberg/Rhld., Deutschland, Recycling Magazin
/5/ Spoo, H., Wiescher D.: 2024, Vermischen ist out, Stolberg/Rhld., Deutschland, Circular Economy

KONTAKT

Dr.-Ing. Helmut Spoo
info@drspoo-consult.de
+49 2402 9979470, +49 151 64054059
Dr. Spoo Umwelt-Consulting
www.drspoo-consult.de

Schraubenzieher sucht Standard-Schnittstelle – Demontage eines E-Fahrzeugs im Praxis- und Realitätscheck

Alexia Tischberger-Aldrian[1], Felix Scheidl[1], Walter Martinelli[2], Yves Radmann[2], Klemens Winkler[3], Felix Strohmeier[4] & Gerald Koinig[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] SCHOLZ Austria GmbH, Laxenburg, Österreich
[3)] K1-MET GmbH, Simulation & Data Analyses, Linz, Österreich
[4)] Salzburg Research Forschungsgesellschaft m.b.H, Salzburg, Österreich

KURZFASSUNG: Der Entwurf der EU-Altfahrzeugverordnung sieht vermehrt Demontage definierter Komponenten vor. In einem Praxistest wurde ein BEV-SUV umfassend und möglichst zerstörungsarm zerlegt, alle Teile kategorisiert und Materialzusammensetzungen erhoben. Von 1033 erfassten Komponenten (Gesamtmasse 1.895 kg) dominierten masseseitig Verbunde (53,6 %) vor Kunststoffen (22,5 %) und Metallen (21,7 %), wobei auch unerwartete Restflüssigkeiten auftraten. Die Demontage wurde durch den Bedarf an spezial- und fahrzeugspezifischen Werkzeugen, schlechte Zugänglichkeit (kompakte Bauräume) sowie fehlende Manövrierfähigkeit des Fahrzeugs erschwert und war sehr zeitintensiv. Fazit: Design-for-Disassembly und standardisierte Schnittstellen sind entscheidend. Digitale Produktpässe könnten unterstützen, ersetzen aber trotzdem nicht die anspruchsvolle Demontage.

1 EINLEITUNG

Der Entwurf der neuen EU-Altfahrzeugverordnung (Stand Juli 2026) verpflichtet Behandlungsanlagen, die in Anhang VII Teil C gelisteten 23 Bauteile (u.a. Flüssigkeitsbehälter, Wärmetauscher, Stoßstangen, Monomaterial-Metallbauteile oder -Kunststoffbauteile mit einem Gewicht von mehr als 10 kg; Kabelbäume, Wechselrichter bei E-Fahrzeugen, Leiterplatten mit einer Oberfläche von mehr als 10 cm^2;) vor der Behandlung zerstörungsfrei manuell, halbautomatisch oder automatisiert zu demontieren. Anlagen müssen jedoch nicht alle 23 Teile ausbauen, wenn sie nachweisen, dass Nachzerkleinerungstechnologien diese Bauteile ebenso effizient trennen und zugleich die Kriterien und Grenzwerte nach Anhang VIII Teil G einhalten. Vor dem Shreddern jedoch unbedingt zu demontieren sind u.a. Batterien von E-Fahrzeugen, Starterbatterien, Motoren, Schaltgetriebe, Elektromotoren einschließlich ihrer Gehäuse und zugehöriger Steuergeräte, Verkabelung und sonstiger Teile, Komponenten und Materialien, Katalysatoren, Windschutz-, Heck- und Seitenscheiben aus Glas, Räder, Reifen, direkt zugängliche Infotainment-Teile (inkl. Ton-, Navigations- und Multimedia-Steuerungselemente, darunter Anzeigen mit einer Oberfläche > 100 cm^2) sowie Scheinwerfer und Rückleuchten einschließlich ihrer Aktuatoren.
Einige Arbeiten (Tian & Chen, 2014; Hansen et al., 2023; Hanschmann, 2025) betonen, dass die Demontage der erste und entscheidende Schritt im Altfahrzeug-Recycling ist, weil ihre Qualität die nachfolgenden Prozesse wie Shreddern, Sortierung, Wiederverwendung und Recycling direkt beeinflusst. Die Automobilindustrie ist noch stark linear organisiert - am Lebensende gehen dadurch viele Wertstoffe und Nutzungspotenziale verloren. Rund 90% der ELV-Materialien werden zwar zurückgewonnen, aber oft mit zu geringer Reinheit für eine erneute Nutzung im Fahrzeugbau. (Hanschmann, 2025) So wäre z.B. die Rückgewinnung von Materialien aus der Leistungselektronik ökologisch sinnvoll und würde zusätzliche Gutschriften liefern, weil wertvolle und teils seltene Materialien zurückgewonnen werden. (Fuge, 2018)
Zugleich liegt auch auf der Hand, dass Demontage von einzelnen Komponenten mit großem Aufwand verbunden ist. Ein Hauptproblem ist, dass viele Fahrzeugteile heute so konstruiert sind, dass sie schwer zu zerlegen sind, insbesondere wenn Verbundwerkstoffe, Klebungen oder unpassende Materialkombinationen eingesetzt werden. (Tian & Chen, 2014) Bei Elektrofahrzeugen sind die Herausforderungen besonders groß, weil Antriebsstrang, Batterien und Elektronik

komplex, materialintensiv und nicht für eine spätere Demontage optimiert konstruiert sind. (Hansen et al., 2023)
Um Erfahrungen in der Umsetzung der Demontage zu sammeln, wurde ein Praxistest anhand eines E-Fahrzeugs durchgeführt, wobei folgende Ziele dabei verfolgt wurden:

- Quantifizierung der Zeitdauer für den Ausbau unterschiedlicher Fahrzeugkomponenten.
- Möglichst vollständige Erfassung der Vielfalt an Fahrzeugkomponenten und Einzelteilen.
- Bestmögliche Charakterisierung der Zusammensetzung der Einzelteile.

2 MATERIAL UND METHODEN

Für die Studie stand ein E-Auto (Battery Electric Vehicle - BEV) der Fahrzeugklasse allradgetriebenes SUV (Sport Utility Vehicle) mit Panoramadach zur Verfügung. Die Traktionsbatterie war vor Versuchsbeginn ordnungsgemäß ausgebaut worden und war somit nicht Bestandteil der Untersuchung. Das Fahrzeug wurde anschließend vollständig demontiert, wobei Baugruppen, Bauteile und (soweit möglich) Einzelkomponenten separiert wurden.
Bei der Herangehensweise wurde folgende Demontagestrategie verfolgt:

- Es wurden keine Teile herausgerissen, sondern sie wurden überwiegend zerstörungsarm ausgebaut, um theoretische Wiederverwendung (Reuse) zu ermöglichen.
- Bauteile wurden – soweit technisch und sicherheitstechnisch vertretbar – in ihre Einzelbestandteile getrennt. Die Zerlegung von Bauteilen wurde nicht fortgeführt, wenn
  - kein geeignetes Werkzeug verfügbar war,
  - sicherheitsrelevante Risiken bestanden (z. B. pyrotechnische Komponenten wie Airbags) oder
  - der weitere Ausbau keinen Erkenntnisgewinn erwarten ließ bzw. keinen Sinn ergab (z.B. Reifen).

Jedes einzelne Teil erhielt eine eindeutige ID-Nummer und wurde in einer Liste erfasst (vgl. Abb. 1).

ID	Bezeichnung	Masse [kg]	Materialkategorie	Subkategorie	Polymerart
B41/1	Innenraumlicht Housing	0,020	Kunststoff	-	PC-ABS
B41/2	Innenraumlicht Leiterplatte	0,014	Verbund	Elektronik	
B41/3	Innenraumlicht Kleinteil 1	0,008	Kunststoff	-	PC-ABS
B41/4	Innenraumlicht Schalter	0,003	Kunststoff	-	PC-ABS
B41/5	Innenraumlicht Elektronik	0,046	Verbund	Elektronik	
B41/6	Innenraumlicht Kleinteil 2	0,004	Kunststoff	-	PC
B41/7	Innenraumlicht Kleinteil 3	0,006	Kunststoff	-	PC-ABS
	Summe	***0,101***			



Abb. 1: Datenerfassung der Einzelkomponenten am Beispiel eines Innenraumlichtes

Zudem wurde eine Zeiterfassung für die Demontage durchgeführt: Für jede Demontageaktion wurde die Netto-Ausbauzeit erfasst (Zeit pro Baugruppe).
Jedes einzeln erfasste Teil wurde einem der folgendem Materialkategorien zugeordnet:
Verbund, Metall, Kunststoff, Elektronik, Flüssigkeit, Textil und Glas.
Diese Kategorien wurden wie folgt definiert:

- Verbund: Als Verbunde galten Bauteile, die sichtbar aus unterschiedlichen Materialien bestanden, jedoch manuell nicht weiter zerlegbar, d.h. fest miteinander verbunden waren (vgl. Abb. 2; verschweißt, verklebt, nur mit speziellem Werkzeug zu trennen). Elektronische Baugruppen (z.B. Leiterplatten) wurden prinzipiell ebenfalls unter der Kategorie Verbund geführt, wurden jedoch – wenn möglich – auch noch separat als Untergruppe „Elektronik“ ausgewiesen. Für alle Verbundteile wurden die Paarungen dokumentiert, wobei immer das augenscheinlich dominierende Material zuerst angeführt wurde. Verbunde waren u.a. Kunststoff-

Metall, Kunststoff-Kunststoff, Metall-Metall, Metall-Elektronik, Elektronik, Kunststoff-Elektronik, Kunststoff-Textil.

- Metall: Alle Komponenten aus Metall wurden diese Kategorie zugeordnet wobei die Elementzusammensetzung für alle Komponenten bestimmt wurde. Zur Elementanalyse wurde vorhandene Beschichtung bzw. Lackierung lokal entfernt. Die Zusammensetzung wurde anschließend mit einem Handheld-RFA-Gerät gemessen (vgl. Abb. 3).
- Kunststoff: Die Polymerart wurde vorrangig anhand der Herstellerkennzeichnung identifiziert. Wenn keine Kennzeichnung vorhanden war, erfolgte die Bestimmung mittels Handheld-NIR-Spektroskopie (vgl. Abb. 3).
- Flüssigkeit: Alle Flüssigkeiten (z.B. Kühlmittel) wurden dieser Kategorie zugeordnet.
- Textil: Als textile Komponenten wurden Materialien wie z.B. Leder, Vliese zugeordnet.
- Glas: Unter diese Kategorie fiel z.B. die Frontscheibe.

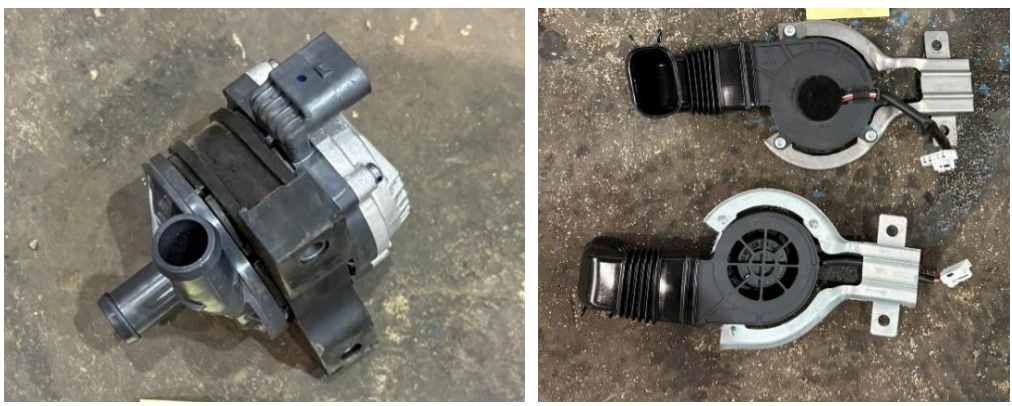


Abb. 2: Beispiele für Komponenten, die der Kategorie „Verbunde“ zugeordnet wurden.

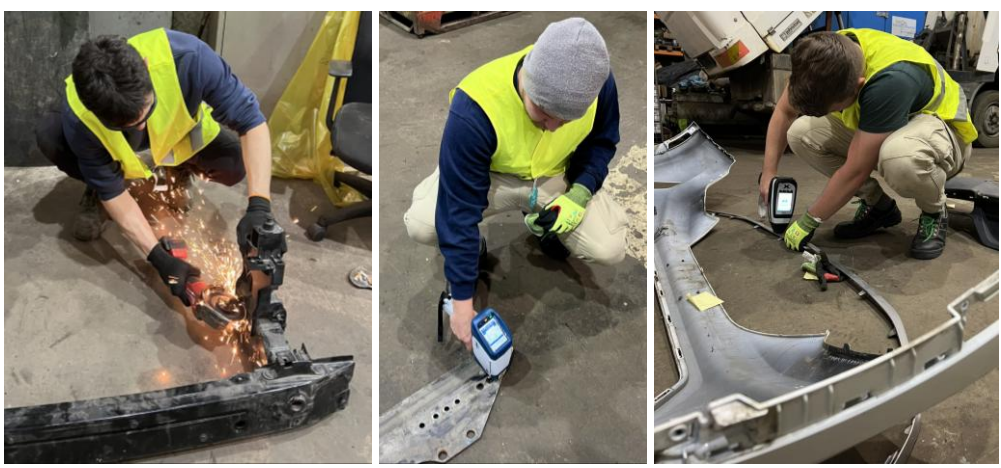


Abb. 3: Links: Abschleifen der Lackierung für die RFA-Messung; Mitte: Messung mit Handheld-RFA; Rechts: Messung mit Handheld-NIR

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Aus der Massebilanz aller ausgebauten Einzelteile ergab sich für das untersuchte Allradfahrzeug eine Gesamtmasse von rund 1.895 kg ohne Traktionsbatterie (diese wog 625 kg). Insgesamt wurden etwa 1.033 Einzelkomponenten erfasst, die sich folgenden Materialkategorien zuordnen ließen (vgl. Abb. 4):

Kunststoff: 452 Einzelkomponenten (43,7 % der gesamten Komponentenanzahl), Gesamtmasse der Kunststoff-Fraktion: 427 kg, was 22,5 % der Fahrzeuggesamtmasse entspricht.

Metall: 214 Einzelkomponenten (20,7 % der gesamten Komponentenanzahl), Gesamtmasse der Metall-Fraktion: 412 kg, was 21,7 % der Fahrzeuggesamtmasse entspricht. Davon entfällt allein auf die entkernte Karosserie 20.0 % der Fahrzeugmasse bzw. 92,2 % der Metallmasse.

Verbunde: 338 Einzelkomponenten (32,8 % der gesamten Komponentenanzahl), Gesamtmasse der Verbund-Fraktion: 1.016 kg, was 53,6 % der Fahrzeuggesamtmasse entspricht. Innerhalb der Verbunde dominierten die Kombinationen Kunststoff-Metall- bzw. Metall–Kunststoff.

Glas: 7 Einzelkomponenten (0,7 % der gesamten Komponentenanzahl), Gesamtmasse der Glas-Fraktion: 27 kg, was 1,4 % der Fahrzeuggesamtmasse entspricht.

Textil: 22 Einzelkomponenten (2,1 % der gesamten Komponentenanzahl), Gesamtmasse der Textil-Fraktion: 9 kg, was 0,5 % der Fahrzeugmasse entspricht.

Flüssigkeiten: 3,5 kg, was 0.2 % der Fahrzeuggesamtmasse entspricht.

Beispielhaft sind die erfassten Einzelkomponenten von zwei plakativen Beispielen – Lenkrad und Innentürverkleidung – in Abb. 5 gezeigt.

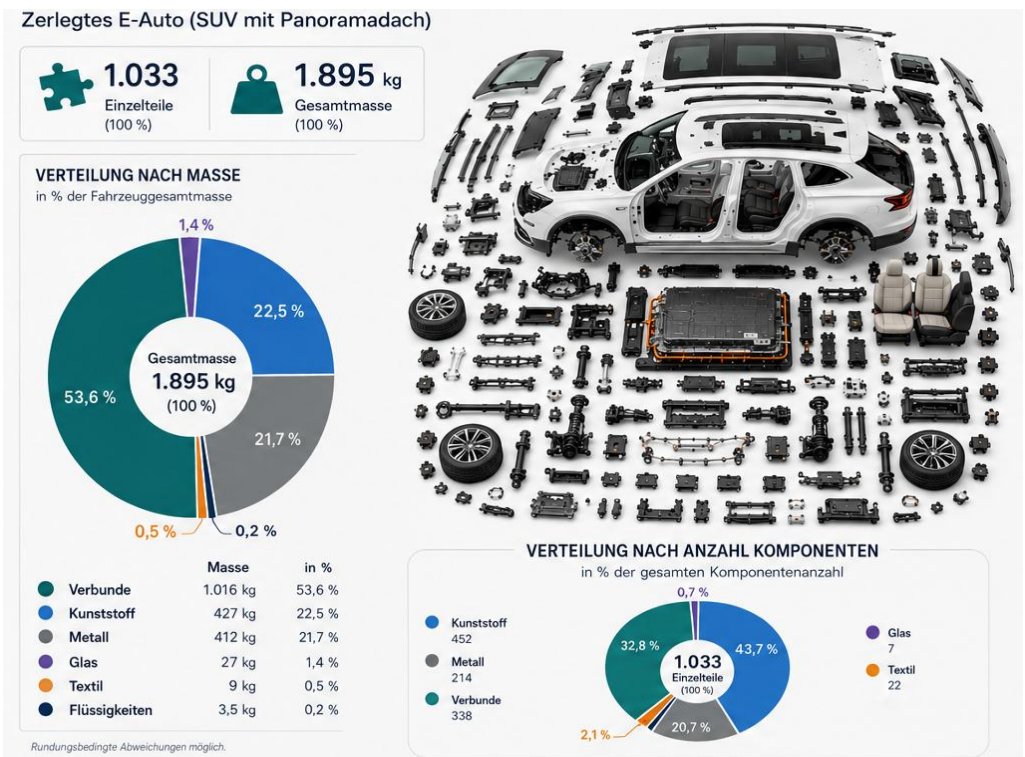


Abb. 4: Komponenten- und Massenbilanz für das zerlegte E-Fahrzeug (*Flüssigkeiten werden nicht als Einzelkomponenten gezählt) (Grafik wurde mit Hilfe von ChatGPT erstellt)

Die dominante Massefraktion stellen – ohne weitere Zerstörung nicht weiter trennbare – Verbundbauteile dar, gefolgt von Kunststoffen und Metallen. In der Teileanzahl überwiegen Kunststoffe vor Verbunden und Metallen. Die Glas- und Textilanteile sind sowohl masse- als auch stückzahlseitig untergeordnet.
Trotz zuvor ausgebauter Traktionsbatterie und der damit verbundenen Entleerung der Kühlschläuche wurden mehr Flüssigkeiten als erwartet vorgefunden (Restkühlmittel sowie Getriebeflüssigkeit). Dies unterstreicht den Bedarf an standardisierten Entleerungsprozeduren auch für E-Fahrzeuge.
Des Weiteren wurde festgestellt, dass für zahlreiche Baugruppen fahrzeugspezifische oder bauteilspezifische Werkzeuge erforderlich waren. Einzelne Demontageschritte (z.B. Herauslösen der Windschutzscheibe aus der Karosserie) erforderten Spezialwerkzeuge und konventionelle Werkstattwerkzeuge waren punktuell unzureichend.
Nach einer persönlichen Einschätzung von Fachpersonal war beim E-Fahrzeug eine höhere Packungsdichte im Motorraum als bei vergleichbaren Verbrennerfahrzeugen feststellbar. Diese Kompaktheit erschwerte den zerstörungsarmen Ausbau einzelner Komponenten aus dem Motorraum und erhöhte die Ausbauzeit. Bestimmte Teile konnten aufgrund der kompakten Bauweise auch nicht ohne Beschädigung entnommen werden. Beispielhaft ist der Sicherungskasten im Motorraum anzuführen, dessen Kabel durchschnitten werden mussten.
Des Weiteren wurde festgestellt, dass das E-Fahrzeug während der Demontage nicht manövrierfähig war (kein Leerlauf, somit nicht rollfähig). Dies hatte Auswirkungen auf den Demontageprozess und erschwerte de facto den Arbeitsablauf.



Abb. 5: Links: Einzelteile des Lenkrads; Rechts: Einzelteile der Innenverkleidung einer hinteren Seitentür

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Selbst bei Verfügbarkeit von zusätzlichen Informationen in Form von z.B. Digitalen Produktpässen (DPP) bleibt noch immer die anspruchsvolle physische Umsetzung der Zerlegung und deren Herausforderungen:
Prozessseitig erschweren generell Werkzeug- und Zugänglichkeitsgrenzen die Demontierbarkeit und beeinflussen direkt das Potenzial für Wiederverwendung und hochwertige stoffliche Verwertung.

Die beobachtete Notwendigkeit an Spezialwerkzeugen, die eingeschränkte Zugänglichkeit in kompakten Bauräumen sowie die temporäre Nicht-Manövrierfähigkeit des Fahrzeugs sind wesentliche Hemmnisse für wirtschaftliche, zerstörungsarme Demontageprozesse. Design-for-Disassembly-Merkmale, standardisierte Schnittstellen und Drainage-/Entleerungskonzepte für Restflüssigkeiten sind zentrale Aspekte, die eigentlich berücksichtigt werden müssten.
Grundsätzlich war die Demontage extrem ressourcenintensiv. Im konkreten Fall wurde das gesamte Fahrzeug in möglichst viele Einzelkomponenten zerlegt. Der Zeitbedarf betrug hierfür 4 Wochen für eine Person bei einer normalen 40-Stunden-Woche. Doch selbst wenn nur bestimmte Bauteile auszubauen sind, ist der Zeitbedarf nicht zu unterschätzen, da häufig viele andere Komponenten ausgebaut werden müssen, um überhaupt zu dieser einen Komponente zu gelangen oder ihren Ausbau zu ermöglichen. Speziell dann, wenn die Komponenten für ReUse-Zwecke gewonnen werden müssen und unbeschädigt bleiben sollen.
Noch schwieriger wird es, wenn Fahrzeuge beschädigt beim Shredderbetrieb einlangen (z.B. Unfallfahrzeuge). Dann wird die Demontage zusätzlich durch Verformungen und Unzugänglichkeiten erschwert.
Auch die im Rahmen dieses Praxistests erhaltenen Ergebnisse zeigen: Design entscheidet maßgeblich über Recycling.

FÖRDERUNG & DANKSAGUNG

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des österreichischen Leitprojektes „KIRAMET“. Das Projekt „KIRAMET – KI-basiertes Recycling von Metallverbundabfällen“ (Projektnummer FO999899661) wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und dem Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) und der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) (FO000900661) gefördert.
Wir möchten der Scholz Austria GmbH ausdrücklich unseren herzlichen Dank für die großartige Unterstützung bei den vorgestellten Forschungsarbeiten aussprechen.

LITERATURVERZEICHNIS

Entwurf AltfahrzeugVO (2023) Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über Anforderungen an die kreislauforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen, zur Änderung der Verordnungen (EU) 2018/858 und (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinien 2000/53/EG und 2005/64/EG, Brüssel, den 13.7.2023, COM(2023) 451 final, 2023/0284(COD).

Fuge, N. (2018) Ökobilanzieller Vergleich von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor - Einflüsse der Recyclingphase auf die Ergebnisse der Ökobilanz. https://www.100pro-erneuerbare.com/publikationen/2018-10-E-Mobil-Umweltbilanz/Fuge-Oekobilanz_E-Mobil_Recycling-2018THK.pdf.

Hanschmann, F. (2025) Sustainability in Automotive: Closing the Loop with End-of-Life Vehicle Disassembly. Masterarbeit an der TU Wien.

Hansen, F., Hochstädt, D., Sauter, A. and Seelig, J.H. (2023) Automatisierte Demontage elektrischer Antriebsaggregate: Herausforderungen und Lösungsansätze. Chemie Ingenieur Technik, 95: 1978-1987. https://doi.org/10.1002/cite.202300085.

Tian, J. & Chen, M. (2014) Sustainable design for automotive products: Dismantling and recycling of end-of-life vehicles. Waste Management, Volume 34, Issue 2, Pages 458-467, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.005.

KONTAKT

Ass.Prof. DI Dr.mont. Alexia Tischberger-Aldrian
Alexia.tischberger-aldrian@unileoben.ac.at
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben

Smart Waste – Process Assessment Supported by Digital Product Passes

Klemens Winkler[1], Felix Strohmeier[2] & Alexia Tischberger-Aldrian[3]
[1)] K1-MET, Area 3 – Simulation and Data Analyses, Linz, Austria
[2)] Salzburg Research Forschungsgesellschaft mbH, Intelligent Connectivity, Salzburg, Austria
[3)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

ABSTRACT: Recycling of complex metal-composite products is increasingly constrained by limited insight into product composition, fragmented data availability, and a potential mismatch in recycling output and market demand. Recent regulatory developments surrounding sustainable products and the introduction of the Digital Product Passport (DPP) provide a foundation for improved data consistency and accessibility. Building on this framework, our approach connects product-related information from DPPs with digital twins of recycling processes and a digital marketplace, enabling a predictive and market-oriented optimization of recycling outcomes. In this concept, detailed material and component data from the DPP are used to generate a digital twin of the incoming waste stream, mapping materials, alloying elements, and hazardous constituents at component and elemental resolution. By coupling this digital representation with a process twin of the recycling plant and integrating both into a marketplace where secondary raw material buyers articulate their specifications, the system can forecast the quality and quantity of potential output fractions before physical processing begins. Optimization algorithms weigh parameters such as expected market price, processing cost, and plant utilization to identify the most beneficial configuration for all stakeholders along the recycling chain.
To realize this vision, reliable and sovereign data sharing is essential. Concerns about proprietary product information from manufacturers and process confidentiality from recyclers remain major barriers, compounded by generally low digitalization within the sector and the recycling process specifically. We propose addressing these challenges in accessing the data by aligning with a standardized, interoperable data space, which provides regulatory alignment and secure and sovereign data exchange mechanisms, and creating a user-friendly Human-Machine Interface (HMI) that demonstrates clear value creation. With these enablers in place, such an integrated optimization environment can significantly enhance transparency, efficiency, and the economic viability of high-quality secondary raw materials. This will drive broader industry adoption and support Europe's transition toward a circular product economy.

1 INTRODUCTION

Steel is a cornerstone of industrial production, enabling applications in construction, mobility, and energy infrastructure. Despite ongoing efficiency improvements, steel production using the Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace (BF-BOF) route remains associated with substantial carbon emissions. Increasing the share of recycled steel has therefore become a key enabler for emission mitigation and resource efficiency. However, the ability to substitute primary material with secondary inputs depends on the availability of scrap with sufficiently high and controllable quality (Davis, et al., 2025).
A central structural problem in today's recycling system is the growing complexity of products placed on the market. Modern steel containing products are increasingly characterized by multi material assemblies, alloyed steels, coatings, and integrated components (Jacobs, et al., 2022). While manufacturers possess detailed knowledge about product composition and material characteristics, this information rarely reaches recyclers (Koppelaar, et al., 2023). Products are typically not designed for efficient recycling, and recyclers are forced to process heterogeneous material streams with limited prior knowledge. Consequently, materials of originally high quality are

often mixed and downcycled, resulting in scrap grades that are unsuitable for use in high quality steel products (Ohno, et al., 2017).
This loss of quality is largely determined upstream in the recycling chain. Once end of life (EOL) products enter shredding and conventional sorting processes, the potential for quality-oriented separation is often limited. Effective recycling of complex products would therefore require informed decisions at early process stages, where dismantling depth, material separation, and routing are defined (Jacobs, et al., 2022).
Recent regulatory developments create a window of opportunity to address this structural deficit. The Ecodesign for Sustainable Products Regulation introduces the Digital Product Passport (DPP) as a standardized mechanism to provide machine readable product information across lifecycles (European Parliament and Council of the European Union, 2024). Against the backdrop of rising carbon costs, declining ore quality, and increased geopolitical uncertainty, DPPs have the potential to fundamentally alter decision-making in recycling through data driven, constraint-based optimization and digital twins, reinforcing the strategic value of secondary raw materials, provided that the information is operationally integrated into recycling processes (Dasika, et al., 2026).
This work explores how DPP-based product information can be connected to digital twins of recycling processes and market-oriented optimization to support process assessment and planning. Rather than evaluating DPPs in general, the focus lies on demonstrating how such data can be structured, modelled, and used to improve early-stage recycling decisions in a realistic, human-in-the-loop setting.

2 PROCESS DESCRIPTION AND CONCEPTUALIZATION

Today's recycling sector can be characterized as highly optimized in terms of throughput and established operations yet constrained by limited access to product specific information. While operator experience enables robust handling of heterogeneous waste streams, systematic use of detailed product knowledge to improve economic and ecological outcomes remains rare (Koppelaar, et al., 2023).
Using EOL vehicles as an example, standardized recycling processes typically involve depollution, dismantling, and downstream shredding and sorting (Schmid, et al., 2016). Decisive impact on final scrap quality is made early in the process, most notably at dismantling and material routing stages, before separation technologies can act (Pérez Horno, et al., 2025), (Johansson & Luttropp, 2009).
Research on parts-based scrap sorting indicates that separating products into a limited number of defined material categories prior to shredding can preserve valuable alloying elements (Ohno, et al., 2017). However, such approaches are rarely implemented in practice due to logistical complexity, space requirements, and uncertainty regarding downstream demand for specialized scrap qualities (Jacobs, et al., 2022).
A central barrier is the information asymmetry between product manufacturers and recyclers. Manufacturers hold detailed data on material composition, often down to elemental resolution, which is rarely available at recycling sites (Berg, et al., 2022), (Koppelaar, et al., 2023). Consequently, recyclers must rely on robust, conservative mixing strategies that favor throughput over material quality, as the limited information constrains targeted separation.
Any digital intervention must therefore respect existing work practices and support, rather than replace, operator expertise. The need is not for automated control, but for decision support that integrates product information, process knowledge, and market constraints in an actionable form.

3 MODELING APPROACH: FROM DPP DATA TO PROCESS AND MARKET OPTIMIZATION

3.1 Product Knowledge Layer Based on Digital Product Passports

In the proposed approach, modelling does not begin at the level of recycling processes, but at the level of structured product information. Product, component, material, and elemental relationships are represented in a graph-based data model, enabling flexible exploration of composition at different levels of granularity.
The key modelling contribution at this layer is the explicit demonstration that real, DPP like data can be ingested, structured, and queried in a form suitable for operational decision support. The product knowledge layer functions as an interface between digital product information and operational recycling decisions. It is not itself a process model but provides structured, reliable inputs for subsequent modelling stages (Dasika, et al., 2026) (Strohmeier, et al., 2026).
The data is provided through a dataspace aligned with Gaia-X principles (Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL, 2026), while its industry-specific realization is implemented via Catena-X standards (Catena-X Automotive Network e.V. , 2026) to enable interoperable and standardized data exchange.

3.2 Waste Stream Digital Twin as a Dynamic Inventory

Building on the product knowledge layer, a digital twin of the waste stream represents the dynamically evolving inventory of physical objects available at a recycling site. Incoming items are registered upon arrival and linked to their digital representations. As materials are selected for processing, their status in the digital representation is updated accordingly.
The waste stream twin is actively maintained by plant personnel and synchronized with physical storage, avoiding unrealistic assumptions of continuous or homogeneous input streams.

3.3 Coupling to the Process Digital Twin

Selected material batches derived from the waste stream twin serve as inputs to a digital twin of the recycling process (Meindl, et al., 2025). This process twin is capable of modeling the recycling plant as a sequence of interconnected process stages, capturing how input composition and process configurations influence output quality, yield, cost, and environmental impact.

3.4 Optimization of Process Paths and Parameters

The process digital twin supports optimization beyond what operators can realistically explore using spreadsheets or manual trial and error (Nguyen Duy, et al., 2026). By evaluating a broad landscape of process paths and parameter configurations, the model can identify beneficial operating points that balance economic and ecological objectives.
Examples include:

- deciding whether to skip or execute optional process stages,
- adjusting process depth in response to market demand,
- selecting parameter sets that minimize carbon expenditure for a given product quality.

This optimization is not intended to replace operator judgement, but to expand the decision space that can be practically assessed.

3.5 Semi-Automated Planning with Human in the Loop

The overall modelling framework is designed as a semi-automated planner. The system proposes material mixtures, process paths, and configurations that satisfy defined constraints and objectives. Human operators analyze these proposals, choose the most appropriate process pathway and carry out the corresponding physical actions.
This design ensures that expert knowledge remains central and that digital tools are perceived as supportive rather than supervisory.

3.6 Representation of Market Constraints

Market requirements enter the modelling framework primarily as hard constraints, such as, minimum or maximum element contents, batch size limits, or product specifications defined by downstream users.
While the current concept prioritizes constraint satisfaction, we envision an expansion of the optimization algorithm to allow for iterative adjustment of batch compositions when constraints cannot be met with available materials. This reflects real world negotiation between recyclers and buyers. Alternatively, the optimization algorithm could be extended to predict 'missing' input materials, thereby enabling targeted procurement strategies for recyclers to meet predefined secondary raw material constraints.

3.7 Identified Sources of Uncertainty

Although the current demonstration uses deterministic data, several sources of uncertainty or limitations to the practical application of the approach were identified in the project. These include incomplete or unreliable DPP information, partial end-of-life products (e.g. damaged vehicles with missing components), logistical limitations of scanning, storing, and handling individual components, or infeasible or impossible disassembly in certain cases. These aspects define the current system boundaries and provide clear directions for future work.

4 RESULTS, CONCLUSIONS, AND OUTLOOK

4.1 Results of the Proof of Concept

The primary result of this work is a concept demonstrating how DPP based product information can be operationally integrated into recycling decision support under the emerging EU regulatory framework.
A demonstrator shows that DPP like data can be automatically ingested and structured in a graph-based model and product level composition data can be translated into batch level inputs suitable for process assessment and process planning supported by optimization algorithms prior to physical processing.

4.2 Scope and Limitations

The work does not demonstrate full automation, large scale deployment, or robustness under incomplete real-world data. Several practical challenges, particularly logistics and integration with established workflows, remain unresolved.
Crucially, successful implementation requires cooperative development with scrap yard operators and workers. Adoption and benefit depend on usability and alignment with existing practices.

4.3 Practitioner Implications

For recycling practitioners, the presented system should be understood as an emerging concept rather than an immediately deployable solution. However, it signals a strategic development that operators should actively monitor, pilot, or codevelop.
Early adopters who succeed in translating DPP based product information into improved material planning and buyer alignment may gain decisive competitive advantages in increasing quality and transparency driven secondary materials markets.

4.4 Outlook: Toward a Marketplace Based Ecosystem

Looking ahead, the presented concepts point toward a platform or marketplace-based extension of recycling systems. The benefits of such a setting would include

- Giving consumers the opportunity of searching for secondary material according to detailed specifications,
- Recyclers could offer material at different processing depths, depending on market demand and
- Bidding mechanisms could signal whether further processing is economically and ecologically justified.

Digital process twins could be hosted on the platform, enabling recyclers to simulate processing options under given market scenarios before committing to physical operations. Material might be offered at an early process stage and, if no buyer is found, it is further refined and reoffered.
This marketplace perspective extends optimization from plant internal decisions to ecosystem level coordination. While clearly beyond the scope of the current proof of concept, it illustrates how DPP enabled transparency, digital twins, and market signals could converge to support more efficient, demand driven, and sustainable recycling value chains.

REFERENCES

Berg, H., Kulinna, R., Stöcker, C., Guth-Orlowski, S., Thiermann, R., & Porepp, N. (2022). Overcoming Information Asymmetry in the Plastics Value Chain with Digital Product Passports. *Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy*, 1-28.

Catena-X Automotive Network e.V. . (26. 05 2026). *Catena-X Automotive Network*. Von Catena-X Automotive Network: https://catena-x.net/ abgerufen

Dasika, M., Rainer, R., Winkler, K., Tischberger-Aldrian, A., & Strohmeier, F. (2026). On the Utilization of Digital Product Passports for Intelligent Metal Sorting and Recycling. *Procedia Computer Science*, 3012-3021.

Davis, C., Li, Z., Styring, P., Curry, R., & Holliman, P. J. (2025). Routes to reducing emissions from steel production. *nature reviews clean technology*, 890-902.

European Parliament and Council of the European Union. (13. June 2024). Regulation (EU) 2024/1781 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products. *Regulation (EU) 2024/1781 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products*. Brussels, Brussels metropolitan area, Belgium: Official Journal of the European Union.

Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL. (26. 05 2026). *Gaia-X. A federated secure data infrastructure.* Von Gaia-X. A federated secure data infrastructure.: https://gaia-x.eu/ abgerufen

Jacobs, C., Soulliere, K., Sawyer-Beaulieu, S., Sabzwari, A., & Tam, E. (2022). Challenges to the Circular Economy: Recovering Wastes from Simple versus Complex Products. *Sustainability*, 1-17.

Johansson, J., & Luttropp, C. (2009). Material hygiene: improving recycling of WEEE demonstrated on dishwashers. *Journal of Cleaner Production*, 26-35.

Koppelaar, R. H., Pamidi, S., Hajósi, E., Herreras, H., Leroy, P., Jung, H.-Y., . . . Fontana, A. (2023). A Digital Product Passport for Critical Raw Materials Reuse and Recycling. *Sustainability*, 1-21.

Meindl, S., Nguyen Duy, D., Fonseca Diaz, V., Tischberger-Aldrian, A., & Rainer, R. (2025). Smart Twin: Ein Bayesisches Framework für die probabilistische Modellierung von mehrstufigen industriellen Prozessen. 1-14.

Nguyen Duy, D., Meindl, S., Fonseca Diaz, V., Rainer, R., & Tischberger-Aldrian, A. (2026). Gewinn und Nachhaltigkeit in der Abfallwirtschaft: Ein Multi-Objektiv Digital-Twin-Ansatz. 1-13.
Ohno, H., Matsubae, K., Nakajima, K., Kondo, Y., Nakamura, S., Fukushima, Y., & Nagasaka, T. (2017). Optimal Recycling of Steel Scrap and Alloying Elements: Input-Output Based Linear Programming Method with Its Application to End-of-Life Vehicles in Japan. *Environmental Science & Technology*, 13086-13094.
Pérez Horno, B., Feldmann, A., & Samuelsson, P. (2025). Mapping the dynamics shaping the future of steel recycling. *Discover Sustainability*, 1-23.
Schmid, A., Batton-Hubert, M., Naquin, P., & Gourdon, R. (2016). Multi-Criteria Evaluation of End-of-Life Vehicles' Dismantling Scenarios with Respect to Technical Performance and Sustainability Issues. *Resources*, 1-15.
Strohmeier, F., Dasika, M., Rainer, R., Winkler, K., & Tischberger-Aldrian, A. (2026). Digitaler Produktpass – Chancen für die Abfallwirtschaft. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 1-8.

FUNDING

The project "*KIRAMET – KI-basiertes Recycling von Metallverbundabfällen*" (project number FO999899661) is supported by the Austrian Research Promotion Agency (FFG) and the Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology (BMK).

CONTACT

DI Dr. Klemens Winkler
Klemens.winkler@k1-met.com
+43 664 88 95 86 81
Area 3 – Simulation and Data Analyses
K1-MET GmbH
Metallurgisches Kompetenzzentrum https://www.k1-met.com/

Sortierung E40-Schrott

Gerald Koinig[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Department für Umwelt- und Energieverfahrenstechnik, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: In diesem Beitrag wird gezeigt, wie kupferhältige Partikel in einer Shredderfraktion mittels Convolutional Neural Networks erkannt werden können. Hierzu wurden CNN-basierte Objektdetektorarchitekturen herangezogen. Die Versuche zeigten, dass ein auf Computer Vision basierendes Klassifikationsmodell trainiert werden kann, um kupferhaltige Partikel zu erkennen. Aufgrund der unvermeidlichen Inhomogenität von Abfallpartikeln war jedoch ein großer und vielfältiger Trainingsdatensatz erforderlich. Nachdem rostige Partikel in den Datensatz aufgenommen worden waren, erreichten die Modelle Reinheiten von 99,907 Gew.-%.

1 EINLEITUNG

Der Übergang von der Stahlerzeugung über die konventionelle Hochofenroute hin zu Elektrolichtbogenöfen steht unmittelbar bevor. Dieser gegenwärtige Übergang könnte den enormen Energiebedarf und die CO_2-Emissionen verringern, die mit der Stahlerzeugung einhergehen (ASISI, 2025; Griffin et al., 2019; IEA, 2020a, 2020b; IEEFA, 2022; KEI, 2022; Spreitzer & Schenk, 2019). Die mit diesem Übergang verbundenen ökologischen Vorteile bringen jedoch auch besondere Herausforderungen mit sich, die der Stahlerzeugung aus Schrott über die Elektrolichtbogenofen-Route (EAF-Route) inhärent sind. Eine dieser Herausforderungen sind die im Schrott enthaltenen Tramp-Elemente (Nakajima et al., 2010). Insbesondere Kupfer (Cu) zählt aufgrund seiner nachteiligen Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des erzeugten Stahls zu diesen unerwünschten Elementen. So legt die EN 10025-2:2019 bereits Grenzwerte für den Kupfergehalt in gängigen Baustählen fest, z. B. 0,60 Gew.-% für S235 (ASISI, 2025). Stähle, die für anspruchsvollere Anwendungen ausgelegt sind, unterliegen weniger großzügigen Grenzwerten: Feinblech für die Automobilindustrie erfordert 0,20 Gew.-%, Tiefziehstahl 0,06 Gew.-%. Da Kupfer während der EAF-Erzeugung weder in die Gasphase noch in die Schlackephase übergeht, besteht die einzige Möglichkeit zur Verringerung des Kupfergehalts darin, kupferhaltige Partikel aus dem Eingangsstrom zu entfernen oder den eingesetzten Schrott mit Primärstahl zu verdünnen (Nakajima et al., 2010; Hiraki et al., 2011). Neben seiner nachteiligen Wirkung auf die Stahlqualität ist Kupfer im EU Critical Raw Materials Act sowie in der US-amerikanischen Liste strategischer Rohstoffe aufgeführt (EU 2023; U.S. Department of Energy, 2023). Diese Einstufung ist teilweise auf die entscheidende Rolle von Kupfer bei der Energiewende zurückzuführen (Gregoir & van Acker, 2022). Da die Kupfernachfrage das Angebot übersteigt, gewinnt es zunehmend an Bedeutung, unnötige Verluste an minderwertigen Stahl zu vermeiden (Elshkaki et al., 2016; Wellmer & de Hagelüken, 2015).

Diese Arbeit stellt einen auf Computer Vision basierenden Ansatz zur Detektion kupferhaltiger Partikel in Post-Shredder-Schrottfraktionen vor. Die Methode ist so ausgelegt, dass sie robust gegenüber wechselnden Lichtverhältnissen, Unterschieden in der Materialdarbietung sowie Verunreinigungen wie Rost oder Oxidation ist. Darüber hinaus wird die eingesetzte Deployment-Pipeline für auf Computer Vision basierende Objektklassifikationsmodelle, die auf Umgebungen der Abfallwirtschaft zugeschnitten ist, beschrieben. Diese Pipeline umfasst ein halbautomatisches Annotationswerkzeug, das im Rahmen dieser Arbeit zur Erleichterung der Annotation entwickelt wurde (Koinig et al., 2025). Ferner beinhaltet sie die entwickelte offene Steuerungsschnittstelle, die es Hochdruckdüsenbalken, Klassifikationsmodellen und Industriekameras ermöglicht, zu kommunizieren und die Objektausschleusung auf Grundlage der Klassifikationsergebnisse des Modells zu koordinieren.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Schrottmaterial

Der Post-Shredder-Schrott wurde direkt einer Aufbereitungsanlage (Material Recovery Facility) in Österreich entnommen. Das Material wurde nach dem Shreddern nicht weiter aufbereitet. Für spätere Inline-Tests wurden 500 kg Material zurückgestellt. Diese Trennung stellte sicher, dass kein Datenleck (Data Leakage) auftrat und dass die Modelle an vollständig ungesehenen Partikeln evaluiert werden konnten — also an Partikeln, die zu keinem Zeitpunkt in irgendeinem Teil des Trainingsprozesses erfasst oder verwendet wurden. Ein Teil des Materials war stark korrodiert, während andere Partikel in trockener Umgebung gelagert worden waren, was eine Korrosion verhinderte. Diese Variation führte zu einer zusätzlichen Heterogenität im Erscheinungsbild des Materials und spiegelt reale Inkonsistenzen wieder, wie sie etwa durch logistische Handhabung oder Lagerbedingungen entstehen.

2.2 Bildaufnahme

Über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren wurde kontinuierlich Material aus der Aufbereitungsanlage entnommen und aufgezeichnet. Dadurch wurde sichergestellt, dass Veränderungen am Förderband, an der Beleuchtung sowie sonstige Veränderungen, die über solche Zeiträume zwangsläufig auftreten, in die Trainingsdaten einfließen. Die Bilder wurden mit einer Basler ace 2 a2A2448-23gcPRO Industrie-RGB-Kamera (Basler AG, Deutschland) aufgenommen.

2.3 Berechnungshardware

Das Modelltraining wurde auf einem PC durchgeführt, der mit einem AMD Ryzen 9 9950X 16-Core-Prozessor (Advanced Micro Devices, Inc., USA) und einer Nvidia GeForce RTX 5090 GPU (Nvidia, USA) ausgestattet war. Die gesamte Programmierung erfolgte mit Python 3.10.9.

2.4 Klassifikationsplatform

Die für diese Versuche erstellte Prototyp-Sortierplattform umfasst die erwähnte Industriekamera, eine Sensorbrücke zur Montage von Kameras und Beleuchtung sowie einen Hochdruckdüsenbalken mit 128 Düsen und einem maximalen Ausschleusdruck von 7,5 bar. Die Basis dieses Prototyps bildet ein Förderband mit einer Länge von 4 m und einer Breite von 0,8 m. Die maximale Bandgeschwindigkeit beträgt 0,8 m/s. Ein Nvidia Jetson ORIN 64GB Development Kit bildet den Kern dieses Aufbaus. Auf ihm läuft das Steuerungsprogramm, das die Bildaufnahme, die Inferenz, die Visualisierung (GUI) und die Ansteuerung des Hochdruckdüsenbalkens steuert. Der Jetson ORIN wurde aufgrund seines kompakten Formfaktors und seines geringen Energiebedarfs ausgewählt. Im Betrieb nimmt er eine Leistung von 25 W auf, während er alle erforderlichen Aufgaben ausführt, und erreicht Inferenzlatenzen von etwa 5 ms/Bild. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des eingesetzten Prototyps.

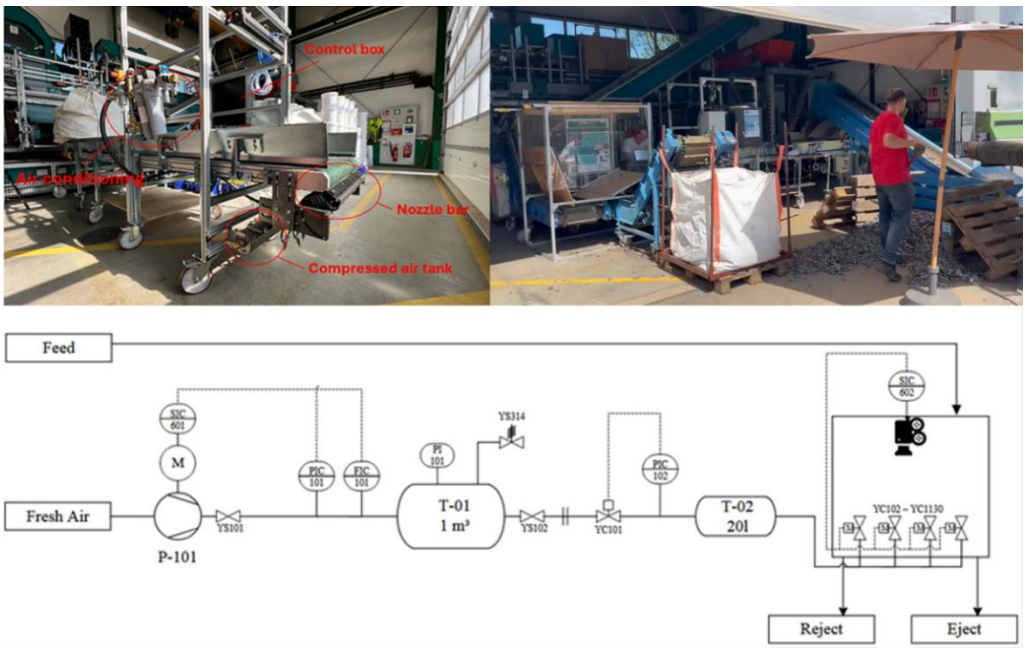


Abb. 1: PID Diagram sowie Schema der Austragseinheit sowie Versuchsaufbau während großtechnischer Sortierversuche zur Sortierung von 20t Post-Shredder Schrottx

2.5 Model Training

Die aufgenommenen Bilder wurden mithilfe des halbautomatischen Computer-Vision-Annotationswerkzeugs annotiert. Anschließend wurden sie in einem Verhältnis von 80/20 in einen Trainings- und einen Validierungsdatensatz aufgeteilt. Als Basismodelle wurden alle Größen von YOLOv8 und YOLOv11 verwendet (Jocher et al., 2023). Zur Verbesserung der Modellkonvergenz und der Vorhersagegenauigkeit wurde ein Hyperparameter-Tuning durchgeführt. Um die Inferenzlatenz des besten Modells nach dem Training zu verringern, wurden nach der Auswertung von Class Activation Maps überflüssige Schichten entfernt. Zur weiteren Reduzierung der Inferenzzeit wurden die Modelle in das „.engine“-Format konvertiert und quantisiert.

2.6 Model Evaluation

Obwohl die Modelle während der Validierung recht gut abschnitten und gute Mean-Average-Precision-Werte aufwiesen, wurde ihre Leistung in realen Inline-Versuchen evaluiert. Hierfür wurde das abgetrennte Material von 500 kg verwendet und auf dem Prototyp aufgegeben. Als kupferhaltig erkannte Partikel wurden mit dem Hochdruckdüsenbalken ausgeschleust. Die Versuche wurden in einer Rougher-Cleaner-Cleaner-Anordnung aufgebaut, um die zulässigen Kupfergehalte zu erreichen.

Bei nachgehenden Analyse des Sortiererfolges wurden alle noch in der Eisenfraktion verbliebenen kupferhaltigen Partikel entfernt und gewogen. Dies ergab die Masse der kupferhaltigen Partikel, die die Eisenfraktion noch verunreinigten. Mit diesem Vorgehen sollte eine konservative Abschätzung des Kupfergehalts der Eisenfraktion gewonnen werden. Diese konservative Abschätzung wurde gewählt, um auch legiertes Kupfer einzubeziehen, das während dieser Versuche nicht gemessen werden konnte.

3 RESULTATE

3.1 Modellvergleich

Aus allen verglichenen Modellen ergab sich YOLOv8 medium als geeigneteste Variante. Dieses Modell erreichte auf das unabhängige Testset eine mAP@500-95 von 0.79. Während des Vergleichs wurde ein bei zunehmender Modellgröße häufig auftretendes Phänomen beobachtet. Eine Vergrößerung des Modells von Nano auf Medium verbessert die Leistung der Modelle, während die beiden größten Modelle, YOLOv8l und YOLOv8x, eine geringfügig niedrigere Mean Average Precision aufweisen. Dies deutet darauf hin, dass YOLOv8m ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Modellkomplexität und der Komplexität der Klassifikationsaufgabe herstellt. Es verfügt über genügend trainierbare Parameter, um die Komplexität der Kupferpartikel abzubilden, ist aber zugleich klein genug, um eine Überanpassung (Overfitting) zu vermeiden und innerhalb der zur Verfügung stehenden Trainingsepochen effektiv trainiert werden zu können.

3.2 Sortierversuche

Die Versuche zeigten, dass ein auf Computer Vision basierendes Klassifikationsmodell trainiert werden kann, um kupferhaltige Partikel zu erkennen. Aufgrund der unvermeidlichen Inhomogenität von Abfallpartikeln war jedoch ein großer und vielfältiger Trainingsdatensatz erforderlich. Nachdem rostige Partikel in den Datensatz aufgenommen worden waren, erreichten das Modell eine Reinheit von 99,907 Gew.-%. Es ist anzumerken, dass sich diese Reinheit auf Partikel bezieht, das heißt, dass jedes kupferhaltige Partikel entsprechend seinem Gewicht vollständig als Kupfer gewertet wurde. Mit anderen Worten: Ein Kupferkabel mit einem Gewicht von 100 g — einschließlich Isolierung, Polymeren und Kupferdrahtlitzen — wurde als 100 g Kupfer gezählt. Die Untersuchung des Einflusses der Durchsatzrate auf die Reinheit zeigte, dass diese nur geringen Einfluss auf die je Sortierschritt erreichbare Reinheit hat, sofern die Belegungsdichte auf einem ähnlichen Niveau gehalten werden konnte. Allerdings konnten selbst bei niedrigen Durchsätzen hohe Belegungsdichten zu katastrophalen Sortierergebnissen führen.

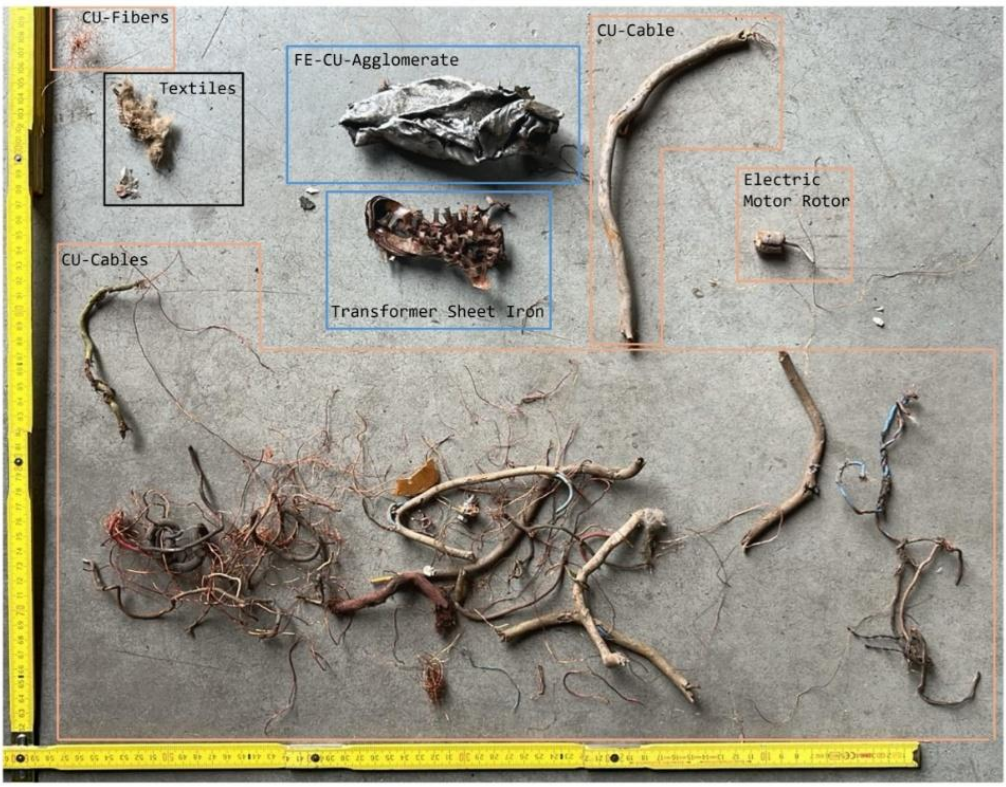


Abb. 2: Übrige Kupferpartikel aus der FE-Fraktion nach manueller Kontrolle des Sortiererfolges

4 DISKUSSION UND AUSBLICK

Die vorgestellte Arbeit zeigt die Anwendbarkeit von Objektdetektionsmethoden in Szenarien der Abfallwirtschaft, sofern geeignete Aufgabenstellungen vorliegen. Die vorgeschlagene Lösung darf jedoch nicht als Allheilmittel für sämtliche Herausforderungen betrachtet werden, mit denen die Metallrecyclingbranche gegenwärtig konfrontiert ist, auch wenn sie eine sinnvolle Ergänzung zu anderen Sortierverfahren darstellen kann. Darüber hinaus könnten die vorgeschlagene Pipeline zur Erstellung Vision-basierter Klassifikatoren sowie die vorgeschlagene offene Sortiersteuerungssoftware in Kombination mit dem auf die Abfallwirtschaft zugeschnittenen Annotationswerkzeug weitere Studien mit unterschiedlichen Abfallströmen ermöglichen, z. B. das Sortieren von Textilien, von lebensmittelechten gegenüber nicht lebensmittelechten Verpackungen oder sogar von mineralischen Abfällen.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes “KIRAMET”, gefördert durch das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie(FFG No.: FO 999899661) erstellt.
Weiters gebührt der Scholz Austria GmbH Dank für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit und für den zur Verfügung gestellten Kupfer- und Eisenschrott.

LITERATURVERZEICHNIS

Austrian Standards International Standardisierung und Innovation. (n.d.). Hot rolled products of structural steels — Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels EN 10025-2 ICS 77.140.10; 77.140.45; 77.140.50.

de Boer, M., Frascati, G., Khawsam-ang, M., Riaz, H., Kim, H. R., & Wagner, G. (n.d.). Decarbonizing steel. Columbia Business School. https://business.columbia.edu/sites/default/files-efs/imce-uploads/CKI/Documents/CKI%20Steel-241017.pdf

Elshkaki, A., Graedel, T. E., Ciacci, L., & Reck, B. K. (2016). Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. Global Environmental Change, 39, 305–315. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.06.006

European Union. (2023). Fifth list of critical raw materials for the EU. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en#fifth-list-2023-of-critical-raw-materials-for-the-eu

Gregoir, L., & van Acker, K. (2022). Metals for clean energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge. https://eurometaux.eu/metalscleanenergy

Griffin, P. W., & Hammond, G. P. (2019). Analysis of the potential for energy demand and carbon emissions reduction in the iron and steel sector. Energy Procedia, 158, 3915–3922. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.85

Hiraki, T., Takeda, O., Nakajima, K., Matsubae, K., Nakamura, S., & Nagasaka, T. (2011). Thermodynamic criteria for the removal of impurities from end-of-life magnesium alloys by evaporation and flux treatment. Science and Technology of Ad-vanced Materials, 12(3), 035003. https://doi.org/10.1088/1468-6996/12/3/035003

IEA (2020), Iron and Steel Technology Roadmap, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap, Licence: CC BY 4.0. Last accessed on: 03.11.2025

IEA (2020), The Challenge of reaching zero emissions in heavy industry, IEA, Paris https://www.iea.org/articles/the-challenge-of-reaching-zero-emissions-in-heavy-industry, Licence: CC BY 4.0. Last accessed on: 03.11.2025

Institute for Energy Economics and Financial Analysis. (2022). Steel fact sheet. https://ieefa.org/sites/default/files/2022-06/steel-fact-sheet.pdf

Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI), ein Geschäftsbereich der Zukunft – Umwelt – Ge-sellschaft (ZUG) gGmbH – im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (2022). Auf dem Weg zur klimaneutralen Industrie: Stahl. https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/kei/Dateien/Publikationen/KEI_Factsheet_Stahl.pdf

Nakajima, K., Takeda, O., Miki, T., Matsubae, K., Nakamura, S., & Nagasaka, T. (2010). Thermodynamic analysis of contami-nation by alloying elements in aluminum recycling. Environmental Science & Technology, 44(14), 5594–5600. https://doi.org/10.1021/es9038769

Spreitzer, D., & Schenk, J. (2019). Reduction of Iron Oxides with Hydrogen—A Review. Steel Research International, 90(10). https://doi.org/10.1002/srin.201900108

U.S. Department of Energy. (2023). Critical materials assessment 2023. https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-05/2023-critical-materials-assessment.pdf

Wellmer, F.-W., & Hagelüken, C. (2015). The feedback control cycle of mineral supply, increase of raw material efficiency, and sustainable development. Minerals, 5(4), 815–836. https://doi.org/10.3390/min5040527

From Truck Bed to Chemistry: Benchmarking Segmentation Algorithms for Accurate Scrap Characterization in Sustainable Steelmaking

Florian Egger[1], Klemens Winkler[1], Bernard Ennis[2] & Frank Schrama[2]
[1)] K1-MET GmbH, Linz, Austria
[2)] Tata Steel, IJmuiden, Netherlands

ABSTRACT: The transition to sustainable steelmaking requires a significant increase in scrap utilization, making accurate characterization of Heavy Melting Scrap (HMS) more critical than ever. Elements such as copper and sulfur negatively affect steel quality and process efficiency, limiting the production of high-grade steels. To address this in the EU Horizon funded Project DiGreeS, we propose a method that combines image-based segmentation with Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) to link chemical measurements to individual scrap pieces within truck-load images. This enables piece-level aggregation of LIBS data, providing a reliable estimation of each component's chemistry rather than isolated point measurements.
A major challenge lies in segmenting contiguous pieces of irregularly shaped, visually complex scrap, where labelled datasets are scarce and manual annotation is impractical. We therefore systematically evaluated commercially available segmentation algorithms and frameworks for this task. Conventional models trained on Common Objects in Context (COCO) datasets proved unsuitable for metallic scrap surfaces, while the Segment Anything Model (SAM) delivered the most usable segmentation masks. SAM is not designed for the specific demands of HMS instance segmentation. Consequently, we applied post-processing refinements, including duplicate removal, region merging, and threshold optimization, to further improve segmentation quality. These findings demonstrate that, with targeted optimization, SAM offers a viable foundation for piece-level scrap identification and subsequent chemical characterization, marking an important step toward automated scrap analysis and enabling greener steelmaking practices.

1 INTRODUCTION

The ongoing transition toward more sustainable steel production requires a substantial increase in scrap utilization, particularly in electric arc furnace (EAF)-based processes (World Steel Association, 2021). However, the efficient use of scrap is strongly constrained by its highly heterogeneous composition and the presence of tramp and residual elements such as copper and sulfur, which adversely affect steel quality and limit the production of high-grade products.
Previous studies have shown that elevated copper concentrations can lead to hot shortness and surface defects, while sulfur negatively impacts ductility and toughness, thereby reducing process efficiency and product performance (Daehn, 2018).
At present, the characterization of HMS in industrial practice is largely based on visual inspection by experienced operators, complemented by selective, local measurements using handheld X-ray fluorescence (XRF) devices. While these approaches are widely used, they are inherently limited in terms of reproducibility, spatial representativeness, and operator dependency. In particular, local measurements cannot adequately capture the spatial heterogeneity of scrap pieces within a truck load, resulting in uncertain estimations of the overall chemical composition (Ntourntoureka, 2023).
To overcome these limitations, this work proposes a novel approach that combines image-based segmentation with Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) to enable piece-level characterization of HMS. By linking spatially resolved LIBS measurements with segmented HMS objects in two-dimensional images, the method allows aggregation of chemical data at the level of individual scrap pieces rather than relying on isolated measurement points. LIBS has been demonstrated as a rapid and multi-elemental analysis technique suitable for metallurgical applications,

offering significant advantages in terms of speed and flexibility compared to traditional methods (Noll, 2012).
The proposed methodology consists of several complementary processing steps. First, two-dimensional images of the HMS load obtained by a visual camera are processed using advanced segmentation algorithms to identify and distinguish individual scrap pieces. This step is particularly challenging due to the irregular geometry of HMS, strong visual similarity between pieces, reflective metallic surfaces, and shadowing effects, all of which complicate robust instance segmentation. In addition, the lack of annotated datasets for this domain limits the applicability of supervised learning approaches.
In parallel, chemical composition is determined using LIBS measurements, providing rapid, spatially resolved elemental information. Subsequently, the extracted geometric and chemical information is fused and provided to the operator via a human–machine interface (HMI), enabling intuitive visualization of scrap composition at the piece level. This integrated approach aims to support operator decision-making, improve sorting efficiency, and ultimately reduce impurity levels in the steelmaking process.
A key focus of this study is therefore the evaluation of segmentation methods for HMS detection under realistic industrial conditions. Various state-of-the-art segmentation approaches were assessed with respect to their suitability for this application. Conventional models trained on generic datasets such as COCO were found to perform inadequately due to the domain mismatch.
In contrast, the Segment Anything Model (SAM) (Kirillov, 2023) showed promising results despite not being specifically designed for metallic scrap segmentation. To further enhance performance, dedicated post-processing steps, including mask refinement, duplicate removal, and region merging, were applied (see section 2).
Overall, this work contributes to the development of automated HMS characterization systems by demonstrating the feasibility of combining image-based segmentation with spectroscopic analysis. The approach represents an important step toward data-driven and operator-friendly scrap assessment, thereby supporting more efficient and sustainable steelmaking.

2 RESULTS

2.1 Advanced segmentation procedure

For the segmentation of Heavy Melting Scrap (HMS) pieces within the truck bed, a wide range of segmentation algorithms was systematically evaluated. Given the limited data available, training a dedicated neural network specifically for this task was not pursued. Consequently, the focus was placed on the assessment and application of existing, general-purpose segmentation models.

Most of the evaluated segmentation algorithms were originally trained on the COCO dataset and therefore showed limited suitability for detecting scrap pieces in truck bed images.
An example of a typical input image is shown in Fig. 1. The corresponding segmentation results obtained using a Mask R-CNN R50-FPN model are presented in Fig. 2.



Fig. 1: Original image of scrap pieces in a truck bed.



Fig. 2: Segmented masks of scrap pieces in a truck bed via Mask R-CNN R50-FPN model.

As illustrated in Fig. 2, the model fails to achieve a meaningful segmentation of individual scrap pieces. Using the default confidence threshold, no relevant detections are obtained. When the threshold is reduced, the model begins to detect certain regions; however, these correspond to large, indistinct clusters rather than discrete scrap objects.
Furthermore, the detections are highly inconsistent, as the model assigns these regions to unrelated object categories such as person, bird, chair, or boat. This behavior highlights the strong domain mismatch between COCO-trained models and the visual characteristics of metallic scrap, resulting in poor generalization performance.
It became evident at an early stage that algorithms trained on the COCO dataset did not yield satisfying results for this application. In contrast, the initial results obtained using the SAM algorithm appeared promising. An example of the initial SAM-based segmentation using the image in Fig. 1 is shown in Fig. 3.



Fig. 3: Segmented masks of scrap pieces in a truck bed via SAM.

As illustrated in Fig. 3, SAM is capable of identifying relevant structures within the scrap load. However, only a limited number of individual scrap pieces are correctly segmented at this stage. The resulting masks indicate that, while the model captures the general spatial distribution of scrap material, the instance-level separation remains incomplete. This highlights both the robustness of SAM in a zero-shot setting and the need for additional post-processing to achieve reliable piece-level segmentation.
A comparison of different SAM model variants revealed no substantial performance differences regarding segmentation between the smaller vison transformer-base (ViT-B) model and the larger vison transformer-huge (ViT-H) model for this application. However, as the ViT-H model consistently produced slightly improved segmentation results, it was selected for all subsequent processing steps.
SAM initializes the segmentation process based on reference points, typically located near the center of the image, with the option to manually adjust the position of these reference points. To exploit this capability, enabling a more comprehensive coverage of the image, a grid covering most of the image area was generated, and the segmentation procedure was executed iteratively for each grid point rather than being applied only once per image.
This grid-based approach significantly improved the spatial coverage of the segmentation and increased the number of detected scrap pieces. However, it also introduced a large number of duplicate and overlapping masks, as the same regions were segmented multiple times from different reference points.
Initial results obtained using this grid-based segmentation strategy are shown in Fig. 4.



Fig. 4: Segmented masks of scrap pieces in a truck bed via SAM with raster segmentation. Masks as overlay onto the original image.

As illustrated in Fig. 4, the proposed approach allows the detection of the majority of visible scrap pieces, demonstrating the effectiveness of the grid-based initialization. At the same time, the high number of overlapping and redundant masks highlights the necessity of subsequent post-processing steps to obtain consistent instance-level segmentation.
The grid-based segmentation approach led to a substantial increase in overall computational runtime due to the repeated execution of the segmentation process across multiple reference points. However, fast processing is essential for practical implementation at a steel plant scrapyard as receiving inspection, as there is only a limited time window available while trucks remain in the waiting area.
To address this constraint, efforts were focused on improving computational performance. This was achieved through parallelization of the segmentation workflow and by evaluating different hardware configurations.
A noticeable reduction in processing time was observed when utilizing more powerful central processing units (CPUs). An even more significant performance gain was achieved by offloading the computation to a graphics processing unit (GPU), enabling substantially faster execution of the segmentation pipeline.

Tab. 1: Computational performance for CPU and GPU.

Machine	System	Processing Unit	Model	Time [s]
Notebook Computer	Windows 11	CPU: 12th Gen Intel® Core™ i7-1270P	vit_h	~ 120 - 150
Desktop Workstation	Linux - Ubuntu 24.04	CPU: AMD® Ryzen 7 5800x 8-core processor x 16	vit_h	~ 50 - 60
Desktop Workstation	Linux - Ubuntu 24.04	GPU: NVIDIA GeForce RTX 3090	vit_h	~ 15 - 20

Despite the previous improvements, the segmentation results still contained a large number of small masks as well as a significant amount of duplicate and overlapping detections. These artefacts limited the usability of the segmentation for reliable instance-level analysis.
To address these issues, additional post-processing steps were applied. These included merging spatially clustered masks, removing small and isolated segments, and identifying as well as eliminating redundant overlapping detections.
The resulting segmentation quality after these refinements is illustrated in Fig. 5.



Fig. 5: Segmented masks of scrap pieces in a truck bed via SAM with raster segmentation and post-processing. Masks as overlay onto the original image.

As shown in Fig. 5, the applied post-processing significantly improves the coherence of individual scrap pieces and reduces the number of spurious detections. The segmentation output is

therefore substantially more suitable for subsequent analysis steps, particularly for linking geometric information with LIBS-based chemical measurements at the object level.
The results demonstrate that the publicly available SAM enables effective segmentation of HMS pieces within the truck bed.

2.2 Merging of Segmentation and LIBS results

A final step of the laboratory trials involved the fusion of measurement data obtained from the LIBS system with the segmentation results. For this purpose, a human–machine interface (HMI) was developed (Fig. 6), designed to serve as an operator-oriented visualization and analysis tool in later project phases.
The interface combines the original image with several complementary visual representations, enabling an intuitive assessment of both geometric and chemical information. The available visualization modes include:

- Segmentation mask image
- Original image with a semi-transparent mask overlay
- LIBS scan path and measurement points
- Three-dimensional image representation

In addition, individual segmentation masks can be interactively inspected by hovering over them, revealing associated object-specific information such as:

- Object ID
- Area
- Center coordinates
- Elemental composition in terms of mass percentage

Furthermore, the interface provides aggregated information, including the overall calculated elemental composition of the analyzed scrap load. This integrated visualization approach enables a direct correlation between spatially resolved segmentation data and corresponding chemical measurements, significantly enhancing the interpretability and usability of the results for operator decision-making.



Fig. 6: Image of HMI interface of original image with a semi-transparent mask overlay.

3 CONCLUSION

This work demonstrates the potential of combining image-based segmentation with LIBS measurements for enhanced characterization of HMS under realistic industrial conditions. A systematic evaluation of different segmentation approaches revealed that conventional models trained on generic datasets, such as COCO, are not suitable for this application due to the strong domain mismatch with metallic scrap surfaces.

In contrast, the SAM showed promising performance, even without task-specific training. While the initial segmentation results required further refinement, the application of a grid-based sampling strategy and dedicated post-processing steps—such as duplicate removal, region merging, and noise filtering—enabled reliable detection of the majority of scrap pieces within truck bed images. At the same time, the implementation of GPU-based processing significantly reduced computation times, highlighting the feasibility of near real-time application in an industrial environment.

A key contribution of this work lies in the successful fusion of segmentation results with LIBS-based chemical measurements. By linking spatially resolved detection of scrap objects with corresponding elemental composition data, the proposed approach enables piece-level aggregation of chemical information. The developed HMI further supports this integration by providing an intuitive visualization of both geometric and chemical data, thereby improving interpretability and supporting operator decision-making.

Despite these advances, challenges remain, particularly in the accurate segmentation of small components, reflective surfaces, and shadow-affected regions. Future work will therefore focus on further improving segmentation robustness, integrating domain-specific refinements, and extending the system toward fully automated, large-scale deployment.

Overall, the presented approach represents a significant step toward automated, data-driven scrap characterization and contributes to enabling more efficient HMS utilization in sustainable steelmaking processes.

REFERENCES

Daehn, K. E. (2018). How will copper contamination constrain future global steel recycling? Environmental Science & Technology.

Kirillov, A. (2023). Segment Anything. Paris, France (ICCV 2023): IEEE / Computer Vision Foundation (CVF).

Noll, R. (2012). *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: Fundamentals and Applications.* Heidelberg, Germany: Springer.

Ntourntoureka, A. (2023). An Assessment of Hand-Held XRF Analyser Performance for the Characterisation of Aluminium Scrap. *Materials Proceedings*, p. 25.

World Steel Association. (2021). *Scrap Use in the Steel Industry.* World Steel Association: Brussels, Belgium.

ACKNOWLEDGMENT

The DiGreeS project is funded by the European Union in the Horizon EUROPE program within CSP under grant agreement no. 101178079. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Funded by
the European Union

Applying Statistical Process Control (SPC) to Sensor-Based Monitoring of Mobile Construction Demolition Waste (CDW) Streams

Luz Alejo[1], Lieve Göbbels[1], Alexander Feil[1], Karoline Raulf[1] & Kathrin Greiff[1]
[1)] Chair of Anthropogenic Material Cycles, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

ABSTRACT: The open-air, dynamic environment of mobile construction demolition waste (CDW) plants introduces fluctuating lighting conditions that can degrade input image quality and propagate misclassifications when sensor-based monitoring together with AI-based data-driven models are applied. This work proposes a Statistical Process Control (SPC) framework based on an Exponentially Weighted Moving Variance (EWMV) control chart to monitor light intensity stability of the input data in real time. The univariate, recursive nature of the method entails minimal computational overhead and memory requirements, making it well-suited for online deployment. Future work should explore multivariate extensions leveraging inter-channel RGB correlations and adaptive smoothing parameters responsive to environmental regimes.

1 INTRODUCTION

Sensor-based quality assurance is still emerging in CDW processing (Müller & Martins, 2022). The scoping review by (Göbbels et al., 2025) identified 31 sensor families across 364 studies, with visual imaging (RGB, CCD*, CMOS* color cameras) and infrared spectroscopy being the most common. While sensor-based monitoring in mobile CDW plants is still at a research stage, recent studies increasingly investigate the use of RGB sensors (RGB, RGB-D and RGB-D cloud point) to discriminate material fractions before downstream crushing, screening, or sorting (Dodampegama et al., 2024). The reliability of the subsequent sorting decisions is directly linked to the quality of the raw image data entering the data-driven pipeline. A principal obstacle is the demolition-site environment itself, as fluctuating lighting conditions, dust, and mechanical vibrations directly degrade the image data feeding RGB camera-based quality monitoring systems (Göbbels et al., 2025; Su et al., 2023). When such fouled input data remains in the processing pipeline, this leads to further cascading into mis-classifications, undermining downstream sorting, robotic handling, and market-oriented CDW trading platforms (Chacón-Albero et al., 2025; Islam et al., 2024; Su et al., 2023)

This work proposes a Statistical Process Control (SPC) framework (Montgomery, 2008, 2024; Montgomery & Mastrangelo, 1991), for real-time assessment of the input-data quality, specifically, light intensity, of an RGB-camera set-up mounted on a mobile CDW unit. The objective is to (i) identify which metrics can be the most suiting to monitor light intensity in mobile CDW plants, (ii) identify control limits for this metric and detect out-of-control situations. This work aims at showing how to identify faulty data before the data are fed to the data-driven pipeline and further processes.

2 MATERIALS AND METHODS

The dataset analyzed in this work comprised 275 RGB images collected during field campaigns at a full-scale mobile comminution plant. The processing stream primarily handled demolition waste consisting of concrete, bricks, and ceramic tiles, along with a substantial fine fraction generated by the fragmentation of these brittle materials (Göbbels et al., 2026).

Two distinct experiments were conducted to capture seasonal lighting variation while minimizing intra-cluster confounding factors. The first experiments were performed in February and the second in April. Within each cluster, all experiments were completed on the same day, thereby

controlling temporal variables such as weather conditions, time-of-day effects, and plant operational status. This design enabled comparison across seasons while maintaining consistency within each period.

2.1 Determination of light intensity

Light intensity (L) was extracted from RGB images by converting each pixel to a single luminance value using the ITU-R BT.601/709 standard weighting formula (International Telecommunication Union, 2011) following Equation 1.

$$L = 0.299R + 0.587G + 0.114B \tag{1}$$

This formula accounts for the differential sensitivity of the human visual system across color channels. Each image was processed and converted to a floating-point array, yielding a two-dimensional luminance map of dimensions height and width ($H \times W$). The global intensity for each image was then computed as the spatial mean across all pixels following Equation 2

$$\bar{I} = \frac{1}{HW}\sum_{i=1}^{H}\sum_{j=1}^{W} L_{ij} \tag{2}$$

This raw intensity, ranging from 0 to 255, was subsequently normalized to the interval [0, 1], producing a dimensionless scalar representative of the average perceived brightness per image. This univariate conversion reduces the three-channel RGB representation to a single brightness measurement suitable for sequential process monitoring.

2.2 Determination of metrics for SPC

An Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) control chart was initially implemented to monitor the central tendency (mean) of light intensity across the image dataset. The objective was to detect sustained shifts in average brightness that could indicate environmental changes, equipment drift, or acquisition anomalies. The EWMA statistic was computed following Equation 3.

$$z_t = \lambda x_t + (1 - \lambda) z_{t-1} \tag{3}$$

with the smoothing parameter λ set to 0.2, a standard value for balanced sensitivity in SPC literature.

Given the inherent high variability of the light intensity dataset, traditional Shewhart or EWMA mean charts yield excessive false-positive rates for location shifts. Consequently, we adopted an Exponentially Weighted Moving Variance (EWMV) approach to monitor process stability (Macgregor & Harris, 1993). The EWMV statistic at time t is defined recursively following Equation 4.

$$s_t^2 = (1 - \lambda) s_{t-1}^2 + \lambda (x_t - \bar{x})^2 \tag{4}$$

Where s_t^2 is the exponential moving variance and $\bar{x}$ is the mean. This method focuses on detecting changes in dispersion rather than central tendency, providing a robust mechanism to identify environmental instability, sensor noise bursts, or equipment degradation while accounting for the known high-variance baseline.

Control limits were derived from the statistical properties of squared deviations $(x_t - \bar{x})^2$. First, we assumed the raw intensity data follows a normal distribution. To monitor variability, the

deviations from the mean is squared, which transforms them into a chi-squared distribution, which is strictly positive and right-skewed. This differs from normal data because extreme high spikes are more likely than deep lows. Then, chi-squared statistics are employed to calculate wider upper thresholds and floor the lower threshold at zero. This ensures limits match the natural asymmetry of variance, preventing false alarms while detecting genuine instability in lighting.
The resulting limits are obtained following equations 5-6.

$$Var(s_t^2) = 2\sigma^4 \frac{\lambda}{2-\lambda}(1-(1-\lambda)^{2t}) \tag{5}$$

$$UCL = \sigma^2 + 3\sqrt{Var(s_t^2)} \qquad LCL = \max(0, \sigma^2 - 3\sqrt{Var(s_t^2)}) \tag{6}$$

The lower limit is floored at zero since variance cannot be negative. Warning limits are computed accordingly following Equation 7.

$$LWL, UWL = \pm 2\sqrt{Var(s_t^2)} \tag{7}$$

To account for assessment of sensitivity and smoothing, λ was tunned with values between 0.1 and 0.3 to allow the detection of variance shifts while suppressing single-point noise. This resulted in a λ value of 0.2.

3 RESULTS AND DISCUSSION

The application of EWMV control chart to light intensity data collected from RGB sensors monitoring CDW in open-air conditions demonstrated effective fault detection capability. Unlike conventional EWMA charts, which track the exponentially weighted moving average of a process and are designed to detect shifts in the process mean, the EWMV approach monitors the variance of the process over time. Fig. 1 shows the raw intensity and the EWMA. The start-up process of monitoring EWMA is slow, given that the first approximation for the EWMA in $t+1$ is computed with the mean as the approximate value of EWMA in t.

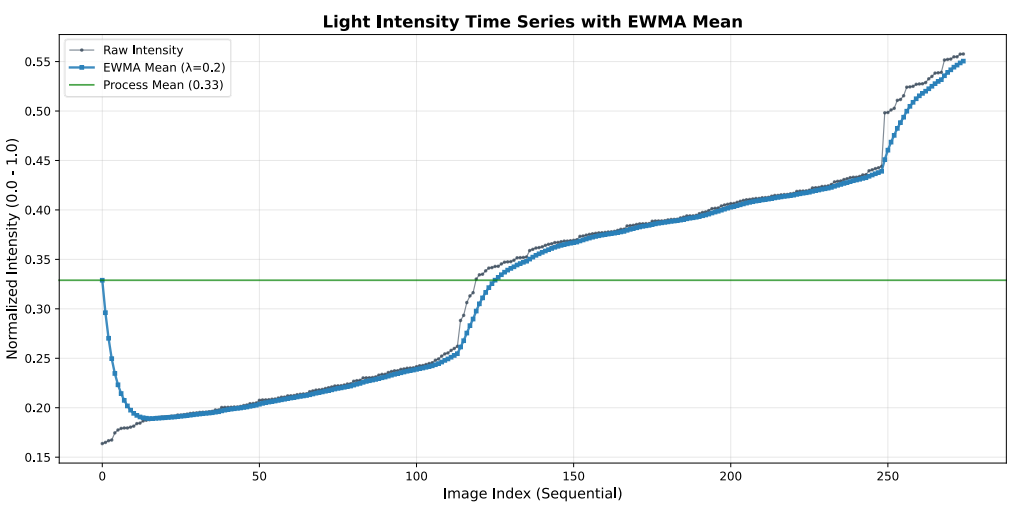


Fig. 1: Light intensity, exponential weighted moving average and dataset mean.

Both the EWMA and raw intensity data exhibit high variance. As discussed in Section 2, this characteristic motivated the adoption of an alternative statistic to monitor light intensity and assess its effectiveness in detecting out-of-control situations. This is especially important for mobile CDW plants in the context of sensor-based monitoring, where light intensity is inherently non-stationary due to diurnal cycles, seasonal variation, cloud cover dynamics, and solar angle changes. These factors cause the mean light intensity to fluctuate continuously and predictably throughout the day and across seasons, rendering traditional EWMA control charts ineffective for isolating genuine light-related faults from expected environmental drift.

Fig. 2 shows the results of the control charts obtained to monitor the EWMV. These charts can be used recursively and can be easily implemented in online monitoring.

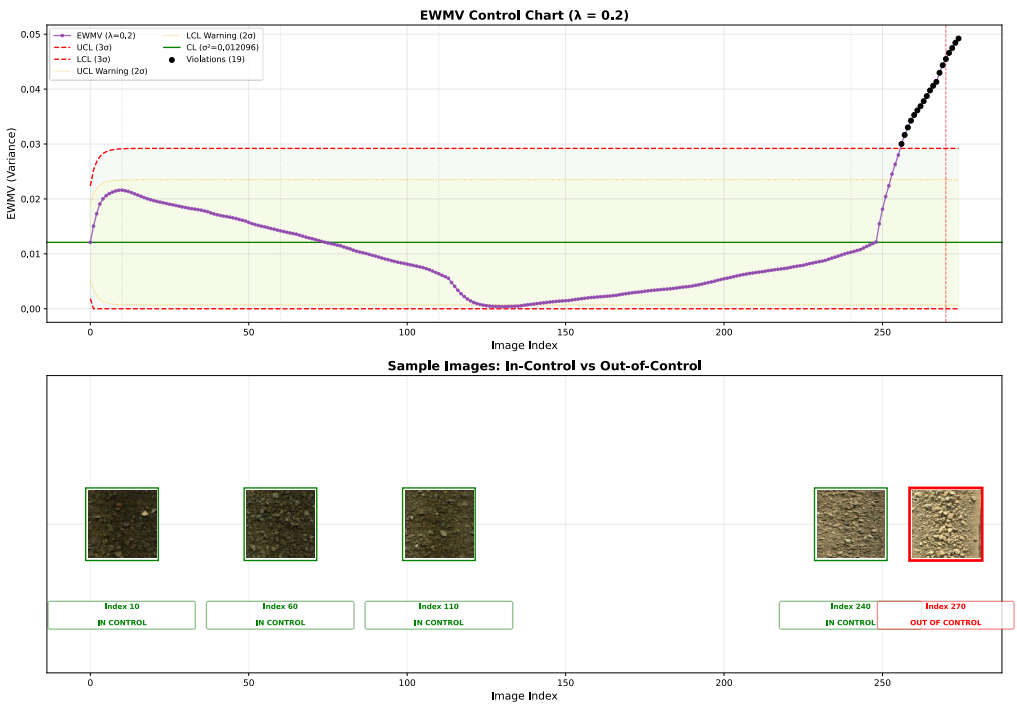


Fig. 2: Control charts for exponential weighted moving variance (EWMV) with lower and upper control limits.

The EWMV control chart captures deviations in the dispersion of light intensity measurements rather than their central tendency. Under normal operating conditions, while the mean light intensity shifts with time of day and season, the short-term variance of the signal remains relatively stable for a given ambient condition. When integrated into an AI-based pipeline, these signals can serve as automated flags indicating that incoming data may be faulty or degraded. Alternatively, they can monitor whether the input data exhibits significantly higher variance than the conditions under which the model was originally trained. As illustrated in Fig. 2, if a model was trained exclusively on data falling within the control limits, any input presenting brightness levels beyond those boundaries may compromise model performance. This information can therefore be leveraged during both training and inference stages. More importantly, out-of-distribution data points can be systematically buffered and catalogued as novel light intensity conditions, enabling periodic re-training cycles that progressively expand the model's adaptability to previously unseen illumination regimes. These tools thus provide a mechanism for bridging SPC with continuous

model improvement, with broad applicability across computer vision pipelines operating under variable environmental conditions.

3.1 Advantages for online implementation

A primary advantage of the proposed EWMV-based framework is its suitability for real-time, online deployment. As a univariate methodology relying solely on the light intensity channel from RGB sensor data, both computational overhead and memory footprint are minimal. The recursive update scheme requires only the previous variance estimate and the current observation, eliminating the need to store or reprocess historical data windows. This makes the approach well-suited for embedded, or edge-computing platforms commonly deployed in industrial monitoring settings, where processing resources and power budgets may be constrained. Additionally, control charts provide an intuitive, graphical representation of the EWMV statistic against dynamically updated control limits, enabling operators and plant managers to identify out-of-control conditions without previous statistical knowledge.

4 CONCLUSIONS AND OUTLOOK

In this work, we developed a straightforward methodology integrating EWMV with SPC principles to monitor input data quality for sensor-based mobile applications relying solely on light intensity, a univariate approach. The proposed method demonstrated promising results in detecting out-of-control conditions and flagging potentially faulty data streams.

By focusing exclusively on univariate light intensity, the method does not leverage potential correlations between the red, green, and blue channels or spatial information within the RGB image. Future work should explore multivariate extensions, such as multivariate EWMV charts or Hotelling's T^2 control charts augmented with variance monitoring to exploit inter-channel relationships and improve fault discrimination.

Additionally, coupling SPC-based data validation with adaptive model re-training pipelines presents a compelling avenue for building more robust computer vision systems capable of operating reliably under variable light conditions.

REFERENCES

Chacón-Albero, O., Campos-Mocholí, M., Marco-Detchart, C., Julian, V., Rincon, J. A., & Botti, V. (2025). AI for Sustainable Recycling: Efficient Model Optimization for Waste Classification Systems. *Sensors*, *25*(12). https://doi.org/10.3390/s25123807

Dodampegama, S., Hou, L., Asadi, E., Zhang, G., & Setunge, S. (2024). Revolutionizing construction and demolition waste sorting: Insights from artificial intelligence and robotic applications. *Resources, Conservation and Recycling*, *202*, 107375. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107375

Göbbels, L., Feil, A., Raulf, K., & Greiff, K. (2025). Current State of the Art and Potential for Construction and Demolition Waste Processing: A Scoping Review of Sensor-Based Quality Monitoring and Control for In- and Online Implementation in Production Processes. *Sensors*, *25*(14), 4401. https://doi.org/10.3390/s25144401

Göbbels, L., Raulf, K., Orbatu, S., & Greiff, K. (2026). Advancing Real-Time Sensor-Based Quality Monitoring in Construction and Demolition Waste Processing for the Prediction of Weight-Based Particle Size Distributions. *Recycling*, *11*(6). https://doi.org/10.3390/recycling11060101

International Telecommunication Union. (2011). *Recommendation ITU-R BT.601-7: Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios.* https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.601-7-201103-I

Islam, N., Sandanayake, M., Muthukumaran, S., & Navaratna, D. (2024). Review on Sustainable Construction and Demolition Waste Management—Challenges and Research Prospects. *Sustainability*, *16*(8), 3289. https://doi.org/10.3390/su16083289

Macgregor, J. F., & Harris, T. J. (1993). The Exponentially Weighted Moving Variance. *Journal of Quality Technology*, *25*(2), 106–118. https://doi.org/10.1080/00224065.1993.11979433

Montgomery, D. C. (2008). *Introduction to Statistical Quality Control*. Wiley.

Montgomery, D. C. (2024). The 100th anniversary of the control chart. *Journal of Quality Technology*, *56*(1), 2–4. https://doi.org/10.1080/00224065.2023.2282926
Montgomery, D., & Mastrangelo, C. (1991). Some Statistical Process-Control Methods for Autocorrelated Data. *Journal of Quality Technology*, *23*(3), 179–193. https://doi.org/10.1080/00224065.1991.11979321
Müller, A., & Martins, I. (2022). Advanced Recycling. In A. Müller & I. Martins (Eds.), *Recycling of Building Materials: Generation—Processing—Utilization* (pp. 309–343). Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-34609-6_10
Su, S., Yu, C., Jiang, Y., Kang, K., & Zhong, R. Y. (2023). Trading building demolition waste via digital twins. *Automation in Construction*, *156*, 105105. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105105

CONTACT

Dr.-Ing. Luz Alejo
luz.alejo@ants.rwth-aachen.de
02418095713
Chair of Anthropogenic Material Cycles
RWTH Aachen
https://www.ants.rwth-aachen.de/cms/~eeby/iar/

Smartphone-Based Deep Learning for Real-Time Quality Assessment in Glass Recycling

Cornelia Adami
Brantner Digital Solutions GmbH, Krems an der Donau, Austria

ABSTRACT: In modern recycling facilities, the precise separation of glass fractions is crucial for maintaining high-quality cullet streams and reducing contaminants. This paper presents a novel computer vision-based system for monitoring and analyzing glass recycling streams, focusing on flint, green and amber glass. Using smartphone-based image acquisition under both normal and ultraviolet (UV) illumination, samples are captured to detect and classify relevant contaminants, including lead-containing glass that fluoresces under UV light. The images are stored on a MinIO server, while associated metadata is managed in a MongoDB database. Object detection is performed with a YOLOv8-based model, and instance segmentation is refined using a Segment Anything–based module, classifying fragments into predefined categories such as Flint glass, Amber glass, Green glass, Blue glass, Lead glass under UV, Heat-resistant glass, Ceramics and porcelain, Stones, Metal wires and Metal springs. Detected objects are annotated, and their mass is estimated by applying gram-per-pixel calibration derived from prior measurements. The results are aggregated and transferred into a SQL database and further communicated to a programmable logic controller (PLC) via an OPC UA interface, enabling real-time monitoring and automated alarm generation if threshold values are exceeded. This approach provides a scalable, cost-efficient, and automated solution for enhancing glass recycling quality control.
A patent application related to the described procedure and device has been filed under the title „Verfahren und Vorrichtung zur Analyse eines Objektgemischs“ (application no. A55101/2025).

1 INTRODUCTION

This work combines low-cost image acquisition with modern computer vision and a structured data-processing pipeline. The methodology comprises five components: data acquisition, storage and metadata handling, object detection and segmentation, mass estimation, and industrial integration.

1.1 Data Acquisition

Two smartphones monitor the flint and mixed amber/green cullet streams. Each automatically extracted sample is photographed under normal light (for color-based classification and contaminant detection) and UV light (for lead-glass identification). Smartphones offer sufficient resolution, stable acquisition conditions, and low cost. In addition, the glass stream is sampled through an extraction flap that triggers random, automatically collected sample portions. These samples are used to generate images, which are then used for the detection and classification processes.

1.2. Data Storage and Metadata

Images are stored in MinIO, while metadata such as timestamps, stream type, sample ID, and illumination mode is recorded in MongoDB. The separation enables scalable storage and flexible querying.

1.3. Object Detection, Segmentation, and Classification

A YOLOv8 model detects ten predefined classes. Its bounding boxes serve as prompts for a SAM-based instance segmentation module, which provides accurate masks. Standard augmentation improves the model's robustness. All results are stored for later visualization and processing.

1.4. Mass Estimation

For each class, pixel-to-gram factors were calibrated using images of weighed reference objects. During inference, SAM mask areas are multiplied by the corresponding gram-per-pixel factor to estimate the mass contribution of each fragment and derive contamination levels in grams per tonne.

1.5. Industrial Integration

Detection, classification, and mass-estimation results are stored in a SQL database and transmitted to the PLC via OPC UA. When contamination thresholds are exceeded, the system automatically adjusts the bunker discharge rate.

2 EXECUTION

2.1 Calibration Procedure

For each class, individual fragments were photographed from a fixed distance and weighed.
Using Roboflow, segmentation masks were created, and gram-per-pixel factors were computed by dividing the measured mass by the segmented pixel area. Mean and standard deviation per class form the basis for mass estimation during inference.

2.2 Training Data and Model Development

The training dataset covers eight classes, all manually segmented in Roboflow and exported in YOLOv8 format. A YOLOv8n-seg model was trained for 150 epochs with moderate geometric and color augmentations.
Classes: Flint glass, Blue glass, UV lead glass (UV), Amber glass, Green glass, Heat-resistant glass, CSP (Ceramics/Porcelain, Stone)and Metal (Metal wire, metal spring)
At the final epoch, the model achieved solid detection and segmentation performance. For bounding boxes, the model reached a precision of 0.862, a recall of 0.881, an mAP@0.5 of

2.3 Normal Operation and Inference Pipeline

During operation, PLC triggers initiate the acquisition of normal-light and UV-light images for each sample. Images and metadata are uploaded to MinIO and MongoDB, after which the inference server executes a hybrid segmentation pipeline:

- YOLOv8 detection and coarse segmentation,
- SAM-based mask refinement,
- UV/visible fusion to reclassify flint fragments as lead glass when UV fluorescence is detected. Since only flint glass fragments can contain lead, UV-based lead-glass detection is applied exclusively to objects initially classified as flint glass,
- class merging
    - KSP: fusion of Keramik_und_Porzellan and Stein,

    - Metall: fusion of Metalldraht, Metallfeder and Metall.
- mass estimation using calibrated gram-per-pixel factors.

The system computes contamination levels in grams per tonne, stores all outputs in a SQL database, and forwards key metrics to the PLC via OPC UA for real-time process integration. Additionally, results are logged in a human-readable CSV file.

3 RESULTS

This chapter presents the results of applying the developed system in real-world glass recycling streams. While the previous chapter focused on calibration, model training, and system implementation, the following sections demonstrate the model's performance under operational conditions, including visual examples of detected objects, quantitative evaluations of contamination levels, and threshold-based alerts generated for process monitoring.

3.1 Estimation of training result

To estimate the training result, accuracy, precision and recall needs to be calculated on unseen test data. Therefore the True Positives, False Positives and True Negatives needs to be estimated from the images. The formulas of the calculation was explained in section.
In all evaluations, fragments located at the extreme left or right edges of the image were excluded. Due to the illumination geometry of the measurement setup, these peripheral regions exhibit reduced brightness and contrast, which can lead to unreliable ground-truth annotation and inconsistent detector responses. Only fragments within the consistently illuminated central field of view were considered for metric calculation. The evaluation of the KPIs will be done in the following subsections.

3.2 Validation of mass estimation with physically weighed samples

To validate the mass estimation approach, two test samples were selected for which the actual class-wise masses were measured using a laboratory scale. For each sample, the total mass per class was estimated from the segmented fragment areas using the calibrated gram-per-pixel factors and compared to the physically measured ground-truth values.

3.2.1 Mass Validation Sample



Fig. 1: Mass estimation validation for Sample.

The mage shows the detected fragments and their assigned material categories. The second weighed sample contains fragments of white glass, amber glass, Metall, KSP, and green glass.

Two amber glass fragments were not detected, leading to a complete underestimation of their weight. Several small reflections were classified as metallic fragments, causing an overestimation for the Metal class. White glass mass was slightly overestimated due to fragment subdivision. CPS and green glass masses match closely. The overview is given in Tab. 1.

Tab. 1: Measured vs. estimated mass

Class	Measured [g]	Estimated [g]	Abs. Error [g]
White glass	53.0	62.75	+9.75
Amber glass	1.72	0.00	-1.72
Metal	0.268	1.027	+0.759
CPS	6.35	6.04	-0.31
Green glass	1.36	1.50	+0.14
Total	62.7	71.3	+8.6

4 CONCLUSION

The system developed in this work demonstrates that:
High-quality, automated monitoring of glass recycling streams is possible using low-cost hardware and modern deep learning.
The combination of YOLOv8 and SAM yields robust fragment detection and segmentation, even for irregular or thin objects.
UV fluorescence enables reliable lead-glass identification.
Pixel-to-mass calibration provides accurate mass estimates, enabling contamination quantification in grams per ton.
Integration with PLCs via OPC UA supports real-time industrial use, including automatic threshold-based warnings.
Thus, the system fulfills the core objective of delivering a scalable, accurate, and industry-ready solution for continuous quality monitoring in glass recycling plants.

4.1 Limitations

Despite the strong performance, several limitations remain:

- Extremely thin metal wires can be missed or segmented incompletely.
- Occlusions between overlapping fragments may cause false negatives.
- Rare classes (e.g., heat-resistant glass, Lead glass) suffer from limited training data.
- Pixel-to-mass calibration depends on consistent imaging geometry and lighting.

5 OUTLOOK

The following improvements would further enhance system performance and scalability:
Expansion of the training dataset with rare classes, especially low-frequency contaminants.
Improved detection of thin, curved metal wires, for which current bounding-box proposals and segmentation masks occasionally fail under challenging lighting or background conditions.
Enhanced detection of elongated metal springs, including better handling of their repetitive coil structure and partial occlusions.
More reliable instance contouring and segmentation of metal components, ensuring that detected objects are fully captured even when highly reflective or partially overlapping.
Development of improved recalibration procedures for pixel-to-gram factors, enabling continuous refinement of gram-per-pixel values based on additional calibration data and operational feedback.
In summary, this work lays a solid foundation for the future of AI-driven glass recycling monitoring and shows that high-resolution, real-time contamination analysis is feasible with affordable hardware and advanced machine learning techniques.

recAIcle – Praxis statt Vision: KI-Assistenz für die manuelle Abfallsortierung

Julian Aberger[1], Barbara Mayer[2] & Renato Sarc[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] Siemens AG, Graz, Österreich

KURZFASSUNG: recAIcle stellt einen entscheidenden Schritt in Richtung der Digitalisierung der Abfallwirtschaft dar, denn bis jetzt war die manuelle bzw. händische Abfallsortierung eine Blackbox. Die händische Abfallsortierung ist ein integraler Bestandteil der Abfallwirtschaft, hat jedoch seit Jahrzehnten keine signifikanten Veränderungen oder Innovationen erfahren. recAIcle hat sich zum Ziel gesetzt, diesen Prozess digital abzubilden und die Sortiermitarbeiter:innen bei ihrer Sorterentscheidung zu unterstützen. Dafür werden die Sortiermitarbeiterinnen auf für sie interessante Partikel mittels Lichtimpuls hingewiesen. Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung, Validierung und dem Praxiseinsatz dieses KI-Assistenzsystems. Jeder Entwicklungsschritt des Systems wurde durch Experimente validiert, darunter Tests mit Sortierenden. Das Resultat der Arbeit ist der recAIcle-Prototyp und eine Umsetzungsstrategie für den Einsatz des Systems in realen abfallwirtschaftlichen Anlagen. Weiters wurden Mensch-Maschine-Interaktion, automatisierte Datenerfassung und -annotation sowie fortgeschrittene Ansätze des Maschinellen Lernens in einer kohärenten Systemarchitektur integriert. Eine projektionsbasierte Mensch-Maschine-Schnittstelle hebt Partikel von Interesse für die Sortierenden auf dem Förderband in Echtzeit hervor. Während eine zweite Kamera, die hinter den Sortierenden positioniert ist, Feedback an das KI-Modell liefert. Diese Schnittstelle ermöglicht es dem Modell, durch Beobachtung kontinuierlich zu lernen. Das Assistenzsystem bietet eine End-to-End-Lösung, die eine robuste und anpassungsfähige Implementierung von KI mit kontinuierlichem menschlich unterstütztem Lernen in den Sortierbetrieb ermöglicht.

1 EINLEITUNG

Die Abfallsortierung ist ein entscheidender Schritt im Recyclingprozess und ein Eckpfeiler der Kreislaufwirtschaft (Oo et al. 2024). Trotz der Fortschritte bei sensorbasierten Sortiertechnologien bleibt die manuelle Sortierung unverzichtbar, insbesondere in Anlagen mit geringem Automatisierungsgrad oder bei Aufgaben der Qualitätssicherung (Schlögl 2021). Die manuelle Sortierung ist arbeitsintensiv, da sie erfordert von den Mitarbeitenden schnelle Entscheidungen auf der Grundlage visueller und taktiler Hinweise fordert. Die Sortiergeschwindigkeit kann dabei bis zu 3.000 Sortiervorgänge pro Stunde erreichen (Lucchese et al. 2023). Allerdings hat es in diesem Bereich im letzten Jahrhundert kaum Innovationen gegeben, und die mangelnde Standardisierung behindert den technologischen Fortschritt.

Das Projekt „recAIcle“ stellt einen neuen Ansatz zur Modernisierung der manuellen Abfallsortierung durch Digitalisierung und fortschrittliche Technologien dar. Das recAIcle-System ist das erste in der Abfallwirtschaft, das über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) direkt von Sortierenden lernt. Dieser neuartige Ansatz integriert modernste Konzepte wie Lernen durch Beobachtung, Datenaugmentierung, und die Generierung synthetischer Daten auf Hardware in Industriequalität (Schreiner et al. 2026), um so die Praxistauglichkeit sicherzustellen.

Aufbauend auf früheren Marktanalysen befasst sich dieser Beitrag mit den noch offenen Herausforderungen bei der Entwicklung eines KI-gesteuerten Assistenzsystems für die manuelle Abfallsortierung. Das System unterstützt die Mitarbeiter, indem es visuelle Hinweise auf Abfallgegenstände projiziert und so die Entscheidungsfindung erleichtert. Dieser Ansatz überbrückt die Kluft

zwischen menschlichem Fachwissen und maschineller Intelligenz und ebnet den Weg für Innovationen in der manuellen Abfallsortierung.

2 METHODIK

2.1 Systementwicklung und Anwendungsfallvarianten

Aufbauend auf früheren Analysen von (Aberger et al. 2025) wurde das recAIcle-System an spezifische Einsatzszenarien angepasst, die von eigenständigen eingebetteten Lösungen bis hin zu vollständig integrierten industriellen Konfigurationen reichen. Jede Variante wurde so konzipiert, dass sie sich in die betrieblichen Arbeitsabläufe einfügt und die Kompatibilität mit aktuellen und zukünftigen Anwendungsfällen in der Abfallsortierung gewährleistet. Dieser flexible Ansatz unterstützt die Skalierbarkeit und die Anpassung an andere Materialströme. Ändert sich der Abfallstrom im Laufe der Zeit, kann das System durch kontinuierliches Lernen weiterentwickeln und sich an die neuen Gegebenheiten anpassen.

2.2 Lernen von Sortiermitarbeiter:innen

Das recAIcle-System nutzt das Fachwissen der Sortiermitarbeiter:innen, indem es direkt aus deren Handlungen lernt. Ein System aus zwei Kameras, das über ein Encoder-gesteuertes SPS-Programm synchronisiert wird, verfolgt Objekte entlang des Förderbands. Durch den Vergleich der Bilder aus den beiden Kamerapositionen identifiziert das System die von den Mitarbeitern entnommenen Objekte und erstellt so einen beschrifteten Datensatz ihrer Entscheidungen. Dieser Datensatz wird zum Trainieren des Machine-Learning-Modells (ML) verwendet, wodurch es in die Lage versetzt wird, menschliche Entscheidungsmuster nachzubilden.

2.3 Augmentation

Zur Unterstützung der Mitarbeiter bei der manuellen Sortierung wurde ein System zur Objekterkennung in Echtzeit und zur projektionsgestützten Sortierung entwickelt. Das System vereint eine Basler-Industriekamera, ein Klassifikationsmodell und ein projektorbasiertes visuelles Leitsystem. Das Modell wurde anhand von 80 Stunden Videomaterial aus dem Sortierbetrieb trainiert. Das System hebt Zielobjekte auf dem Sortierband mithilfe farbcodierter Überlagerungen hervor, die direkt auf den Abfallstrom projiziert werden.

2.4 Marktanalyse

Um die Bedürfnisse der Branche zu erfassen, wurde eine Online-Umfrage unter Recyclingunternehmen und Betreibern von Sortieranlagen in Deutschland, Österreich und der Schweiz durchgeführt. Die Umfrage, die an 41 Unternehmen verschickt wurde, zielte darauf ab, Einblicke in aktuelle Praktiken, den Einsatz von Technologien und Herausforderungen bei der Materialtrennung zu gewinnen. Sie bestand aus 12 prägnanten Fragen, die in zwei Abschnitte unterteilt waren: Unternehmensdaten (z. B. Standort, Abfallarten und manuelle Sortierverfahren) sowie die Relevanz des recAIcle-Systems. Die Ergebnisse lieferten wertvolle Anhaltspunkte für die Weiterentwicklung des Systemdesigns und dessen Anpassung an die Anforderungen der Branche.

2.5 Industrieeinsatz

Nach der Erprobung des Prototyps im Technikumsmaßstab wurde das System konsequent weiterentwickelt und für den Einsatz bei den ersten Kunden vorbereitet. Das System wurde auf

unterschiedlichste Materialströme getestet. Als erster industrieller Use-Case wird die Sortierung von Feuerfestmaterial vorgestellt.

3 ERGIBISSE

3.1 Lernen von Sortierer:innen

Entscheidungen mithilfe synchronisierter Kameras erfasste (siehe Abbildung 1). Das System erstellt annotierte Datensätze, um Klassifikationsmodelle zu trainieren, indem es über eine Rückkopplungsschleife die Objekte identifiziert, die die Sortierer entnommen haben. Dieser Ansatz des kontinuierlichen Lernens ermöglicht es dem System, sich an reale Sortierpraktiken, das Fachwissen der Bediener und sich ändernde Abfallzusammensetzungen anzupassen und sich im Laufe der Zeit weiterzuentwickeln, um sich auf das Fachwissen der Bediener und sich ändernde Abfallzusammensetzungen anzupassen. Dadurch wird auch das Know-how von Mitarbeitern transferierbar (z. B. zwischen verschiedenen Niederlassungen) und wird sozusagen gesichert.

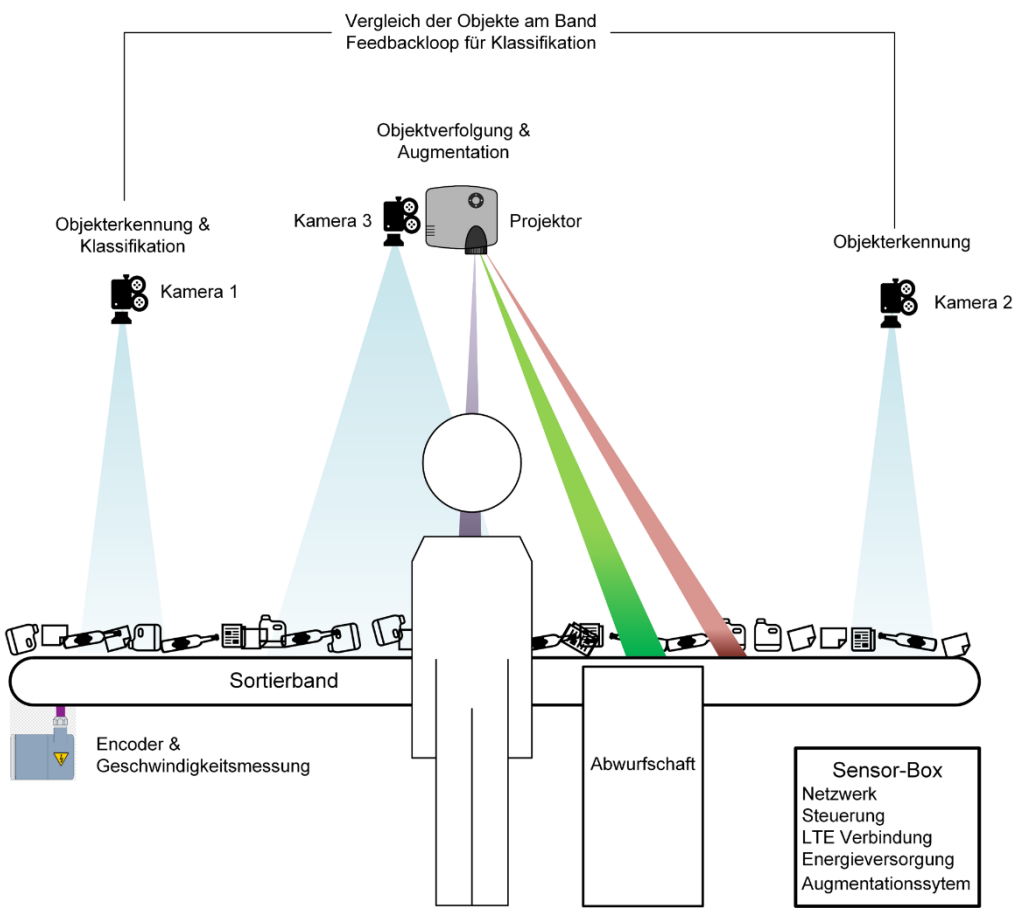


Abb. 1: Systemaufbau des Assistenzsystems mit dem Feedbackloop für die Klassifikation

3.2 Augmentation

Das projektionsgestützte Echtzeit-Leitsystem erzielte in Versuchen mit PET-Flaschen und Getränkekartons eine hohe Leistung. Das System erreichte eine Präzision von 92,4 %, einen Recall von 88,8 % und einen F1-Score von 90,79 %. Farbcodierte Überlagerungen wurden auf das Förderband projiziert, um Zielobjekte hervorzuheben, und boten den Sortierern eine klare und effektive visuelle Führung. Das System arbeitete stabil in Echtzeit und mit einer durchschnittlichen Latenz von weniger als 15 ms und bewies damit seine Zuverlässigkeit in industriellen Umgebungen. Zwei Beispiele für die Augmentation und Unterstützung der Mitarbeiter:innen sind ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abb. 2: Beispiel der Unterstützung des Sortierers mit Hilfe von projektionsgestützter Augmentation

3.3 Marktanalyse

Eine im DACH-Raum (Deutschland, Österreich, Schweiz) durchgeführte Umfrage ergab ein starkes Interesse der Branche an KI-gestützter Abfallsortierung. Von den befragten Unternehmen bekundeten 82 % Interesse am Einsatz KI-basierter Technologien zur Unterstützung der Sortiermitarbeiter, und 72 % hielten das recAIcle-System für relevant oder sehr relevant zur Verbesserung manueller Sortierprozesse. Diese Ergebnisse unterstreichen den Bedarf an innovativen Lösungen wie recAIcle, um die Effizienz zu steigern und die Mitarbeiter in Recyclinganlagen zu unterstützen.

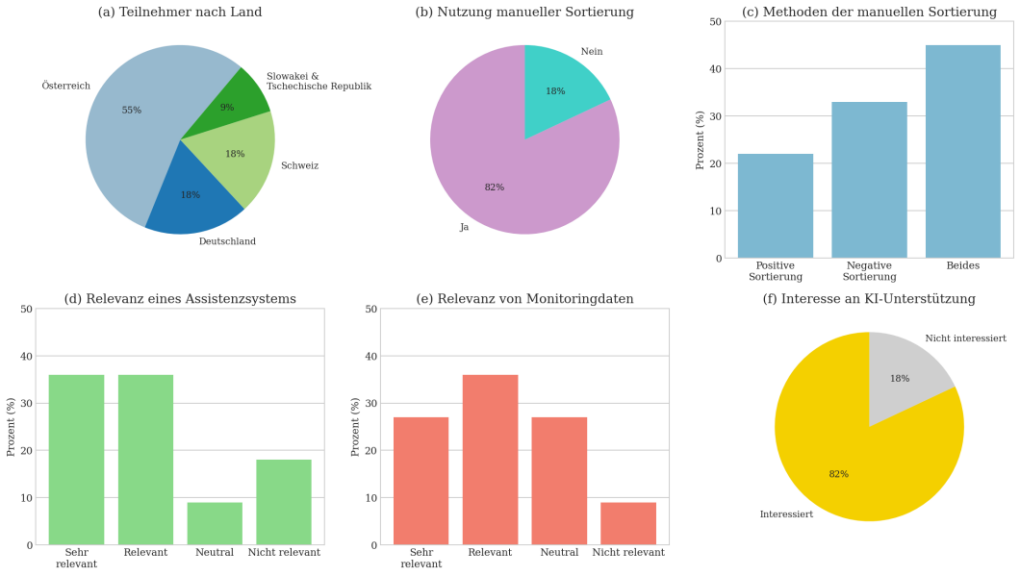


Abb. 3: Ergebnisse der Marktanalyse

3.4 Einsatz in der Praxis

Nach erfolgreichen Tests im Digital Waste Research Lab (DWRL) des Lehrstuhls für Abfalltechnik und Abfallwirtschaft (AVAW) der Montanuniversität Leoben wurde das System in einem Pilotprojekt bei der RHI Magnesita für die Sortierung von ausgebrochenem Feuerfestmaterial vorbereitet. Vorversuche zeigen, dass das System in der Lage ist, die Mitarbeiter:innen bei ihrer Arbeit zu unterstützen. Bei dem Knowledge-Transfer im Recyclingbereich kann das System eine zentrale Rolle spielen, da es ermöglicht, Wissen zwischen verschiedenen Standorten weltweit zu transferieren, mit Hilfe der Klassifikationsmodelle, ohne dass dabei Sprachbarrieren oder Ähnliches im Weg stehen.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Arbeit liefert fundamentale Erkenntnisse als Basis für die Digitalisierung der Abfallwirtschaft, insbesondere der manuellen Abfallsortierung. Sie legt die Grundlagen für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft dar und zeigt Schritte hin zu einem vollständig digitalen KI-Unterstützungssystem für Mitarbeiter in der manuellen Sortierung auf. Zudem zeigt der Einsatz des Systems in der Industrie dessen Praxistauglichkeit und seine Relevanz in einer global organisierten Kreislaufwirtschaft. Insbesondere beim Know-how-Transfer. Weites demonstriert das System Skalierbarkeit und Anpassungsfähigkeit. Von Kunststoffen bis hin zum Feuerfestmaterial.

5 FINANZIERUNG

Das Projekt RecAIcle (FFG-Projektnummer: FO999892220) wird im Zuge der Ausschreibung AI for Green 2021 (KP) aus Mitteln der FFG gefördert

LITERATURVERZEICHNIS

Aberger, J.; Shami, S.; Häcker, B.; Pestana, J.; Khodier, K.; Sarc, R. (2025): Prototype of AI-powered assistance system for digitalisation of manual waste sorting. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 194, S. 366–378. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.01.027.

Lucchese, Andrea; Digiesi, Salvatore; Mummolo, Giovanni (2023): Human Performance of Manual Sorting: A Stochastic Analytical Model. In: João Carlos Gonçalves dos Reis, Francisco Gaudêncio Mendonça Freires und Milton Vieira Junior (Hg.): Industrial Engineering and Operations Management, Bd. 431. Cham: Springer Nature Switzerland (Springer Proceedings in Mathematics & Statistics), S. 445–456.

Oo, Phyo Zaw; Prapaspongsa, Trakarn; Strezov, Vladimir; Huda, Nazmul; Oshita, Kazuyuki; Takaoka, Masaki et al. (2024): The role of global waste management and circular economy towards carbon neutrality. In: *Sustainable Production and Consumption* 52, S. 498–510. DOI: 10.1016/j.spc.2024.11.021.

Schlögl, Sabine (2021): Stand der Technik von Kunststoffsortieranlagen und Potentiale durch sensorische Stoffstromüberwachung. Montanuniversität Leoben (000).

Schreiner, Sebastian; Scheuchenstuhl, Daniel; Hoedl, Bernd; Aberger, Julian; Pock, Thomas (2026): Synthetische Generierung von Trainingsdaten für kontrollierbares Lernen von Bilderkennungsverfahren im Recycling. In: *Österr Wasser- und Abfallw*. DOI: 10.1007/s00506-026-01208-5.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Dr.mont. Julian Aberger
julian.aberger@unileoben.ac.at
+43 (0)676 / 84 53 86-5123
Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben
https://www.unileoben.ac.at/avaw/

Dipl.-Ing. Dr.tech. Barbara Mayer
mayer.barbara@siemens.com
Siemens AG
Standort Graz

DiGiDO vernetzt: VEBS, DIWASS, WasteX und eFTI als digitale Infrastruktur für eine resiliente Kreislaufwirtschaft

Constantin Gessner[1,2]
[1)] DiGiDO GmbH, Produktmanagement, Wien, Österreich
[2)] ARAplus GmbH, Innovation, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die Kreislaufwirtschaft steht vor einem strukturellen Wandel hin zu einer datengetriebenen Steuerung von Sekundärrohstoffströmen. Mit der Einführung digitaler Systeme wie DIWASS, WasteX und insbesondere der eFTI-Verordnung werden papierbasierte Prozesse durch standardisierte elektronische Informationsflüsse ersetzt. Vor diesem Hintergrund analysiert der Beitrag die Rolle der Plattform DiGiDO als integrative Dateninfrastruktur für die Abfall- und Recyclinglogistik.
Die DiGiDO GmbH, als Tochter der ARAplus GmbH, entwickelt eine multidirektionale Datenplattform zur Vernetzung von Unternehmen, Behörden und Logistikakteuren. Neben der operativen Digitalisierung von Transport- und Dokumentationsprozessen ermöglicht die Plattform eine datenbasierte Steuerung von Materialströmen. Praktische Anwendungen, unter anderem in Zusammenarbeit mit der Sortieranlage TriPlast im Ennshafen, zeigen das Potenzial zur Effizienzsteigerung und Transparenzverbesserung entlang der Wertschöpfungskette.
Ein wesentlicher Entwicklungsschritt ist die Förderung einer eFTI-Pilotplattform im Rahmen der nationalen Logistikförderung, womit erstmals in Österreich eine entsprechende Plattformentwicklung unterstützt wird. Parallel dazu wird im Rahmen europäischer Initiativen (Horizon Europe) gemeinsam mit Partnern wie dem Dualen System Deutschland an der Integration intermodaler Geschäftsfälle gearbeitet.
Der Beitrag zeigt, dass digitale Plattformlösungen eine zentrale Rolle bei der Transformation der Kreislaufwirtschaft einnehmen und die Grundlage für resiliente, transparente und interoperable Logistiksysteme bilden.

1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Die Transformation der Kreislaufwirtschaft ist zunehmend durch die Integration digitaler Technologien geprägt. Während Abfallströme historisch als Entsorgungsproblem betrachtet wurden, erfolgt heute eine Neubewertung als strategisch relevante Sekundärrohstoffe.
Mit der Einführung europaweiter Systeme wie DIWASS sowie der Umsetzung der eFTI-Verordnung werden papierbasierte Prozesse durch digitale Informationssysteme ersetzt. Gleichzeitig steigt die Komplexität logistischer Netzwerke, wodurch integrierte Datenplattformen zu einem zentralen Erfolgsfaktor werden.
Digitale Plattformen ermöglichen die Synchronisation von Informationen entlang komplexer Stoffstromnetzwerke

2 HERAUSFORDERUNGEN DER DIGITALEN TRANSFORMATION IN DER RECYCLINGLOGISTIK

Die operative Praxis der Abfallwirtschaft ist weiterhin von heterogenen Systemlandschaften und fragmentierten Kommunikationsstrukturen geprägt. Typische Problemstellungen umfassen:

- fehlende End-to-End-Transparenz entlang der Prozesskette
- redundante und fehleranfällige Datenerfassung
- Medienbrüche zwischen unterschiedlichen IT-Systemen
- ineffiziente Abstimmungsprozesse zwischen Akteuren

Diese strukturellen Defizite führen zu erhöhtem administrativem Aufwand und begrenzen die Optimierbarkeit logistischer Prozesse.

Gleichzeitig verschärft sich der regulatorische Rahmen durch Anforderungen wie:
- verpflichtende digitale Meldesysteme (DIWASS)
- EU-weite Standardisierung elektronischer Transportinformationen (eFTI)

Damit entsteht ein erheblicher Transformationsdruck in Richtung digitaler, interoperabler Systeme.

3 SYSTEMARCHITEKTUR VON DIGIDO ALS DIGITALE INTEGRATIONSPLATTFORM

Die DiGiDO GmbH, als Tochtergesellschaft der ARAplus GmbH, entwickelt eine multidirektionale Datenplattform zur Integration von Unternehmen, Behörden und logistischen Akteuren innerhalb der Kreislaufwirtschaft.

Die Plattform ermöglicht den standardisierten Austausch von Transport- und Prozessdaten in Echtzeit und basiert auf folgenden technologischen Prinzipien:
- einheitliche Datenmodelle zur systemübergreifenden Verarbeitung
- bidirektionale Integration bestehender ERP-Systeme
- Echtzeitverfügbarkeit konsistenter Datensätze für alle Beteiligten

Durch diese Architektur entsteht eine durchgängige Datenbasis, die sowohl operative Prozesse als auch regulatorische Anforderungen adressiert.

Ein wesentliches Einsatzfeld der Plattform liegt in der praktischen Umsetzung industrieller Use Cases, insbesondere in Kooperation mit Anlagenbetreibern. Beispielhaft ist hier die Zusammenarbeit mit der Sortieranlage TriPlast im Ennshafen zu nennen, bei der digitale Materialflussdaten zur Optimierung operativer Abläufe und zur Verbesserung der Datentransparenz eingesetzt werden.

4 DIGITALE ABFALLVERBRINGUNG UND REGULATORISCHE INTEGRATION

Ein zentraler Bestandteil der Plattform ist das DiGiDO-Notifizierungsmodul, welches die vollständige digitale Abwicklung von Abfallverbringungen ermöglicht.

Der Prozess umfasst:
- Genehmigungsmanagement
- Transportabwicklung
- Dokumentation der Materialübernahme
- Kommunikation mit Behörden und Partnern

Dabei werden nationale (WasteX) und europäische (DIWASS) Systeme integriert, wodurch eine standardisierte, interoperable Infrastruktur entsteht.

Ein wesentliches Merkmal ist die Einbindung auch nicht digital angebundener Partner über niederschwellige Schnittstellen, wodurch eine vollständige Prozessintegration erreicht wird.

5 ENTWICKLUNG EINER EFTI-PLATTFORM: FÖRDERINITIATIVE UND INNOVATIONS-ROLLE

Im Rahmen der nationalen Logistikförderung wurde die Entwicklung einer eFTI-konformen Plattform initiiert. Die ARAplus GmbH und die DiGiDO GmbH zählen dabei zu den ersten Unternehmen in Österreich, die eine entsprechende Förderung für die Entwicklung und Pilotierung einer eFTI-Plattform erhalten haben.

Das Projekt „DiGiDO eFTI-Pilot-Plattform“ adressiert insbesondere:
- die Entwicklung standardisierter digitaler Frachtinformationssysteme
- die Integration von Partnern entlang der Wertschöpfungskette
- die Umsetzung konkreter Pilot-Use-Cases in der Recyclinglogistik

Die Umsetzung erfolgt im Kontext eines nationalen Förderprogramms des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur, abgewickelt durch die SCHIG mbH

Die Förderung reflektiert die strategische Bedeutung der Plattformentwicklung für die Digitalisierung der Logistik und unterstreicht die Rolle der beteiligten Unternehmen als Innovationsakteure im österreichischen Markt.

6 DATENBASIERTE STEUERUNG UND OPERATIVE NUTZUNG

Neben der regulatorischen Abwicklung stellt die Nutzung von Daten einen zentralen Mehrwert dar.

Das DiGiDO-Cockpit ermöglicht die systematische Analyse und Visualisierung von Materialströmen und unterstützt:
- Echtzeitmonitoring logistischer Prozesse
- Leistungsanalysen von Transportdienstleistern
- Identifikation von Effizienzpotenzialen
- standortübergreifende Vergleichsanalysen

Damit wird eine Transformation von reaktiven zu datengetriebenen Steuerungsansätzen ermöglicht.

7 EUROPÄISCHE WEITERENTWICKLUNG UND INTERMODALE INTEGRATION

Parallel zur nationalen Förderung wird die Plattform im Rahmen europäischer Initiativen weiterentwickelt. Im Kontext der Horizon-Europe-Förderlandschaft wird derzeit gemeinsam mit internationalen Partnern – darunter das Duale System Deutschland – an der Abbildung intermodaler Geschäftsfälle gearbeitet.

Die Zielsetzung umfasst insbesondere:
- Integration multimodaler Transportketten
- Nutzung standardisierter eFTI-Daten für Echtzeitentscheidungen
- Aufbau resilienter logistischer Netzwerke innerhalb Europas

Diese Entwicklung verdeutlicht den Übergang von reiner Compliance-Funktionalität hin zu einer strategischen Nutzung von Transportdaten als operative Entscheidungsgrundlage.

8 EINORDNUNG DER ERGEBNISSE UND IMPLIKATIONEN FÜR PRAXIS UND FORSCHUNG

Die Ergebnisse zeigen, dass digitale Plattformen eine Schlüsselrolle für die Transformation der Kreislaufwirtschaft einnehmen.

Für Unternehmen ergeben sich daraus:
- signifikante Effizienzsteigerungen
- verbesserte Datenverfügbarkeit
- erhöhte Rechtssicherheit

Für die Forschung eröffnen sich neue Fragestellungen in den Bereichen:
- Datenstandardisierung
- Interoperabilität
- synchromodale Logistiksysteme

9 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Digitalisierung der Abfallwirtschaft entwickelt sich zunehmend zu einer integrierten Dateninfrastruktur für die Kreislaufwirtschaft. Plattformen wie DiGiDO verbinden operative Prozesse, regulatorische Anforderungen und datenbasierte Analyse in einem konsistenten Systemansatz. Die Kombination aus nationaler Förderung, industriellen Pilotanwendungen und europäischer Weiterentwicklung zeigt, dass sich die Branche in Richtung vernetzter, resilienter und datengetriebener Logistiksysteme entwickelt.

KONTAKT

Constantin Gessner
Constantin.gessner@araplus.at
0664/8228392
Produktmanagement
DiGiDO GmbH
www.digido.at

Der Weg zum digitalen Begleitschein 2027: Eine flexible Open-Source ERP-Lösung für die Abfallwirtschaft am Praxisbeispiel der R&K GmbH

Rainer Saga[1] & Wolfgang Ammerer[2]
[1)] axtesys GmbH, Systemintegration, Graz, Österreich
[2)] R & K GmbH, Geschäftsführung, Kilb, Österreich

KURZFASSUNG: Die Abfall- und Recyclingwirtschaft steht vor einer der größten digitalen Transformationen ihrer Geschichte. Ab dem 1. Januar 2027 wird in Österreich der „Digitale Begleitschein“ verpflichtend, was eine nahtlose und automatisierte Schnittstelle zum behördlichen System VEBSV 2.0 (Voll-Elektronisches Begleitschein-Verfahren) unumgänglich macht. Etablierte, monolithische Branchenlösungen erweisen sich in der Praxis oft als zu starr und kostenintensiv, um diese Flexibilität agil abzubilden. Dieser Praxisbericht präsentiert einen innovativen Lösungsansatz auf Basis des Open-Source-ERP-Systems Odoo, der in enger Kooperation zwischen der axtesys GmbH und dem Entsorgungsfachbetrieb R&K GmbH entwickelt wurde. Um Implementierungsrisiken zu minimieren, setzt das Projekt auf einen zweistufigen Migrationspfad: Phase 1 fokussiert sich auf die vollständige Digitalisierung der internen Workflows – von der administrativen Auftragserfassung bis zur mobilen Tablet-Ansicht für das Fahrpersonal. Phase 2 sieht die rechtzeitige, native Anbindung der VEBSV 2.0-Schnittstelle vor dem Stichtag vor. Der Beitrag zeigt auf, wie mittelständische Entsorger regulatorischen Druck als Katalysator nutzen können, um Prozesse zu automatisieren, dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken und eine zukunftsfähige IT-Landschaft aufzubauen.

1 DIGITALE TRANSFORMATION UND REGULATORISCHER DRUCK IN DER ENTSORGUNGSWIRTSCHAFT

Die europäische Abfallwirtschaft entwickelt sich rasant von einer primär analog und mechanisch geprägten Industrie zu einem hochgradig datengetriebenen Ökosystem. Getrieben durch steigenden Margendruck, komplexe globale Lieferketten und einen spürbaren Fachkräftemangel im administrativen sowie im logistischen Bereich, reicht eine rein manuelle Prozessabwicklung nicht mehr aus. Unternehmen müssen Transparenz in Echtzeit schaffen, um wettbewerbsfähig zu bleiben.

Gleichzeitig verschärfen sich die gesetzlichen Vorgaben kontinuierlich. Die lückenlose Rückverfolgbarkeit von Abfallströmen steht im Fokus des europäischen Grünen Deals und nationaler Umweltgesetzgebungen (Europäische Kommission, 2019). Für mittelständische Entsorgungsfachbetriebe (KMU) entwickeln sich IT-Systeme damit von reinen Verwaltungshelfern zu einer zwingenden Voraussetzung, um alle gesetzlichen Vorgaben im laufenden Betrieb zu erfüllen.

In Österreich wird dieser Transformationsdruck durch ein konkretes Datum unumkehrbar: Am 1. Januar 2027 tritt die Verpflichtung zum „Digitalen Begleitschein“ in Kraft (BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2026). Ab diesem Zeitpunkt verliert der klassische, papierbasierte Begleitschein in den Fahrerkabinen seine rechtliche Gültigkeit. Jeder Transport von gefährlichen und definierten nicht-gefährlichen Abfällen muss elektronisch erfasst und in Echtzeit an das behördliche System VEBSV 2.0 (Voll-Elektronisches Begleitschein-Verfahren) übermittelt werden.

Diese Umstellung erfordert von den Betrieben eine fundamentale Umstellung. Jede Gewichtsänderung, jede Abfallschlüsselnummer (ASN) und jede Transportfreigabe muss lückenlos digital signiert und im Hintergrund synchronisiert werden. Manuelle Nacherfassungen im Backoffice

nach Kriterien der vergangenen Jahrzehnte sind fehleranfällig, führen zu massiven Verzögerungen und bergen immense Haftungsrisiken bis hin zu empfindlichen Strafzahlungen.

Bei der Evaluierung bestehender IT-Landschaften in der Entsorgungsbranche zeigt sich ein homogenes Bild: Der Markt wird von spezialisierten, aber technologisch veralteten Branchen-Monolithen beherrscht. Diese Systeme wurden in Architekturepochen entwickelt, in denen lokaler Desktop-Betrieb der Standard und mobile Echtzeit-Datenübertragung via Web-APIs noch kein Thema waren. Die Defizite dieser Altsysteme lassen sich in drei Kernbereiche unterteilen:

- **Mangelnde Flexibilität:** Anpassungen an neue Schnittstellenformate wie VEBSV 2.0 sind extrem zeitaufwendig und erfordern tiefgreifende Eingriffe in den proprietären Quellcode.
- **Hohe Gesamtbetriebskosten (TCO):** Durch den sogenannten Vendor-Lock-in diktieren die Softwarehersteller die Preise für Updates und Individualisierungen. Mittelständische Betriebe geraten in eine finanzielle Abhängigkeit.
- **Fehlende native Mobilität:** Die Anbindung von Tablets oder Smartphones für das Fahrpersonal ist oft nur über instabile, teure Drittanbieter-Schnittstellen möglich, was die Fehleranfälligkeit im rauen Alltagbetrieb erhöht

2 ANFORDERUNGEN UND SYSTEMARCHITEKTUR DER OPEN-SOURCE-LÖSUNG

Ein moderner Entsorgungsfachbetrieb wie die R&K GmbH stellt spezifische Anforderungen an ein ERP-System, die weit über Standardprozesse des klassischen Handels oder produzierenden Gewerbes hinausgehen. Der Entsorgungszyklus ist ein "umgedrehter Produktionsprozess": Statt definierte Rohstoffe einzukaufen und zu einem Produkt zu verarbeiten, werden unbekannte oder gemischte Stoffströme angenommen, klassifiziert, verwogen und anschließend entweder stofflich verwertet, thermisch behandelt oder deponiert.

Daraus resultiert ein hochkomplexes Anforderungsprofil für die Systemarchitektur. Die Software muss in der Lage sein, dynamische Tarife zu verarbeiten, die sich nach dem tatsächlichen Gewicht und dem Verschmutzungsgrad des Materials richten. Zudem muss eine lückenlose Stoffstromanalyse gewährleistet sein, um zu jedem Zeitpunkt nachweisen zu können, welche Abfallmengen aus welchen Quellen stammen und wo verbleiben. Ein Systembruch zwischen der physischen Waage auf dem Betriebshof und dem kaufmännischen System im Backoffice stellt dabei die größte Fehlerquelle dar.

Das technologische Fundament des hier vorgestellten Projekts bricht radikal mit der Tradition proprietärer Software. Durch die Entscheidung für das Open-Source-ERP-System Odoo wurde eine Plattform gewählt, deren Kernphilosophie auf Modularität und offener Konnektivität basiert. Odoo nutzt hierbei ein „Open-Core“-Modell: Während das mächtige Fundament vollständig Open Source ist, werden für spezifische administrative Zusatzfunktionen und mobile Optimierungen Elemente der Odoo Enterprise Edition genutzt (Odoo S.A., 2026).

Der entscheidende Vorteil für die Abfallwirtschaft liegt in dieser Hybrid-Architektur. Im Gegensatz zu den starren, proprietären Branchenlösungen bietet Odoo vollkommen transparente Lizenzkosten, die linear pro Nutzer skalieren. Viel wichtiger ist jedoch: Der geschriebene Zusatzcode und die spezifischen Workflows (wie die österreichische Abfallschlüsselnummern-Logik) bleiben offen und flexibel. Dies erlaubt es dem Entwicklungsteam von axtesys, spezifische Branchenlogiken als schlanke, isolierte Module zu implementieren, ohne den Kern des Gesamtsystems zu manipulieren. Das Unternehmen entkommt somit der klassischen Abhängigkeitsfalle (Vendor-Lock-in) eines einzelnen Spezial-Softwareherstellers und bleibt dauerhaft Herr über die eigenen Daten und Prozesse.

3 OPEN-SOURCE UND DAS ZWEI-PHASEN-MODELL IN DER PRAXIS

Ein Kernproblem ambitionierter IT-Großprojekte ist das operative Risiko beim Systemwechsel. Wenn ein Entsorgungsbetrieb an einem einzigen Tag sein komplettes Kernsystem austauscht und gleichzeitig eine neue Behördenschnittstelle in Betrieb nimmt, droht bei technischen Komplikationen der sofortige Stillstand des Betriebs. LKWs können nicht gewogen werden, die Dokumentation reißt ab und der Cashflow bricht ein.

Um dieses Einführungsrisiko für den laufenden Betrieb bei der R&K GmbH zu minimieren und eine rechtzeitige Punktlandung vor dem gesetzlichen Stichtag im Jahr 2027 zu garantieren, entschieden sich axtesys und R&K für ein zweistufiges Migrationsmodell. Durch den gezielten Einsatz von Odoo Enterprise konnte das Projekt auf bereits erprobte, hochperformante Standardmodule für die Kernbereiche zurückgreifen, während die individuellen Anpassungen agil aufgesetzt wurden. Dieser strategische Phasenplan stellt sicher, dass das Unternehmen bereits frühzeitig von massiven Effizienzgewinnen profitiert, während die technische Compliance für die komplexe behördliche Schnittstelle im Hintergrund vorbereitet wird.

Phase 1: Interne Digitalisierung und die mobile Fahrer-Ansicht
Die erste Phase des Projekts fokussiert sich auf die vollständige digitale Abbildung der internen Wertschöpfungskette bei R&K. Das primäre Ziel dieses Entwicklungsabschnitts liegt darin, den fehleranfälligen Papierweg im täglichen Ablauf zu eliminieren und eine durchgängige, medienbruchfreie Datenkette zu schaffen. Das konzeptionelle und technische Grundgerüst dieser Phase umfasst folgende wesentliche Säulen:

- Die mobile Tablet-Lösung (Fahreransicht, Abb. 1 links und rechts):
  Das Fahrpersonal erhält alle anstehenden Aufträge per Echtzeit-Push-Nachricht auf robuste Industrie-Tablets direkt im Lkw. Die Fahrer sehen sofort die exakten Abholorte sowie die benötigten Container-Typen und haben alle auftragsrelevanten Daten direkt vor Ort digital im Blick.
- Beschleunigte Echtzeit-Prozesskette: Sobald der Fahrer die Übernahme auf dem Tablet quittiert und den Auftrag vor Ort abschließt, stehen sämtliche Daten fehlerfrei im Backoffice bereit (Abb. 2). Manuelle Tippfehler durch das nachträgliche Entziffern von handgeschriebenen Zetteln werden damit systemseitig unterbunden. Die Rechnungslegung kann in Folge automatisiert und ohne mehrtägige Post- oder Erfassungswege direkt im Anschluss eingeleitet werden (Order-to-Cash-Beschleunigung).

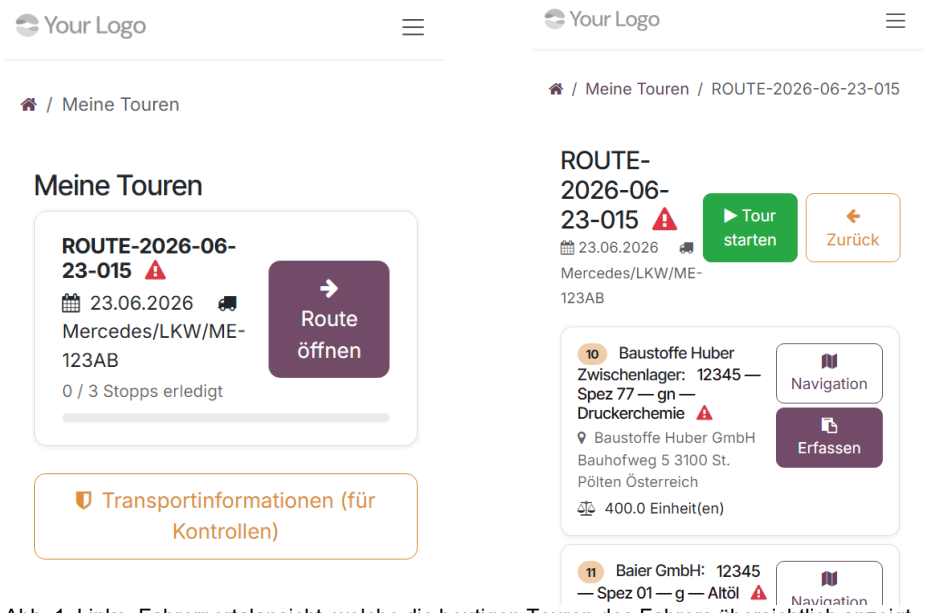


Abb. 1: Links: Fahrerportalansicht, welche die heutigen Touren des Fahrers übersichtlich anzeigt. An diesem Tag ist genau eine Tour geplant. Rechts: Fahrerportalansicht, welche die einzelnen Stopps einer Tour anzeigt.

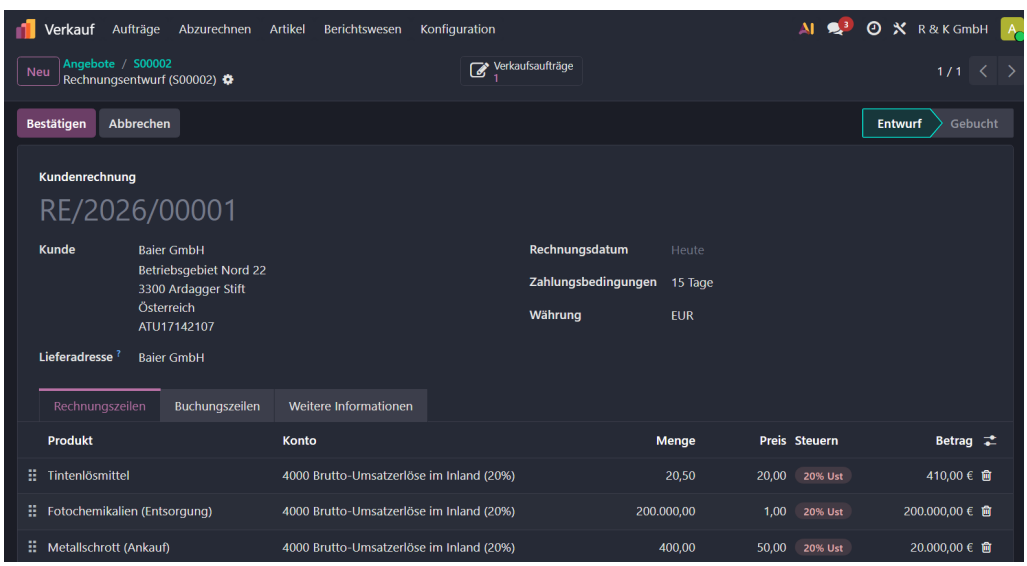


Abb. 2: Backoffice-(Backend-)Ansicht der Mitarbeiter. Als Beispiel sieht man eine Rechnung, die mithilfe der gegebenen Daten (Angebot und Abholdaten aus dem Fahrerportal) mit nur einem Klick erstellt wurde.

Phase 2: Die native Integration der VEBSV 2.0-Schnittstelle
Während Phase 1 die operativen Hausaufgaben erledigt hat und für einen reibungslosen Datenfluss sorgt, bereitet Phase 2 das System strategisch auf den gesetzlichen Stichtag vor. Da die internen Daten in Odoo durch die digitale Erfassung auf den Tablets bereits vollständig, sauber strukturiert und verifiziert vorliegen, ist das Fundament für die behördliche Meldung perfekt gelegt. Die in der Umsetzung befindliche Phase 2 beinhaltet die Entwicklung eines Odoo-Moduls, das die erfassten Begleitscheindaten automatisch in das geforderte XML-/Webservice-Format der VEBSV 2.0 transformiert. Die Validierung und Meldung erfolgt automatisiert im Hintergrund, sobald der digitale Begleitschein auf dem Tablet finalisiert wird. Bei Verkehrskontrollen kann das Fahrpersonal den digital generierten Begleitschein mitsamt behördlichem Status direkt auf dem Tablet-Bildschirm vorweisen.

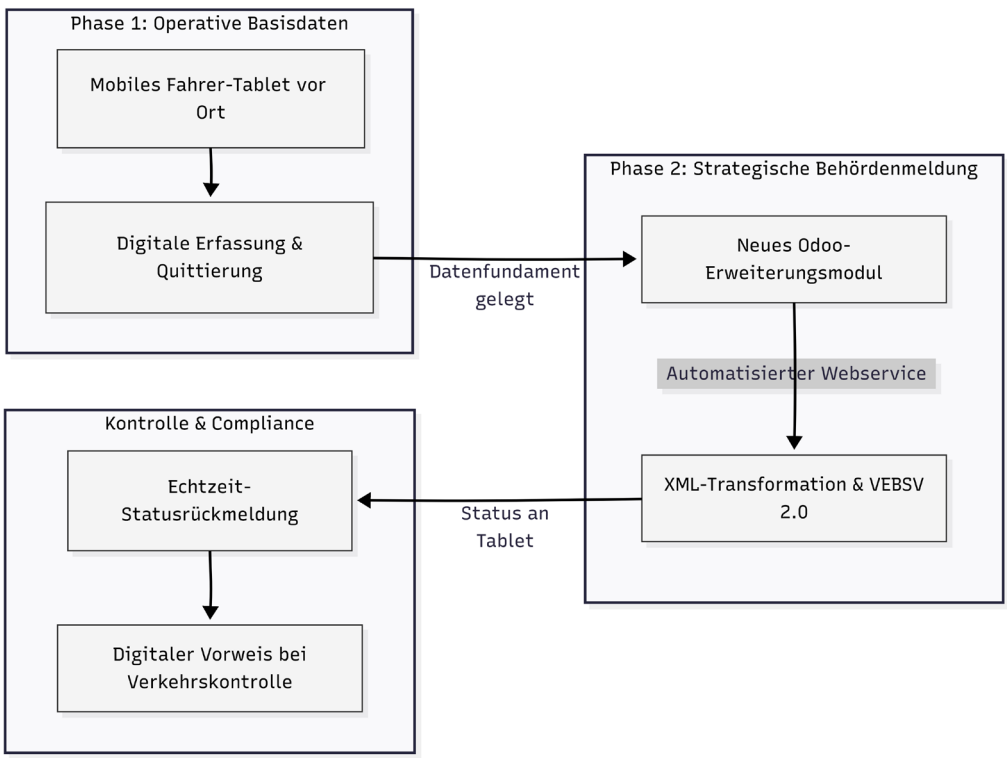


Abb. 3: Übersicht der Datenverarbeitung im Projekt: Von der mobilen Datenerfassung auf dem Lkw (Phase 1) über die automatische XML-Verarbeitung im neuen Odoo-Modul (Phase 2) bis hin zur fertigen Statusrückmeldung für das Fahrpersonal bei einer Verkehrskontrolle (Eigene Darstellung).

Das Praxisbeispiel der Kooperation zwischen der axtesys GmbH und der R&K GmbH demonstriert eindrucksvoll, dass der anstehende regulatorische Druck rund um den digitalen Begleitschein 2027 und das System VEBSV 2.0 kein reiner Kostenfaktor sein muss. Durch den strategischen Einsatz einer flexiblen Open-Source-Architektur wie Odoo wird die gesetzliche Pflicht stattdessen zum Katalysator für eine längst überfällige digitale Transformation genutzt.

Das gewählte Zwei-Phasen-Modell nimmt dem Systemwechsel das Risiko. Durch die vorgezogene Digitalisierung der internen Abläufe und die Einführung der mobilen Tablet-Ansicht für das Fahrpersonal konnte die R&K GmbH schon vor dem gesetzlichen Stichtag erhebliche Effizienzsteigerungen erzielen: Die Fehlerquote in der Datenerfassung sank gegen Null, die

Durchlaufzeiten an den Waagen wurden optimiert und der administrative Aufwand in der Rechnungslegung drastisch reduziert. Gleichzeitig wirkt die moderne, digitale Arbeitsumgebung dem akuten Fachkräftemangel entgegen, da administrative Hürden für das Fahrpersonal abgebaut werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mittelständische Entsorgungsunternehmen nicht auf die starren Update-Zyklen teurer Legacy-Monolithen warten müssen. Moderne, modular skalierbare ERP-Systeme wie Odoo bieten eine pragmatische, kostengünstige und hochgradig flexible Alternative. Selbst unter Einsatz von Enterprise-Komponenten sichert der offene Kern der Architektur die Unabhängigkeit des Betriebs und stellt sowohl operative Exzellenz als auch zukünftige gesetzliche Compliance sicher. Der Weg zu 2027 ist damit keine Bedrohung, sondern eine greifbare Chance zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der gesamten Branche.

LITERATURVERZEICHNIS

BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2026) *VEBSV 2.0.* Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Von https://www.edm.gv.at/edm_portal/cms.do?get=/portal/informationen/anwendungenthemen/vebsv20.main abgerufen.

Europäische Kommission (2019) *The European Green Deal.* Brüssel: Europäische Kommission.

Odoo S.A. (2026) *Odoo Enterprise Edition License v1.0.* Odoo S.A. Von https://www.odoo.com/documentation/19.0/de/legal/licenses.html abgerufen.

KONTAKT

Ing. Rainer Saga
rainer.saga@axtesys.at
+43 660 210 2643
Odoo-Teamleitung
axtesys GmbH
www.axtesys.at

Quantifizierung von Recyclingpotenzialen für Post-Consumer Polypropylen mittels Abfallcharakterisierung und Materialflussanalyse

Sarah Schmidt[1], Mohammed Hafis Veralikkattil Assainar[1], Chaimae Chettouh[2], Victoria Goetjes[2], Hans-Peter Heim[2] & David Laner[1]
[1)] Universität Kassel, Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik, Institut für Wasser, Abfall, Umwelt, Fachbereich Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen, Kassel, Deutschland
[2)] Universität Kassel, Fachgebiet Kunststofftechnik, Institut für Werkstofftechnik, Fachbereich Maschinenbau, Kassel, Deutschland

KURZFASSUNG: Kunststoffe gehören weltweit zu den Werkstoffen mit den höchsten Wachstumsraten. Innerhalb dieser Materialgruppe zählt Polypropylen (PP) neben Polyethylen zu den meistverwendeten Polymeren und findet in zahlreichen Anwendungsbereichen Einsatz. Post-Consumer-Polypropylen (PC-PP) wird als Bestandteil der Polyolefin-Mischfraktion häufig in Anwendungen verwertet, die geringere Anforderungen an Materialeigenschaften und Schadstofffreiheit stellen. Der vorliegende Beitrag verfolgt das Ziel, die Potenziale zur Erhöhung des PC-PP-Recyclings in Deutschland zu ermitteln. Hierfür werden Ergebnisse aus Materialflussanalysen, Abfallcharakterisierungskampagnen und werkstofftechnischen Analysen kombiniert. Dies ermöglicht eine Quantifizierung bislang ungenutzter Recyclingpotenziale sowie die Ableitung von Anforderungen an zukünftige Sortier- und Aufbereitungstechnologien. Die gewonnenen Erkenntnisse schaffen eine Grundlage für die Entwicklung von Strategien zur Steigerung von Recyclingquoten und des Einsatzes von PC-PP-Rezyklaten. Gleichzeitig leisten sie einen Beitrag zur Einordnung dieser Potenziale vor dem Hintergrund regulatorischer Vorgaben und werkstofftechnischer Anforderungen.

1 EINLEITUNG

Kunststoffe sind der am schnellsten wachsende Massenwerkstoff weltweit (IEA, 2019). Um die steigende Nachfrage nach Kunststoffen zu decken und zugleich die Klimaziele zu erreichen, ist ein verstärktes Recycling von Kunststoffen unerlässlich (Bachmann, et al., 2023). Neben der Steigerung der Recyclingmengen ist dabei insbesondere die Erzeugung qualitativ hochwertiger Rezyklate entscheidend, um Kunststoffkreisläufe in unterschiedlichen Anwendungsfeldern zu schließen. Polypropylen (PP) zählt neben Polyethylen zu den am häufigsten eingesetzten Polymeren mit diversen Anwendungsfeldern (Conversio, 2024). Die ökologischen Vorteile der Bereitstellung eng spezifizierter Rezyklate durch den Ersatz von Kunststoffneuware werden bislang nicht umfassend realisiert, da Post-Consumer-Polypropylen (PC-PP) als Bestandteil der Polyolefin-Mischfraktion häufig in Anwendungen mit geringeren Anforderungen an Funktion und Schadstoffgehalte zum Einsatz kommt (Klotz, Haupt, & Hellweg, 2022). In Anbetracht der mengenmäßigen Bedeutung von PC-PP ist die Erschließung hochwertiger Absatzwege eine zentrale Voraussetzung, um PP-Stoffkreisläufe zu schließen sowie gesetzliche Recycling- und Rezyklateinsatzquoten zu erreichen.

Ziel des Beitrages ist es, anhand einer Kombination von Materialflussanalysen, Abfallcharakterisierungen und werkstofftechnischen Untersuchungen Potenziale für die Steigerung des PC-PP-Recyclings in Deutschland zu quantifizieren.

2 MATERIAL & METHODEN

2.1 Materialflussanalyse

Die Materialflussanalyse ist eine systemanalytische Methode zur Quantifizierung von Materialflüssen und -lagern in räumlich und zeitlich definierten Systemen (Brunner & Rechberger, 2017). In dieser Arbeit dient sie dazu, relevante Abfallströme zu identifizieren, in denen PC-PP enthalten ist und die als potenzielle Ausgangsmaterialien für die Herstellung hochwertiger PC-PP-Rezyklate genutzt werden können.

2.2 Abfallcharakterisierung

Im Rahmen des Forschungsprojekts PC-PP4Pkw werden verschiedene PP-haltige Abfallströme aus den Bereichen Leichtverpackungen, Altfahrzeuge, Gewerbeabfall und Hartkunststoffe aus der Sperrabfallsammlung sowie aus der Sortierung von Restabfällen untersucht. Aus den heterogen zusammengesetzten PC-PP-haltigen Abfallproben werden im Rahmen von Sortieranalysen verschiedene in sich homogenere, aufkonzentrierte PP-Abfallfraktionen gewonnen, die als Ausgangsmaterial für werkstofftechnische Analysen dienen.

In diesem Beitrag wird das Vorgehen exemplarisch anhand des Abfallstroms Leichtverpackungen vorgestellt. In zwei Leichtverpackungsabfallsortieranlagen in Deutschland wurden die Sortierfraktionen „324-0 Polypropylen“ beprobt. Die Probenahme erfolgte im Dezember 2025 (P1) sowie im März 2026 (P2). Der Probenumfang betrug 15,5 kg (P1) bzw. 18,8 kg (P2). Das Probenmaterial wurde einer mehrstufigen manuellen Sortierung nach Material, Kunststoffart, Verarbeitungsverfahren, Produktart und Farbe unterzogen. Anschließend wurden die Gehalte an Feuchtigkeit und Restanhaftungen bestimmt.

2.3 Werkstofftechnische Analysen

Die im Rahmen der Abfallcharakterisierung identifizierten PP-Abfallfraktionen werden hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eignung für die Herstellung von Rezyklaten untersucht. Im Fokus stehen dabei sowohl die werkstofftechnischen Eigenschaften als auch potenzielle Schadstoffgehalte. Die Bestimmung des Schmelze-Volumenfließrate liefert über die Viskosität Hinweise auf den Einfluss vorheriger Verarbeitungs- und Nutzungsprozesse. Ergänzend werden Hochtemperatur-Gelpermeationschromatographie-Messungen (HT-GPC) durchgeführt, um Molekulargewicht und Molekulargewichtsverteilung der Materialien detailliert zu charakterisieren. Flüchtige Bestandteile sowie potenzielle Schadstoffe werden mittels GC-MS-Analysen und Fogging-Untersuchungen erfasst.

3 ERGEBNISSE

3.1 PC-PP-Abfallströme in Deutschland

Im Jahr 2023 fielen in Deutschland rund 1.055 kt PC-PP-Abfälle an. Etwa 60 % dieser Menge entfielen auf Verpackungen, die sich in Haushaltsverpackungen, Gewerbe- und Industrieverpackungen, Flaschendeckel aus dem Einweg- und Mehrwegpfandsystem sowie Transportverpackungen untergliedern lassen. Von den PC-PP-Haushaltsverpackungsabfällen wurden im Jahr 2023 rund 369 kt über die Leichtverpackungssammlung erfasst, was etwa der Hälfte des entsprechenden Abfallaufkommens entspricht.

3.2 Zusammensetzung von PC-PP-Abfällen aus der Leichtverpackungssortierung

Die manuelle Nachsortierung der Leichtverpackungssortierfraktion „324-0 Polypropylen“ ergab nach Abzug von Restanhaftungen und Feuchten einen PP-Gehalt von 74% bzw. 79% je Probe. Innerhalb der Verpackungsanwendungen dominierten weiße (51%, bzw. 38%) und transparente Verpackungen (40%, bzw. 38%), wohingegen nur 9%, bzw. 24% der PP-Verpackungsabfälle bunt waren (siehe Abb. 1). Es fällt auf, dass für die häufigsten Produktanwendungen (Becher, Schalen und Deckel) weder einheitliche Verarbeitungsverfahren noch einheitliche Farbgebung genutzt werden. Zudem erschweren Bedruckung und Belabelung Sortierung und Recycling.

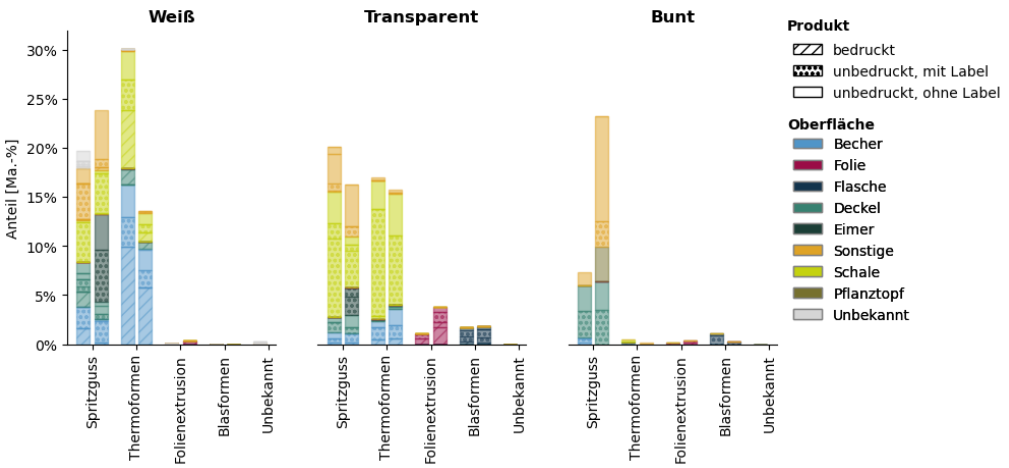


Abb 1. Zusammensetzung der PP-Fraktion in der Sortierfraktion 324-0 aus zwei Sortieranlagen für Leichtverpackungsabfälle in Deutschland (links: P1, rechts: P2).

3.3 Viskosität der PC-PP-Fraktionen

Die exemplarische Auswertung der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) verschiedener PP-Fraktionen (Abb. 2) zeigte Unterschiede zwischen Fraktionen je nach Verarbeitungsverfahren und Farbgebung.

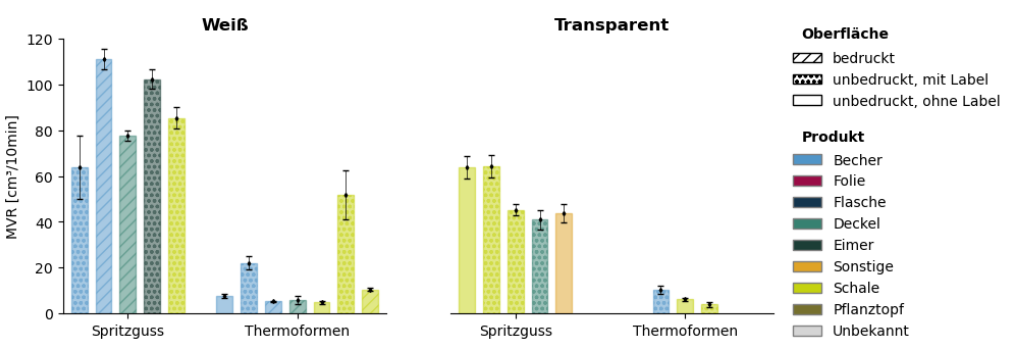


Abb 2. Schmelze-Volumenfließrate ausgewählter PP-Fraktionen aus der Sortierfraktion 324-0 aus zwei Sortieranlagen für Leichtverpackungsabfälle in Deutschland (Balken zeigen den Mittelwert, Fehlerbalken zeigen ± 2 Standardabweichungen, basierend auf 3 Einzelproben je Fraktion und 10 Messungen je Einzelprobe).

Demgegenüber fielen Unterschiede zwischen Produktarten, die demselben Verarbeitungsverfahren zugeordnet werden können, sowie unterschiedliche Oberflächengestaltungen gering aus. Die Ergebnisse liefern damit erste Hinweise darauf, dass eine differenzierte Erfassung und Aufbereitung entsprechender Teilfraktionen zur Herstellung von Rezyklaten mit homogeneren Materialeigenschaften beitragen kann.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Kombination aus system- und materialanalytischer Forschung ermöglicht es, vorhandene PC-PP-Recyclingpotenziale zu quantifizieren und Anforderungen an Sortier- und Aufbereitungsverfahren abzuleiten, welche im weiteren Projektverlauf im Technikumsmaßstab erprobt werden sollen. Die Ergebnisse liefern wichtige Entscheidungsgrundlagen zur Realisierung höherer Recyclingniveaus und Rezyklateinsatzquoten von PC-PP im Kontext bestehender regulatorischer Zielvorgaben und werkstofftechnischer Rahmenbedingungen.

DANKSAGUNG

Der Beitrag ist Teil des Forschungsprojektes „Einsatz von Post-Consumer-Polypropylen-Rezyklat in technisch anspruchsvollen Anwendungen, insbesondere im Pkw-Innenraum“ (PC-PP4Pkw), das im Rahmen der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wird.

LITERATURVERZEICHNIS

Bachmann, M., Zibunas, C., Hartmann, J., Tulus, V., Suh, S., Guillén-Gosálbez, G., & Bardow, A. (2023). Towards circular plastics within planetary boundaries. *Nature Sustainability*, 599-610.

Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2017). *Handbook of material flow analysis. For environmental, resource, and waste engineers.* Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.

Conversio. (2024). *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 - Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen.* Mainz.

IEA. (2019). *Material efficiency in clean energy transitions.* France.

Klotz, M., Haupt, M., & Hellweg, S. (2022). Limited utilization options for secondary plastics may restrict their circularity. *Waste Management*, 251–270.

KONTAKT

Dr.-Ing. Sarah Schmidt
sarah.schmidt@uni-kassel.de
+49 561 804-3954
Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik
Universität Kassel
www.uni-kassel.de/go/RMAT/

Dekontamination und Entfärbung im lösemittelbasierten Recycling von Polyethylen aus flexiblen Verpackungsabfällen

Johannes Schneider[1] & Petra Schmid[1]
[1)] Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV, Abteilung Verfahrensentwicklung Polymerrecycling, Freising, Deutschland

KURZFASSUNG: Das Recycling flexibler Kunststoffverpackungen stellt aufgrund komplexer Materialverbunde, Verunreinigungen und fehlender Sortierinfrastrukturen zur Trennung von Lebensmittel- und Nicht-Lebensmittelverpackungen eine erhebliche Herausforderung dar. Mit der europäischen Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) werden ab 2030 verbindliche Mindestrezyklatanteile auch für Lebensmittelverpackungen vorgeschrieben, was den Bedarf an leistungsfähigen Recyclingtechnologien drastisch erhöht. In dieser Arbeit wurde das lösemittelbasierte Recycling von Polyethylen (PE) aus flexiblen Verpackungsabfällen hinsichtlich seiner Reinigungsleistung und der erzielbaren Rezyklatqualität untersucht. Mittels eines Challenge Tests mit neun Modell-Kontaminanten unterschiedlicher physikalisch-chemischer Eigenschaften wurde die Dekontaminationseffizienz quantifiziert. Für flüchtige und mittelflüchtige Kontaminanten mit Molmassen unter 300 g/mol wurden Reinigungseffizienzen von über 99 % erzielt. Für höhermolekulare Kontaminanten (DEHA, TEHTM) konnte durch den Einsatz einer zusätzlichen Reinigungsstufe die Effizienz von 67-94 % auf 91-98 % gesteigert werden. Versuche mit realen Verpackungsabfällen aus Sortierfraktionen der dualen Systeme zeigten zudem, dass durch erweiterte Reinigungsstufen zur Farb- und Feinstpartikelentfernung eine optische Rezyklatqualität erreicht wird, die mit Neuware vergleichbar ist. Die Ergebnisse belegen das hohe Potenzial des lösemittelbasierten Recyclings zur Erzeugung hochwertiger, potenziell lebensmitteltauglicher PE-Rezyklate aus komplexen post-consumer Abfallströmen und unterstreichen dessen Bedeutung als komplementäre Technologie zum mechanischen Recycling für die Schließung von Kunststoffkreisläufen im Verpackungsbereich.

1 EINLEITUNG

Weltweit werden pro Jahr ca. 431 Mio. t Kunststoffe verbraucht (Plastics Europe, 2025). Verpackungen stellen dabei mit rund 44 % den größten Anteil am weltweiten Kunststoffverbrauch dar, wobei Polyolefine (PO) den dominierenden Materialanteil in Verpackungsanwendungen bilden (Plastics Europe, 2022). Ein Großteil davon stammt weiterhin aus fossilen Rohstoffen, während nur etwa 15 % aus dem Recycling kommen. Von den post-consumer Verpackungsabfällen werden lediglich etwa 35 % Recyclinganlagen zugeführt, der überwiegende Rest wird thermisch verwertet. Hauptgründe hierfür sind Materialgemische ohne geeignete Sortierinfrastruktur sowie nicht oder nur schwer trennbare Verbundmaterialien (z. B. Multilayer-Verpackungen), die mit den derzeit verfügbaren Recyclingtechnologien nicht hochwertig aufbereitet werden können (Wende, Mäurer, Agulla, Schlummer, & Fell, 2023).

Mit der europäischen Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) werden ab 2030 verbindliche Mindestrezyklatanteile für Kunststoffe in Verpackungen festgeschrieben – auch für Lebensmittelverpackungen (The European Parliament and the Council of the European Union, 2025). Dies erhöht die Nachfrage nach qualitativ hochwertigen Rezyklaten drastisch und setzt die gesamte Wertschöpfungskette unter erheblichen Transformationsdruck.

Dem steht ein bislang unzureichender technologischer Status quo gegenüber. Mechanisches Recycling ist derzeit das gängigste Verfahren zur Rückgewinnung von Kunststoffen. Im Abfallstrom enthaltene Fremdmaterialen, insbesondere bei Verbundmaterialien wie Multilayer-Verpackungen, oder Verunreinigungen und Kontaminanten, wie Farben, Klebstoffe oder Additive

können dabei allerdings nur eingeschränkt entfernt werden. Diese finden sich häufig im Bereich flexibler Lebensmittelverpackungen (Freitag, et al., 2024). Neben geeigneten Recyclingprozessen, die entsprechende Reinigungsleistungen nachweisen können, ist die Sortierung von Abfallströmen einschließlich der Trennung von Lebensmittel- und Nicht-Lebensmittelverpackungen eine wichtige Voraussetzung für die Wiedereinsetzbarkeit der Rezyklate. Die europäische Verordnung über Materialien aus recyceltem Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, schreibt vor, dass ausschließlich Abfälle aus Lebensmittelverpackungen zu Rezyklaten verarbeitet werden dürfen, die wieder für den direkten Lebensmittelkontakt vorgesehen sind (European Commission, 2022). Eine entsprechende getrennte Sammlung oder Sortierinfrastruktur für post-consumer Abfälle ist bislang jedoch nicht vorhanden. Da Lebensmittel- und Nicht-Lebensmittelverpackungen in Deutschland derzeit nicht separat erfasst oder im Sortierprozess getrennt werden, ist der technische Status quo des Recyclings flexibler Verpackungen unbefriedigend. Die Mischung verschiedener Materialien und der hohe Anteil an Verunreinigungen machen es momentan unmöglich, die Rezyklate in anspruchsvollen Anwendungen wie Lebensmittelverpackungen einzusetzen, was einen geschlossenen Werkstoffkreislauf verhindert.

Das lösemittelbasierte Recycling bietet für solche Abfallströme eine Lösung zur Rückgewinnung sortenreiner Kunststoffe (Xu, et al., 2025). Dabei können einzelne Polymere gezielt mithilfe von selektiven Lösemitteln aufgelöst werden. Durch die Delamination von Multilayer-Schichtaufbauten aufgrund der Diffusion des Lösemittels durch die äußeren Schichten, können dabei auch innenliegende Kunststoffschichten gelöst werden (Patentnr. US5278282A, 1994). Der unlösliche Rückstand, bei Verpackungsabfällen meist bestehend aus Fremdkunststoffen, Aluminium oder Papier wird anschließend mechanisch aus der Lösung abgetrennt. In der Lösung enthaltene feinpartikuläre Verunreinigungen oder Kontaminanten können anschließend durch Reinigungsprozesse abgereichert werden. Nach dem Trocknen der Lösung erhält man ein sortenreines post-consumer Rezyklat (PCR) in Form von Granulat. Durch spezifische Reinigungsprozesse können lösliche sowie unlösliche Farbstoffe, Additive, Geruchsstoffe oder andere potenzielle Schadstoffe effektiv abgereichert werden. Beispielsweise konnten Phthalate, die häufig als Weichmacher in PVC eingesetzt werden, durch eine mehrstufige Extraktion um bis zu 99,9 % im Polymer reduziert werden (Wagner & Schlummer, 2024). Neben solchen löslichen Additiven konnte auch für unlösliche Farbpigmente durch Filtration oder Zentrifugation eine deutliche Abreicherung von 80 - 90 % gezeigt werden (Arends, Schlummer, & Mäurer, 2012).

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Challenge Test

Für die Bewertung der Reinigungseffizienz von Recyclingprozessen mittels Challenge Tests wurde ein Referenzmaterial aus LDPE Flakes mit ausgewählten Modell-Kontaminanten kontaminiert. Diese Modell-Kontaminaten sind Substanzen mit unterschiedlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften und stehen stellvertretend für mögliche chemische Klassen von Kontaminanten. In der Regel werden die Modell-Kontaminaten dem Ausgangsmaterial in überhöhten Konzentrationen zugesetzt. Die Ausgangskonzentration (cp_0; im Ausgangsmaterial nach der Zugabe) und ihre Konzentration nach Durchlaufen der Recyclingprozesse werden durch analytische Messungen bestimmt. Auf diese Weise lässt sich die Dekontaminations-/Reinigungsleistung berechnen, die als prozentuale Reduktion der Konzentrationen der Modell-Kontaminanten im Vergleich zur Ausgangskonzentration vor Eintritt in den Recyclingprozess ausgedrückt wird (EFSA Panel on on food contact materials, 2011). Tab. 1 zeigt die dabei eingesetzten Modell-Kontaminanten.

Tab. 1: Für den Challenge-Test verwendete Modell-Kontaminanten mit Angaben zu ihrem Molekulargewicht, ihren funktionellen Gruppen und ihren physikalischen Eigenschaften

Substanz	MW[1]	Funktionelle Gruppen	Eigenschaften
Toluol	92.1	Aromatischer Kohlenwasserstoff	flüchtig, unpolar
Chlorobenzol	112.6	Aromatischer Kohlenwasserstoff, halogenhaltig	flüchtig, polar
Limonen	136.2	Aliphatischer Kohlenwasserstoff	flüchtig, unpolar
Phenylcyclohexan	160.3	Aromatischer Kohlenwasserstoff	flüchtig, unpolar
Benzophenon	182.2	Aromatisches Keton	flüchtig, polar
Butylsalicylat	194.2	Aliphatischer Ester	flüchtig, unpolar
Methylpalmitat	270.5	Aliphatischer Ester	mittelflüchtig, mittel-polar
Diethylhexyladipat (DEHA)	390.6	Aliphatischer Ester	mittelflüchtig, mittel-polar
Tris(ethylhexyl) trimellitat (TEHTM; TOTM)	546.8	Aromatischer Ester	mittelflüchtig, mittel-polar

[1)] Molekulargewicht (Mw) in g/mol

Für die Kontamination wurden LDPE Flakes mit den Modell-Kontaminanten in einer Konzentration von jeweils ca. 1000 ppm vermischt. Die kontaminierten Flakes wurden anschließend für die Versuche zum lösemittelbasierten Recycling bereitgestellt. Die kontaminierten Flakes, sowie Rezyklate aus dem lösemittelbasierten Recycling wurden für die Bestimmung der Konzentration der Kontaminanten analysiert. Dafür wurde jeweils 1,0 g der Proben in ein Headspace-Vial eingewogen und zweimal mit 10 ml Dichlormethan über einen Zeitraum von 3 Tagen bei 40 °C extrahiert (Duplikat). Die Extrakte wurden anschließend mittels Gaschromatographie gekoppelt mit Massenspektrometrie (MS), bzw. Flammenionisationsdetektor (FID) bei den flüchtigen Verbindungen Toluol und Chlorbenzol, analysiert. Die Signale der Modell-Kontaminanten im Gaschromatogramm wurden integriert. Die Konzentrationen der jeweiligen Kontaminanten wurden anhand von Kalibrierungskurven bestimmt, die unter Verwendung externer Standards erstellt wurden.

2.2 Lösemittelbasiertes Recycling

Für den Challenge Test wurden die kontaminierten LDPE Flakes auf einer kleintechnischen Demonstrationsanlage für lösemittelbasiertes Recycling am Fraunhofer IVV verarbeitet. Dabei wurden 3 Ansätze (R1, R2, R3) je 3,5 kg Flakes recycelt. In allen drei Ansätzen wurden die LDPE Flakes zunächst mit einem spezifischen Lösemittel für PE in einem doppelwandig beheiztem Rührkessel aufgelöst. Das Lösemittel wurde durch CreaCycle GmbH, Grevenbroich, bereitgestellt. Gemäß dem GHS (Globally Harmonized System) ist das Lösemittel ungefährlich und unterliegt keiner Kennzeichnungspflicht gemäß GHS. CreaSolv® ist eine eingetragene Marke der CreaCycle GmbH, Grevenbroich. Die Zusammensetzung der CreaSolv®-Formulierungen ist geistiges Eigentum der CreaCycle GmbH und kann hier nicht offengelegt werden. Die Lösung wurde anschließend in einem mehrstufigen Reinigungsprozess aufbereitet. Alle Ansätze wurden mit den Reinigungsstufen 1 und 2 zur Entfernung ungelöster Fremdmaterialien und kleinerer Schmutzpartikel sowie vernetzter Gelpartikel behandelt. Bei R3 wurde zudem eine weitere extraktive Reinigungsstufe 3 zur Reduktion löslicher Kontaminanten eingesetzt. Anschließend wurden alle Lösungen in einem Trocknungskessel (In-house Konstruktion durch Lömi GmbH, Großostheim) getrocknet und mittels abschließender Entgasungsextrusion das restliche Lösemittel entfernt, das recycelte PE als Strang ausgetragen und anschließend granuliert.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden reale Verpackungsabfälle aus einer Sortierfraktion der dualen Systeme für flexible Folien mit dem lösemittelbasierten Recycling am Fraunhofer IVV im Labormaßstab verarbeitet. In den Laborversuchen wurden jeweils 50 g Abfall Flakes in zwei Ansätzen (R4, R5) verarbeitet. Dabei wurde das im Abfall enthaltene PE (ca. 90 Gew.%) mit dem

bereits zuvor eingesetzten spezifischen Lösemittel für PE in einem Becherglas auf einem Magnetrührer mit Heizfunktion von Heidolph Scientific Products GmbH, Schwabach, aufgelöst. Beide Ansätze wurden anschließend mit den Reinigungsstufen 1 und 2 behandelt. Bei R5 wurde zusätzlich eine weitere Reinigungsstufe 4 zur Entfernung von Feinstpartikeln und Farben eingesetzt. Anschließend wurden alle Lösungen in einem VO400 Vakuumtrockner von Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, getrocknet. Zum Vergleich der optischen Rezyklatqualität wurden die getrockneten Rezyklate mit einer Heizpresse zu Pressfolien (Dicke 500 µm) verarbeitet.

3 ERGEBNISSE

Die Rezyklate aus dem lösemittelbasierten Recycling der realen Verpackungsabfälle unterscheiden sich deutlich in der optischen Qualität (Abb. 1). Die größtenteils bedruckten und teilweise schwarz eingefärbten Folien im Abfall führen dazu, dass sich die Farbpartikel beim Auflösen der PE Folien in der Lösung verteilen. Durch die bei R4 eingesetzten Reinigungsstufen können diese nur teilweise aus der Lösung entfernt werden, insbesondere schwarze Farbpartikel führen allerdings auch in geringen Konzentrationen zu einer Verfärbung des Rezyklats. Die zusätzliche Reinigungsstufe zur Entfernung von Kleinstpartikeln und Farben bei R5 ermöglicht eine effektive Entfernung verbleibender Verunreinigungen und Farbstoffe aus der Lösung und führt zu einer optischen Rezyklatqualität, die vergleichbar mit Neuware ist.

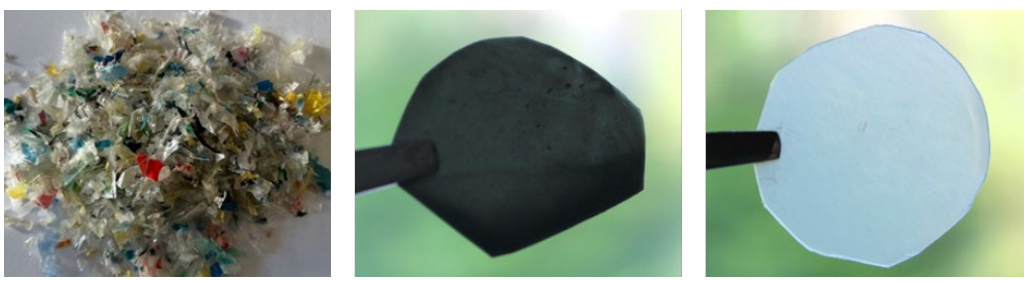


Abb. 1: links: geschredderte Folienabfälle als Ausgangsmaterial, mittig: Pressfolie aus R4, rechts: Pressfolie aus R5

Tab. 2 und Tab. 3 zeigen die Reinigungseffizienz in Prozent für die im Challenge-Test untersuchten Recyclingprozesse, sowie die Konzentrationen der kontaminierten Flakes (Input) mit Standardabweichung und der Rezyklate. Bei Werten unterhalb oder im Bereich der Bestimmungsgrenzen (LOQ) erfolgte die Berechnung der Reinigungseffizienz unter Zugrundelegung der jeweiligen LOQ (Worst-Case Szenario).

Tab. 2: Konzentration in ppm im Rezyklat und berechnete Reinigungsleistung in % je Stoff für das lösemittelbasierte Recycling

Probe	Input (cp0)	R1	R2	R3	R1	R2	R3
	Konzentration / ppm				Reinigungsleistung / %		
Toluol**	472 ± 70	< 13*	< 13*	< 13*	97,25%	97,25%	97,25%
Chlorbenzol**	862 ± 6	< 25*	< 25*	< 25*	97,10%	97,10%	97,10%
Limonen	442 ± 3	< 0.6*	< 0.6*	< 0.6*	99,86%	99,86%	99,86%
Phenylcyclohexan	1006 ± 21	< 0.1*	< 0.1*	< 0.1*	99,99%	99,99%	99,99%
Benzophenon	1127 ± 29	< 0.3*	< 0.3*	< 0.3*	99,97%	99,97%	99,97%
Butylsalicylat	1129 ± 29	< 0.4*	< 0.4*	< 0.4*	99,96%	99,96%	99,96%
Methylpalmitat	1021 ± 60	1,8	2,7	1,6	99,82%	99,73%	99,84%
DEHA	961 ± 151	57,3	74,0	15,5	94,04%	92,29%	98,39%
TEHTM	1172 ± 496	333,4	382,3	109,5	71,54%	67,37%	90,65%

*entspricht dem LOQ

**über FID ausgewertet

Anmerkung: Die ermittelten Werte wiesen bei der Referenzprobe 1 hohe Standardabweichungen auf. Dies gilt insbesondere für DEHA, was auf eine inhomogene Verteilung im Material hindeutet.

Insbesondere im Bereich flüchtiger und mittelflüchtiger Kontaminanten, mit Molmassen unterhalb 300 g/mol wird durch das lösemittelbasierte Recycling eine sehr hohe Reinigungsleistung (bis > 99 %) erreicht. Für die Kontaminanten Toluol, Chlorbenzol, Limonen, Phenylcyclohexan, Benzophenon und Butylsalicylat liegen die Restkonzentrationen unterhalb des LOQ der verwendeten Analysemethode. Daher war die Berechnung der ermittelten Reinigungseffizienzen durch das LOQ begrenzt, sodass die tatsächlichen Reinigungseffizienzen sogar noch höher sein könnten als derzeit nachgewiesen. Durch den hohen Dampfdruck der Substanzen kann davon ausgegangen werden, dass die Kontaminanten bei den Verarbeitungstemperaturen von über 200 °C in der abschließenden Entgasungsextrusion aus der Kunststoffschmelze entfernt werden. Diese Kontaminanten können daher voraussichtlich auch mit konventionellem mechanischem Recycling zu einem vergleichbaren Grad entfernt werden. Beim lösemittelbasierten Recycling kann allerdings ein Stripping durch die in der Trocknung entfernten Lösemittel unterstützend wirken.

Im Bereich der mittelflüchtigen Kontaminanten mit Molmassen über 300 g/mol, insbesondere bei DEHA erkennt man, dass die Reinigungsleistung aufgrund des deutlich geringeren Dampfdrucks stark, auf bis zu 67 %, abfällt. Durch die zusätzliche extraktive Reinigungsstufe 3 kann die Reinigungsleistung jedoch deutlich auf ca. 91 % (TEHTM) bzw. 98 % (DEHA) gesteigert werden. Wie in der Arbeit von Wagner et al. gezeigt wurde, kann die Reinigungsleistung extraktiver Reinigungsstufen durch mehrfache Extraktion weiter gesteigert werden, sodass eine weitere Erhöhung der Reinigungsleistung auf bis zu 99,9 % durch geeignete Prozessauslegung realistisch erscheint (Wagner & Schlummer, 2024).

4 ZUSAMMENFASSUNG

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass das lösemittelbasierte Recycling ein vielversprechendes Verfahren zur Rückgewinnung von hochwertigem PE aus flexiblen post-consumer Verpackungsabfällen darstellt. Angesichts der ab 2030 durch die PPWR vorgeschriebenen Mindestrezyklatanteile besteht ein dringender Bedarf an Recyclingtechnologien, die eine ausreichende Reinigungsleistung für den Wiedereinsatz in lebensmittelkontaktierenden Anwendungen gewährleisten können.

Die Ergebnisse des Challenge Tests belegen, dass das lösemittelbasierte Recycling nicht nur für flüchtige, sondern auch für mittelflüchtige Modell-Kontaminanten, eine hohe Reinigungseffizienzen erreichen kann. Insbesondere für Kontaminanten mit Molmassen bis etwa 200 g/mol lagen die gemessenen Konzentrationen in allen Ansätzen unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenzen, sodass die tatsächliche Reinigungsleistung noch höher liegen könnte als die hier

nachgewiesenen >99,9 %. Für mittelflüchtige Kontaminanten mit höheren Molmassen (DEHA, TEHTM) zeigte sich eine geringere Reinigungsleistung im Basisprozess (67-94 %), die jedoch durch den Einsatz einer zusätzlichen Reinigungsstufe zur Reduktion löslicher Kontaminanten deutlich auf 91-98 % gesteigert werden konnte und durch geeignete Prozessauslegung weiteres Optimierungspotential bietet. Dabei kann beispielsweise eine mehrfache Extraktion helfen, die Reinigungsleistung auch für schwererflüchtige Kontaminanten zukünftig auf bis zu 99,9 % zu steigern. Dies unterstreicht die Bedeutung mehrstufiger Reinigungskonzepte innerhalb des lösemittelbasierten Recyclings, um auch schwer entfernbare, hochmolekulare Kontaminanten effektiv abzureichern.

Die Verarbeitung realer Verpackungsabfälle aus Sortierfraktionen der dualen Systeme demonstrierte darüber hinaus das Potenzial des Verfahrens zur Herstellung optisch hochwertiger Rezyklate. Während der Basisprozess bereits einen Großteil der Fremdmaterialien und gröberen Verunreinigungen entfernen konnte, führten insbesondere feinpartikuläre Farbpigmente zu einer sichtbaren Verfärbung des Rezyklats. Erst durch die Integration einer zusätzlichen Reinigungsstufe zur gezielten Entfernung von Feinstpartikeln und Farben wurde eine optische Qualität erzielt, die mit Neuware vergleichbar ist. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz in transparenten oder hellen Verpackungsanwendungen.

LITERATURVERZEICHNIS

Arends, D., Schlummer, M., & Mäurer, A. (2012). Removal of inorganic colour pigments from acrylonitrile butadiene styrene by dissolution-based recycling. *J.Mater. Cycles Waste Manag.*(14), 85-93.

EFSA Panel on on food contact materials, e. f. (2011). Scientific Opinion on the criteria to be used for safety evaluation of a mechanical recycling process to produce recycled PET intended to be used for manufacture of materials and articles in contact with food. *EFS2 (EFSA Journal)*.

European Commission. (2022). Commission Regulation (EU) 2022/1616 of 15 September 2022 on recycled plastic materials and articles intended to come into contact with foods, and repealing Regulation (EC) No 282/2008. *Official Journal of the European Union*.

Freitag, N., Schneider, J., Decottignies, V., Fell, T., Kucukpinar, E., & Schlummer, M. (2024). Waste study on flexible food and non-food packaging: detailed analysis of the plastic composition of European polyethylene-containing waste streams. *Materials*(17(13)).

Nauman, E. B., & Lynch, J. C. (11. January 1994). *Patentnr. US5278282A.*

Plastics Europe. (2022). *Plastics - the Facts 2022.*

Plastics Europe. (2025). *Plastics the Fast Facts 2025.*

The European Parliament and the Council of the European Union. (2025). REGULATION (EU) 2025/40 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 December 2024 on packaging and packaging waste, amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC. Brussles.

Wagner, S., & Schlummer, M. (2024). Application of solvent-based dissolution for the recycling of polyvinylchloride flooring waste containing restricted phthalate plasticizers. *Resources, Conservation & Recycling*(211).

Wende, M., Mäurer, A., Agulla, K., Schlummer, M., & Fell, T. (2023). Der lange Weg zur Kreislaufwirtschaft. *Kunststoffe*.

Xu, Z., Sanchez-Rivera, K., Granger, C., Zhou, P., del Carmen Munguia-Lopez, A., Ikegwu, U. M., . . . Huber, G. W. (2025). Solvent-based plastic recycling technologies. *Nature Chemical Engineering, Volume 2*, 407-423.

KONTAKT

Johannes Schneider
johannes.schneider@ivv.fraunhofer.de
+49 8161 491-341
Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV

Einfluss unterschiedlicher Prozessstufen des mechanischen Recyclings auf die Eigenschaften von Polypropylen-Rezyklaten

Hannah Zeilinger[1], Franz Rittmannsberger[2] & Jörg Fischer[1]
[1)] Johannes Kepler Universität Linz, Institute of Polymeric Materials and Testing & LIT Factory, Linz, Österreich
[2)] Prezero Polymers Austria GmbH, R&D, Haimburg, Österreich

KURZFASSUNG: Inhomogenität und Verunreinigungen der Inputströme im mechanischen Recycling von Kunststoffen erschweren die Herstellung hochwertiger Rezyklate. Zentrale Aufgabe im Recyclingprozess ist es, unerwünschte Bestandteile und Verschmutzungen des Inputstroms durch eine Abfolge geeigneter Prozessschritte möglichst vollständig abzutrennen. Dafür kommen unterschiedliche Sortier- und Aufbereitungsverfahren (z.B. Friktionswäscher, Dichtetrennung, und Schmelzefiltration) zum Einsatz. Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss einzelner Prozessstufen auf die Eigenschaften einer post-consumer Polypropylen (PP) Fraktion zu analysieren. Hierzu wurden Proben an definierten Positionen entlang der gesamten Recyclingkette entnommen und charakterisiert. Die Charakterisierungsmethoden beinhalteten die Schmelzflussrate (MFR), mechanische Prüfmethoden (Zugversuch und Charpy Kerbschlagbiegeversuch), und die Differenzkalorimetrie (DSC). Für eine detailliertere Zusammensetzungsanalyse wurde die Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FT-IR) verwendet.

1 EINLEITUNG

Die EU-Recyclingvorgaben im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zielen darauf ab, die Recyclingraten zu erhöhen, um Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung zu fördern. Eine wesentliche Herausforderung im mechanischen Recycling von post-consumer Kunststoffabfällen stellt der inhomogene Inputstrom dar, der neben der Zielfraktion sowohl polymere als auch nicht-polymere Fremdstoffe und Verschmutzungen enthält. Verunreinigungen und komplexe Zusammensetzungen erschweren das mechanische Recycling von Abfallströmen und wirken sich negativ auf die Materialeigenschaften der Rezyklate aus (Al-Salem et al., 2009; Thoden van Velzen et al., 2017). Um hochwertige, saubere und möglichst homogene Endprodukte zu erzielen, ist eine präzise Trennung, Wäsche und Aufbereitung des Inputmaterials erforderlich (Al-Salem et al., 2017). Im Waschprozess kommen häufig Friktionswäscher zum Einsatz, die mechanische Reibung nutzen, um Feinpartikel wie Schmutz und Papier, Kleberreste oder organische Anhaftungen von den Kunststoffpartikeln abzulösen (Ragaert aet al., 2017). Das Schwimm-Sink Verfahren ist eine dichtebasierte Sortiermethode, die Materialien aufgrund ihrer Dichte separiert. Stoffe mit höherer Dichte als das Flotationsmittel sinken ab und können aus dem Prozess ausgeschieden werden. Nachteil dieses Verfahrens ist die eingeschränkte Trennbarkeit von Materialien mit sehr ähnlichen Dichten, sodass keine effektive Separation möglich ist (Ragaert et al., 2013). Durch den Einsatz von Schmelzefiltration im Extrusionsprozess werden nicht aufschmelzende Fremdpartikel bestmöglich entfernt (Stenvall & Boldizar, 2016). Eine geeignete Technologieauswahl ermöglicht es, die Kontaminationen zu eliminieren und die Qualität des recycelten Materials zu verbessern.

2 MATERIAL UND METHODENA

2.1 Material und Vorbehandlung

Die vorsortierten post-consumer PP Ballen, die Verpackungsabfälle aus dem Lebensmittel- und Nicht-Lebensmittelbereich enthielten, wurden von der PreZero Polymers Austria GmbH

bereitgestellt und dort im industriellen Maßstab mechanisch recycelt. Zu Beginn wurden die Kunststoffballen mechanisch in einem Shredder zu Flakes zerkleinert und einer Waschlinie zugeführt. Nach der Vorabscheidung von Schwergut wie Sand, Glas, oder Metalle in einem Wassertank folgte die Entfernung von Oberflächenverschmutzungen (Feinpartikel, Papier, Lebensmittelreste, etc.) im ersten Friktionswäscher. Über eine Dichtetrennung in einem Wasserbecken mittels Schwimm-Sink Verfahren wurde die Sink-Fraktion ausgeschieden. Die verbleibende Schwimm-Fraktion durchlief einen zweiten Friktionswäscher, eine Zentrifuge, eine Mühle zur Nachzerkleinerung sowie eine thermische Trocknung. Die gewaschenen Flakes wurden in einem industriellen Recyclingextruder extrudiert und mittels Schmelzefilter von nicht aufschmelzenden Fremdstoffen gereinigt und regranuliert.

Zur repräsentativen Abbildung der Inputcharge wurden an definierten Positionen entlang der Recyclingkette alle 30 Minuten Mehrfachproben entnommen und zu positionsbezogenen Gesamtproben vermengt (Probeentnahmestellen siehe Tab. 1). Um die weitere Verarbeitbarkeit der größeren Flake-Proben zu verbessern, wurden die Proben aus dem Shredder sowie den Friktionswäschern 1 und 2 (d.h. Positionen 1 bis 3) in einer Schneidmühle nachzerkleinert. Mit Ausnahme des Rezyklat-Granulats aus Position 5 erhielten alle Proben eine zusätzliche Siebung zur Abtrennung von Feinpartikeln (< 1 mm) und Staub. Die Granulierung der Flake-Proben aus den Positionen 1-4 erfolgte auf einem Laborcompounder ohne Schmelzefilter, um vorhandene Verunreinigungen für die Charakterisierung im Material beizubehalten und den Einfluss der einzelnen Prozessschritte auf die Aufreinigung und auf das somit resultierende Eigenschaftsprofil zu ermitteln. Aus den Granulaten wurden auf einer Spritzgussmaschine normgerechte Zug- und Charpy-Schlagprüfkörper gefertigt, die bei 23 °C und 50 % relative Luftfeuchtigkeit für mindestens drei Tage ausgelagert wurden.

Tab. 1: Überblick der Probeentnahmestellen.

Position	Probenbezeichnung	Beschreibung
Position 1	Shredder	Verunreinigte Flakes, repräsentieren Inputmaterial vor mechanischem Recyclingprozess
Position 2	Friktionswäscher 1	Flakes kurz vor Eintritt in den ersten Friktionswäscher, Flakes passierten nur Vorwäscher
Position 3	Friktionswäscher 2	Flakes nach dem eigentlichen Waschvorgang
Position 4	Thermische Trocknung	Flakes nach Wasch- und Trocknungsvorgang
Position 5	Rezyklat pur	Granulat nach industriellem Extrusionsprozess, ohne Zugabe von Additiven oder Zusatzstoffen

2.2 Methoden

Die Bestimmung der Schmelze-Massefließrate erfolgte mit einem Aflow Fließprüfgerät (ZwickRoell, Ulm, Deutschland) gemäß ISO 1133-1, mit einer Prüflast von 2,16 kg bei 230 °C. Es wurden für jede Probe drei Messungen durchgeführt.
Zehn Zugprüfstäbe wurden bei 23 °C mit einer Universalprüfmaschine (ZwickRoell AllroundLine Z005 mit Multi-Extensometer, Ulm, Deutschland) gemäß ISO 527-1 und ISO 527-2 getestet. Die Traversengeschwindigkeit betrug 1 mm/min für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls und dann 50 mm/min bis zum Bruch.
Die Charpy Kerbschlagzähigkeit wurde gemäß ISO 179-1 mit einem HIT25P-Pendelschlagwerk (ZwickRoell, Ulm, Deutschland) bestimmt. 10 einseitig gekerbte Prüfkörper je Probe wurden in schmalseitiger Schlagrichtung geprüft.
Um Schmelztemperaturen und das Vorhandensein von Fremdpolymeren festzustellen, wurde ein DSC 8500 Differential-Scanning Kalorimeter (PerkinElmer, Waltham, MA, USA) verwendet. Die Proben wurden zweimal nach ISO 11357-1 und ISO 11357-3 gemessen. Das Messprogramm beinhaltete ein erstes Aufheizen von 0 °C auf 300 °C, ein Abkühlen von 300 °C auf 0 °C und ein

erneutes Aufheizen von 0 °C auf 300 °C, mit einer Heiz-/Kühlrate von 10 K/min unter Stickstoffatmosphäre (20 mL/min).
Die IR-Spektren wurden im ATR-Modus (abgeschwächte Totalreflexion) mit einem Spectrum 100 (PerkinElmer, Waltham, MA, USA) im Bereich von 4000-450 cm-1 und einer Auflösung von 4 cm-1 aufgenommen (vier Scans pro Messung). Jedes Material wurde zweimal an unterschiedlichen Granulatkörnern gemessen.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Tab. 2 fasst die MFR und die mechanischen Kennwerte – Elastizitätsmodul, Streckspannung, Bruchdehnung und Kerbschlagzähigkeit – der fünf untersuchten Proben zusammen. Eine grafische Veranschaulichung dieser Ergebnisse ist in Abb. 1 dargestellt.

Tab. 2: Zusammenfassung der Durchschnittswerte mit Standardabweichungen der MFR- und mechanischen Kennwerte.

	MFR [g/10 min]	Elastizitätsmodul [MPa]	Streckspannung [MPa]	Bruchdehnung [%]	Kerbschlagzähigkeit [kJ/m^2]
Shredder	14,6 ± 1,5	1348 ± 14	23,9 ± 0,2	7,6 ± 1,3	2,7 ± 0,5
Friktionswäscher 1	13,2 ± 0,7	1262 ± 10	27,0 ± 0,1	12,5 ± 0,1	4,0 ± 0,5
Friktionswäscher 2	13,7 ± 0,1	1261 ± 23	27,1 ± 0,2	11,6 ± 1,7	4,3 ± 0,4
Thermische Trocknung	12,6 ± 0,4	1215 ± 22	26,7 ± 0,1	11,9 ± 2,1	4,6 ± 0,3
Rezyklat pur	17,3 ± 0,3	1183 ± 21	26,4 ± 0,2	27,1 ± 8,6	4,5 ± 0,3

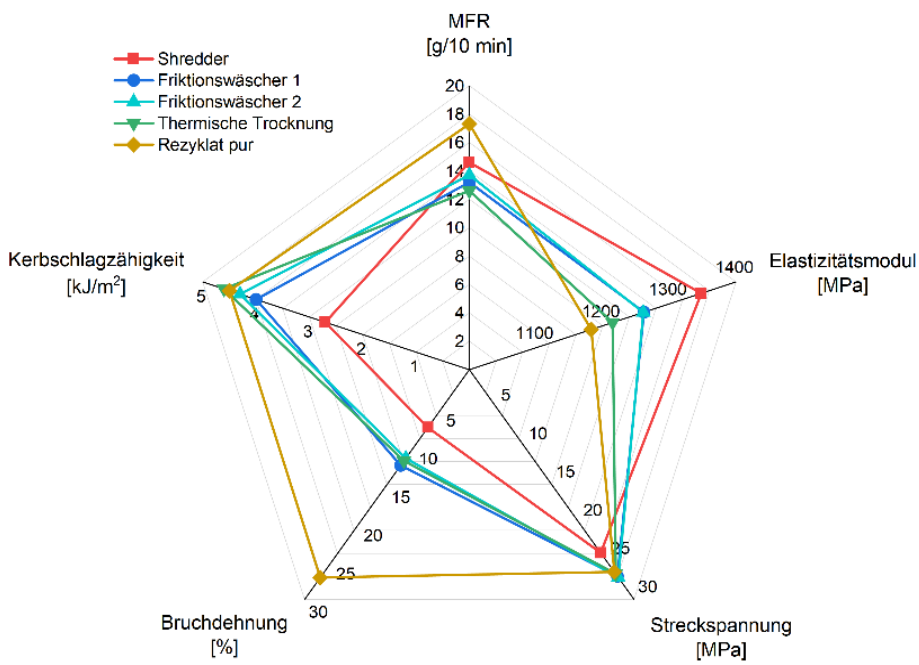


Abb. 1: Grafische Darstellung der MFR und mechanischen Kennwerte.

Den höchsten MFR-Wert erzielte das reine Rezyklat mit 17,3 g/10 min, gefolgt vom unaufbereiteten Inputmaterial (Shredder) mit 14,6 g/10 min. Die Probe aus der thermischen Trocknung bildet mit 12,6 g/10 min den niedrigsten Wert ab, während die Proben aus dem Friktionswäscher 1 und 2 mit 13,2 g/10 min und 13,7 g/10 min vergleichbare MFR-Werte aufzeigen. Bei unzureichender Stabilisierung im Prozess kann Materialabbau auftreten, der einen Anstieg der MFR-Werte bewirkt. Dies kann durch zusätzliche Stabilisierung vermieden werden.
Die im Zugversuch ermittelten mechanischen Eigenschaften weisen teilweise deutliche Unterschiede auf. Den höchsten Elastizitätsmodul erzielt die Shredder-Probe mit 1348 MPa. Mit fortschreitenden Wasch- und Trennprozessen verringert sich dieser Kennwert kontinuierlich, sodass das finale Rezyklat mit 1183 MPa einen um rund 12 % niedrigeren Modul als das Inputmaterial aufweist. Die Streckspannung variiert hingegen nur geringfügig innerhalb eines Bereichs von 23 bis 28 MPa, wobei die Shredder-Probe mit 24 MPa den Mindestwert abbildet und die übrigen Proben dicht beieinanderliegen. Deutliche Abweichungen sind bei der Bruchdehnung erkennbar. Die Shredder Probe weist mit 7,5 % den niedrigsten Wert auf, vermutlich aufgrund von Verunreinigungen und Inhomogenitäten, während sich die Proben aus dem Friktionswäscher 1 und 2 sowie der thermischen Trocknung zwischen 11,5 % und 12,5 % bewegen. Das Rezyklat erreicht mit 27 % die höchste Bruchdehnung. Dieser Anstieg lässt sich auf die Schmelzefiltration während der Extrusion zurückführen, bei der verbliebene Fremdstoffe effektiv abgeschieden wurden. Die Kombination aus höheren Elastizitätsmoduli und geringeren Bruchdehnungen der früheren Prozessstufen deutet eindeutig auf potenzielle Kontaminationen (Verschmutzungen oder Fremdpolymere) hin (Gall et al., 2020). Ein analoger Trend zeigte sich bei den Kerbschalgzähigkeiten. Hier liegt die Shredder Probe mit 2,7 kJ/m² signifikant unter den Werten der restlichen Proben, die sich zwischen 4,0 und 4,6 kJ/m² bewegen. Die Charpy Kerbschlagzähigkeiten können je nach PP Type von 2 kJ/m² bis zu 50 kJ/m² variieren (Gall et al., 2021) und hängen unter anderem vom Kristallinitätsgrad sowie dem Anteil an anorganischen Füllstoffen ab (Akhras, et al., 2024).
Alle untersuchten Proben weisen einen für PP charakteristischen Schmelzpeak im Bereich von 160 °C bis 165 °C auf. Außerdem zeigen alle Kurven einen zweiten, jedoch weniger ausgeprägten Peak bei niedrigeren Temperaturen zwischen 124 °C und 127 °C auf (Abb. 2). Dieser zweite Peak kann auf Kreuzkontamination mit Polyethylen (PE) oder auf Vorhandensein von Block-Copolymeren zurückzuführen sein (Mager et al., 2023).

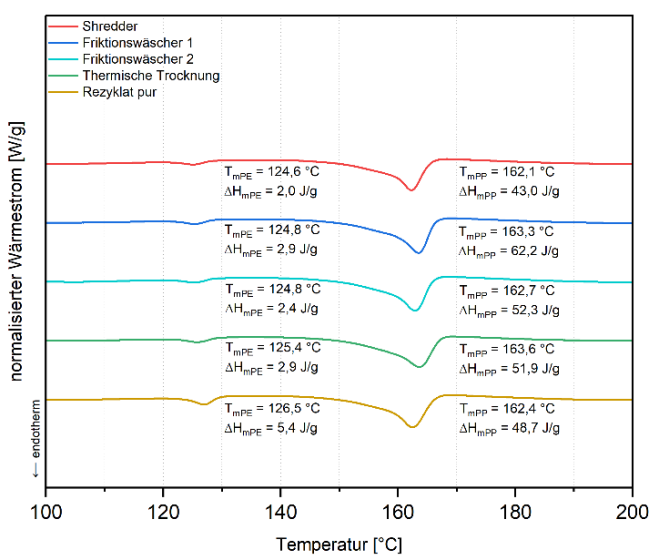


Abb. 2: DSC-Thermogramme des zweiten Aufheizzyklus der unterschiedlichen Probenpositionen mit vertikalem Versatz zueinander.

Zur präzisen Analyse der Probenzusammensetzung wurden ATR-FTIR-Spektren der einzelnen Proben aufgenommen (Abb. 3). Die Spektren zeigen signifikante Ähnlichkeiten mit denen typischer Polypropylen-Neuwaren (PP) (Verleye et al., 2001). Im Wellenzahlbereich von 3600 cm^{-1} bis 3100 cm^{-1} zeigt sich ein breiter, flacher Peak. Signale oberhalb von 3000 cm^{-1} können durch Hydroxylgruppen oder Wasserstoffbrückenbindungen verursacht werden, die aus Verunreinigungen oder oberflächengebundenem Wasser resultieren.

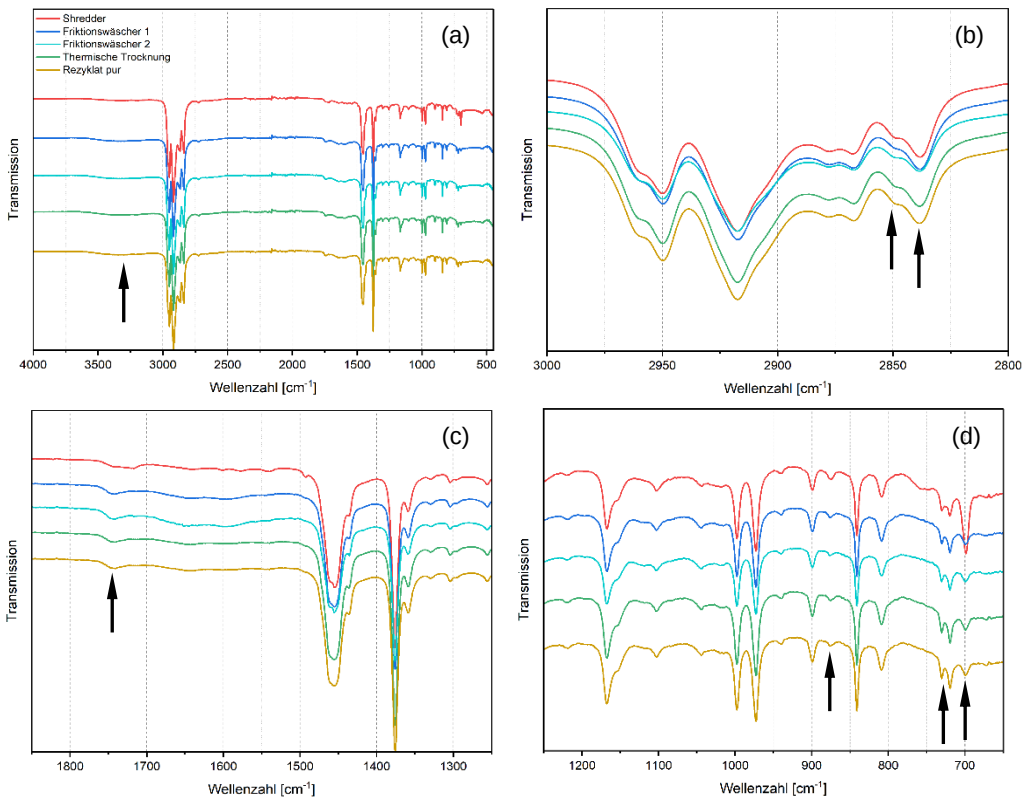


Abb. 3: ATR-FTIR Spektren der untersuchten Proben im Transmissions Modus im vertikalen Versatz zueinander. (a) Gesamtes Spektrum, (b) vergrößerter Bereich von 3000 cm^{-1} bis 2800 cm^{-1}, (c) vergrößerter Bereich von 1850 cm^{-1} bis 1250 cm^{-1}, (d) vergrößerter Bereich von 1250 cm^{-1} bis 650 cm^{-1}.

Die benachbarten Peaks bei 2850 cm^{-1} und 2838 cm^{-1} lassen sich den symmetrischen C-H-Streckschwingungen von CH2-Gruppen zuordnen. Dabei tritt der Peak bei 2850 cm^{-1} charakteristisch für Polyethylen (PE) auf, wohingegen das Signal bei 2838 cm^{-1} spezifisch für PP ist (Abb. 3b). Die nur schwache Ausprägung des Peaks bei 2850 cm^{-1} deutet auf eine geringfügige Verunreinigung durch PE hin. Diese Annahme wird durch einen detektierten Doppelpeak bei 730/720 cm^{-1} gestützt (Abb. 3d), welcher ebenfalls typisch für PE ist (Mager et al., 2021). Diese Beobachtungen korrelieren mit den Ergebnissen der DSC-Messungen. Zudem ist bei allen Proben ein schwach ausgeprägter Carbonylpeak bei 1740 cm^{-1} erkennbar (Abb. 3c). Dieser resultiert bei Polyolefinen üblicherweise aus thermo-oxidativen oder photochemischen Abbauprozessen sowie dem Einsatz esterbasierter Additive. Des Weiteren weist der Peak bei 872 cm^{-1} auf das Vorhandensein von Calciumcarbonat ($CaCO_3$) in allen Proben hin. Die Absorptionsbande bei 700 cm^{-1} deutet auf eine Kreuzkontamination mit Polystyrol (PS) hin (Gall et al., 2021). Dieses zeigt in der Shredder Probe eine deutlich höhere Intensität als in den restlichen Proben.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Überführung von post-consumer Abfällen in geschlossene Materialkreisläufe hängt maßgeblich von der Qualität der gewonnen Rezyklate ab. Der meist stark verunreinigte und inhomogene Inputstrom erfordert eine präzise Aufbereitung durch gezielte Trenn- und Waschverfahren. Fremdpolymere sowie nicht-polymere Störstoffe und Verschmutzungen wirken sich negativ auf das Eigenschaftsprofil der Endprodukte aus und müssen folglich aus dem Prozess abgeschieden werden. Es ist eine Abfolge geeigneter Prozessschritte notwendig, um hochwertige Sekundärrohstoffe herzustellen. Ein fundiertes Verständnis der Aufbereitungsstufen und deren Einfluss auf die Materialeigenschaften ist dabei der Schlüssel, um Optimierungs- und Endanwendungspotenziale zu ermitteln und die Kreislaufwirtschaft nachhaltig voranzutreiben.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das COMET-Zentrum CHASE, gefördert im Rahmen des Programms COMET (Competence Centers for Excellent Technologies) durch das BMIMI, das BMWET und die Bundesländer Oberösterreich und Wien. Das COMET-Programm wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt. Darüber hinaus möchten wir der PreZero Polymers Austria GmbH für die Unterstützung und die Bereitstellung der in dieser Studie verwendeten Materialien danken.

LITERATURVERZEICHNIS

Akhras, M., Marschik, C., Chung, C., Traxler, I., Kruta, K., Kloiber, K., & Fischer, J. (2024). Assessment of property profile of post-industrial polypropylene recyclates through a multivariable recycling process. *Journal of Applied Polymer Science 141*.

Al-Salem, S., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recorvery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management 29*.

Gall, M., Freudenthaler, P., Fischer, J., & Lang, R. (2021). Characterization of Composition and Structure-Property Relationships of Commercial Post.Consumer Polyethylene and Polypropylene Recyclates. *Polymers 13*.

Gall, M., Wiener, M., Chagas de Oliveira, C., Lang, R., & Hansen, E. (2020). Buidling a circular plastics economy with informal waste pickers: Recyclate quality, business model, and societal impacts. *Resources, Conservation & Recycling 256*.

Hu, B., Serranti, S., Fraunholcz, N., Di Maio, F., & Bonifazi, G. (2013). Recycling-oriented characterization of polyolefin packaging waste. *Waste Management 33*, 574-584.

Mager, M., Berghofer, M., & Fischer, J. (2023). Polyolefin Recyclates for Rigid Packaging Applications: The Influence of Input Stream Composition on Recyclate Quality. *Polymers 15, 2776*.

Mustermann, M. (MusterJAHR). *MusterTITEL* (Bd. MusterBAND). MusterORT, MusterLAND: MusterVERLEGER.

Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management 69*, 24-58.

Stenvall, E., & Boldizar, A. (2016). Mechanical and Thermal Characterization of Melt-Filtered, Blended and Reprocessed Post-Consumer WEEE Thermoplastics. *Recycling*, 89-100.

Thoden van Velzen, E., Jansen, M., Brouwer, M., Feil, A., Molenveld, K., & Pretz, T. (2017). Efficiency Of Recycling Post-Consumer Plastic Packages. *AIP Conf. Proc. 1914, 170002.*

Verleye, G., Roeges, N., & De Moor, M. (2001). *Easy Identification of Plastics and Rubbers.* Shawbury, UK: Smithers Rapra Technology.

Transformation der Kunststoff-Wertschöpfungskette durch Überwindung technologischer Reinheitsbarrieren bei PC-PO als Lösung zur Erfüllung der für 2040 geforderten PPWR-Quote

Johanna Langwieser[1], Verena Pardametz[1] & Franz Rittmannsberger[1]
[1)] PreZero Polymers Austria GmbH, R&D, Haimburg, Austria

KURZFASSUNG: Die Verordnung über Verpackungen und Verpackungsabfälle (PPWR) markiert einen grundlegenden Paradigmenwechsel in der europäischen Umweltpolitik, indem sie das Kunststoffrecycling von einer freiwilligen Nachhaltigkeitsmaßnahme zu einer obligatorischen Säule der Rohstoffsouveränität wandelt. Ein Kernstück dieser Verordnung ist die für das Jahr 2040 festgelegte Vorgabe einer Rezyklatquote von 25 % für Verpackungen mit Lebensmittelkontakt. Während für bestimmte Polymere bereits erfolgreiche Kreislaufsysteme für lebensmittelnahe Anwendungen etabliert sind, stehen Polyolefine (PO) vor systemischen technologischen und materialspezifischen Hürden, die das Erreichen dieser ehrgeizigen Ziele erschweren. PO, die den größten Anteil am Verpackungsabfall aus Privathaushalten ausmachen, weisen Eigenschaften auf, die den Recyclingprozess verkomplizieren. Aufgrund ihrer geringen Dichte und teilkristallinen Struktur nehmen sie organische Substanzen, Gerüche und Verunreinigungen aus der Umgebung auf. Zusätzlich verschärfen Verpackungen, die nicht für das Recycling designed wurden, die Situation; der thermische Abbau von Druckfarben, Bindemitteln und Adhäsiven erhöht den Gehalt an unbeabsichtigt eingebrachten Stoffen deutlich, was die Zulassung für Lebensmittelanwendungen erheblich erschwert. Die Erfüllung der PPWR-Quoten stockt derzeit aufgrund einer kritischen Kombination aus infrastrukturellen Defiziten und Materialdegradation. Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass der Grad der Verunreinigung einen stärkeren Einfluss auf die Qualität des Endrezyklats hat als die ursprüngliche Materialart, weshalb eine Umstellung auf reinheitsorientierte Verarbeitungsverfahren erforderlich ist. Um die Lücke bis zu den Zielen für 2040 zu schließen, muss die Industrie einen integrierten technologischen Ansatz verfolgen, der über das herkömmliche mechanische Recycling hinausgeht.

1 EINLEITUNG

Der Übergang zur Kreislaufwirtschaft in der Europäischen Union hat mit der Ablösung der bisherigen Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle (PPWD) durch die Verordnung über Verpackungen und Verpackungsabfälle (PPWR) einen entscheidenden Wendepunkt erreicht. Während die PPWD eine uneinheitliche Umsetzung in den Mitgliedstaaten zuließ, schafft die PPWR einen rechtsverbindlichen, harmonisierten Rahmen für den gesamten Binnenmarkt, um den Verbrauch von Primärrohstoffen zu senken und die Ressourcenunabhängigkeit zu fördern. Neben Beschränkungen für Einwegkunststoffe und strengen Verboten von toxischen Substanzen stellt die Einführung verbindlicher Mindestquoten für den Rezyklatanteil in Kunststoffverpackungen den wohl einschneidendsten Aspekt der PPWR dar. Für Verpackungen, die rechtlich als kontaktkritisch eingestuft sind, schreibt die Verordnung gestaffelte Quoten vor, die sich nach dem anwendungsbezogenen Risiko und der Polymerzusammensetzung richten, diese für 2040 vorgesehenen Zielvorgaben stellen eine enorme Herausforderung dar. Herkömmliche mechanische Recyclingverfahren sind nicht in der Lage, tiefsitzende Verunreinigungen, flüchtige organische Verbindungen (VOCs) und migrierte Stoffe aus gemischten Abfallströmen zuverlässig zu entfernen. Um die gesetzlichen PPWR-Quoten bis 2040 zu erreichen, ist eine sofortige Abkehr von herkömmlichen Verarbeitungsverfahren hin zu fortschrittlichen, auf Reinheit ausgerichteten technologischen Lösungen erforderlich (Europäisches Parlament, & Rat der Europäischen Union, 2025).

2 TECHNISCHE UND MATERIAL SPEZIFISCHE HÜRDEN VON PC-PO

Um die für das Jahr 2040 in der PPWR festgelegten Quoten für kontaktkritische Verpackungen zu erreichen, müssen vielfältige Hürden überwunden werden, die für PO aus Post-Consumer-Abfällen (PC-PO) charakteristisch sind.

2.1 Polymerabbau und Kontaminationen

PO zeichnen sich durch hervorragende inhärente Eigenschaften aus, darunter eine hohe thermische Stabilität, eine geringe Wasserdampfdurchlässigkeit sowie eine zuverlässige Barrierewirkung gegenüber Fetten und Ölen. Im Zuge herkömmlicher mechanischer Recyclingprozesse verschlechtern sich diese Eigenschaften jedoch erheblich. Wiederholte Belastungen durch hohe Temperaturen und mechanische Scherkräfte während der Extrusion führen zu Kettenbrüchen und Vernetzungen. Dies verändert die Polymerstruktur und löst Verschiebungen der Viskosität, eine Versprödung sowie einen drastischen Abfall von Zugfestigkeit und Schlagzähigkeit aus. Doch nicht nur die Polymereigenschaften werden beeinträchtigt (Sharmin, et al., 2026). PO-Verpackungen enthalten von Haus aus gezielt zugesetzte Stoffe (IAS), wie etwa Farbmittel, Bindemittel, Adhäsive, Stabilisatoren und Weichmacher. Unter industriellen Recyclingbedingungen unterliegen diese IAS einem thermischen Abbau oder interagieren mit Lebensmittelbestandteilen, wodurch komplexe Gemische aus nicht gezielt zugesetzten Stoffen (NIAS) entstehen. Aufgrund ihrer teilkristallinen Struktur und geringen Dichte fungieren PO als hochreaktive organische Matrizen. Aktuelle “Design for Recycling”-Richtlinien berücksichtigen die Herkunft der NIAS aus Druckfarben, Adhäsiven o.ä. noch nicht, was die Vermeidung dieser Substanzen im Abfallstrom verwendbar für Lebensmittelkontakt-Verpackungen erschwert. Weiters stellt die genaue Bestimmung der Migrationskinetik sowohl der ursprünglichen IAS als auch der NIAS nach wie vor einen erheblichen Engpass dar, der die Einhaltung der EFSA-Vorgaben erschwert (Chen, Cao, Fan, & Chen, 2026).

2.2 Verarbeitungstechnische Hürden

Auf Anlagenebene schränken Unstimmigkeiten im Design die Verarbeitungseffizienz stark ein und verhindern einen direkten Übergang zu einem geschlossenen Kreislauf. Obwohl moderne „Design for Recycling“ -Richtlinien zunehmend Verbreitung finden, ist weiterhin eine enorme Menge an komplexen Altverpackungen im Umlauf. Verbundstrukturen aus verschiedenen Materialien und Schichten, bei denen PO mit Barriereschichten wie Polyamid (PA) oder Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH) verbunden sind, lassen sich mit herkömmlichen industriellen mechanischen Verfahren nicht sauber trennen, dies führt zu erheblichen Kreuzkontaminationen in der resultierenden Schmelze. Zudem mangelt es der Industrie, trotz Fortschritten bei der Nahinfrarot- (NIR) und Hyperspektral-Bildgebung, an skalierbaren, standardisierten Lösungen, um PC-PO in Lebensmittelqualität von Material für Nicht-Lebensmittelanwendungen zu trennen. Verschärft wird dieses Verarbeitungsdefizit durch Infrastrukturen zur gemeinsamen Sammlung verschiedener Abfallströme sowie durch Fehlverhalten der Verbraucher. Darüber hinaus besteht eine grundlegende Diskrepanz zwischen Verbrauchergewohnheiten und industrieller Realität. Der breiten Öffentlichkeit fehlt das systemische Verständnis für die Chemie des Recyclings oder für die thermodynamischen Grenzen bei der Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft. Infolgedessen erleidet das Ausgangsmaterial eine vorhersehbare und vermeidbare Qualitätsminderung, noch bevor es überhaupt in eine Verarbeitungsanlage gelangt.

2.3 Volatilität auf makroökonomischer Ebene und entlang der Wertschöpfungskette

Die vorgelagerte Lieferkette für PC-PO birgt strukturelle Instabilitäten, die sich unmittelbar negativ auf die Qualität des nachgelagerten Rezyklats auswirken. Im Gegensatz zu PC-PET, das von gut prognostizierbaren und sauberen Inputströmen profitiert, ist der Ausgangsstoff für PC-PO stark inhomogen. Chemische Zusammensetzung, Polymermischung und der anfängliche Verschmutzungsgrad der eingehenden Ballen schwanken kontinuierlich. Zudem unterliegen die Rohstoffe saisonalen Schwankungen, die durch veränderte Verbrauchergewohnheiten bedingt sind. Diese Variabilität des Inputs wird durch globale Lieferkettenstörungen, sprunghafte Anstiege der Energiekosten sowie schwankende Preise für Neuware-Polymere weiter verschärft, all diese Faktoren untergraben gemeinsam die Wirtschaftlichkeit des Betriebs moderner Sortieranlagen (Nielsen, Hasselbach, Holmberg, & Stripple, 2020).

3 REINHEIT ALS FOKUS

Um PC-PO mit den Vorgaben der PPWR 2040 in Einklang zu bringen, ist ein branchenweiter Paradigmenwechsel erforderlich. Historisch gesehen wurde der Recyclingerfolg an der Effizienz der Polymersortierung gemessen, der quantitativen Trennung verschiedener Kunststoffarten (z. B. PP von PE). Da jedoch chemische Verunreinigungen die Materialien für den Lebensmittelkontakt ungeeignet machen, muss die Reinheit an die Stelle der Sortiereffizienz als entscheidender Erfolgsmaßstab treten. Die Kernthese dieses Ansatzes besagt, dass das Ausmaß der chemischen Kontamination einen stärkeren Einfluss auf die Qualität des fertigen Rezyklats hat als die Art des ursprünglichen Neuware-Polymers oder dessen anfängliche mechanischen Eigenschaften.

3.1 Analytische Rahmenbedingungen zur Quantifizierung der Reinheit

PO erfordern einen Ansatz, der sowohl toxikologische Risiken als auch organoleptische Beeinträchtigungen mittels hochsensibler, reproduzierbarer Verfahren erfasst. Als analytischer Standard zur Identifizierung und Quantifizierung von NIAS und VOCs dienen die Headspace-GC-MS oder die Thermodesorptions-GC-MS. Diese Methoden ermöglichen das Verdampfen und den Nachweis migrierender Toxine, abgebauter Additive und durch den Verbraucher eingebrachter Verunreinigungen bis in den ppb-Bereich (parts-per-billion), was für die Überprüfung der Einhaltung der EFSA-Migrationsgrenzwerte unerlässlich ist. Zudem weisen PO-Rezyklate häufig komplexe, aus mehreren Komponenten bestehende Gerüche auf, die nicht auf eine einzelne chemische Substanz zurückzuführen sind. Bei standardisierten sensorischen Prüfungen durch Panels werden, ergänzt durch GC-Olfaktometrie, menschliche Prüfer gemeinsam mit Detektoren eingesetzt, um spezifische Ströme flüchtiger Stoffe menschlichen Geruchswahrnehmungen zuzuordnen. Dies stellt sicher, dass das Material sowohl toxikologisch sicher als auch organoleptisch akzeptabel ist (Sharmin, et al., 2026).

3.2 Dekontamination

Herkömmliche Waschverfahren entfernen lediglich oberflächliche Verschmutzungen. Zusätzliche Heißwäsche kann einen Großteil der oberflächlichen Kontaminationen entfernen, jedoch eine tiefgehende Dekontamination erfordert fortschrittliche physikalische und chemische Verfahren, die in der Lage sind, tiefsitzende Verunreinigungen aus der festen oder geschmolzenen Polymermatrix zu entfernen. Beim PET-Recycling wird die Festphasen-Polykondensation (SSP) allgemein eingesetzt, um flüchtige Bestandteile zu entfernen und das Molekulargewicht wieder zu erhöhen. Da PO keine Kondensationsreaktionen in gleicher Weise eingehen, konzentrieren sich die für PO optimierten Verfahrensvarianten strikt auf die thermische Desorption im Hochvakuum. Dabei werden PC-PO-Flakes in einem Reaktor, der unter starkem Vakuum betrieben wird, Temperaturen knapp unterhalb ihres Schmelzpunkts ausgesetzt. Diese thermodynamischen

Bedingungen maximieren die treibende Kraft für die Diffusion. Sie zwingen flüchtige NIAS und kurzkettige Kohlenwasserstoffe dazu, aus den festen Flakes in die Gasphase zu wandern, aus der sie kontinuierlich abgezogen werden. Ein ähnliches Verfahren kann auch bei Granulaten angewendet werden. Ein Hilfsmittel hier kann CO2 darstellen. Durch den Betrieb oberhalb der kritischen Temperatur und des kritischen Drucks wird die PO-Matrix gequellt und NIAS, niedermolekulare Oligomere und Geruchsstoffe werden extrahiert.

Wenn das Material über den Schmelzpunkt hinaus verarbeitet werden muss, erfolgt die Dekontamination in der Schmelzphase direkt in modifizierten Compoundier-Extrudern. Hocheffiziente Vakuum-Entgasungszonen sind unmittelbar in den Extruderzylinder integriert. Um die Entfernung von Verunreinigungen aus der hochviskosen Polymerschmelze zu beschleunigen, werden spezielle „Auffrischungs"-Mittel oder inerte Strippgase wie Stickstoff oder Wasserdampf in die flüssige Phase injiziert. Diese Stoffe senken den Partialdruck flüchtiger Verunreinigungen drastisch und fördern so die Bildung von Mikroblasen. Diese Blasen transportieren flüchtige NIAS rasch über die Vakuumöffnungen ab und schließen die Reinigung der Schmelze unmittelbar vor der Granulierung ab.

4 DISKUSSION

Die Erfüllung der Vorgaben der PPWR für 2040, insbesondere der verbindlichen Quote von 25 % Rezyklatanteil für Verpackungen mit Lebensmittelkontakt, bei denen PET nicht den Hauptbestandteil bildet, lässt sich nicht durch schrittweise Verbesserungen einzelner Recyclingprozesse erreichen. Aufgrund der Aufnahme von Kontaminanten und der Bildung von NIAS entzieht sich PC-PO einer einfachen mechanischen Aufbereitung. Folglich muss die Industrie von der Suche nach einer einzigen technologischen Lösung abrücken. Um die Lücke bis 2040 zu schließen, ist eine hybride, mehrschichtige Technologie-Matrix erforderlich, die fortschrittliche mechanische Sortierung, Sicherheitsnetze durch andere Recyclingtechnologien sowie eine vollständig digitalisierte und transparente Wertschöpfungskette nahtlos miteinander verknüpft.

4.1 Design for Recycling

Ein ganzheitliches „Design for Recycling" muss zwingend über die Wahl des Basispolymers hinausgehen. Insbesondere die Auswahl von Druckfarben, Farbstoffen, Bindemitteln und Adhäsiven spielt eine entscheidende Rolle, da diese während des Recyclingprozesses thermisch abgebaut werden oder mit anderen Substanzen interagieren können. Dabei entstehende NIAS sind oft schwieriger detektierbar und bergen ein erhebliches toxikologisches Risiko. Diese Rückstände limitieren maßgeblich die Reinheit des Endrezyklats und bilden damit eine der größten technologischen Hürden für den Wiedereinsatz von PO in hochwertigen Verpackungsanwendungen.

4.2 Erweitertes mechanisches Recycling

Herkömmliche NIR-Spektroskopie trennt Kunststoffe zwar zuverlässig nach ihrer chemischen Zusammensetzung, erkennt jedoch nicht die Nutzungsgeschichte der Verpackung. Eine PO-Flasche, die zuvor giftiges Motoröl oder Haushaltsreiniger enthielt, ist für NIR-Systeme von einer Flasche für Milch in Lebensmittelqualität nicht zu unterscheiden. Um dieses Problem zu lösen, müssen automatisierte Hochgeschwindigkeitssortieranlagen die konventionelle NIR-Technik mit KI-basierter Bildverarbeitung und Systemen für digitale Wasserzeichen kombinieren, etwa dem „HolyGrail 2.0"-Framework das 2025 die volle Marktreife auf der Technologiereifegrad-Stufe 9 erreichte. Durch die Einbettung unsichtbarer, gepixelter Muster in das Verpackungsdesign oder die Struktur des Behälters können hochauflösende Kameras auf den Sortierbändern die genaue Historie der Verpackung in Echtzeit auslesen. Diese digitale Klassifizierung ermöglicht es den Anlagen, Verpackungen mit Lebensmittelkontakt im industriellen Maßstab dynamisch von Nicht-

Lebensmittel-Verpackungsströmen zu trennen und so das Risiko von Kreuzkontaminationen zu verringern.

Die Einführung dieser Technologien erfordert eine strukturelle Neuordnung der traditionell fragmentierten Kunststoff-Wertschöpfungskette. Bislang agierten Abfallentsorger, Sortieranlagen, Recycler, Verarbeiter und Markeninhaber in isolierten Marktumfeldern, wobei kaum ein Datenaustausch über Kontaminationshistorien oder Materialspezifikationen stattfand. Um eine rückverfolgbare Wertschöpfungskette mit geschlossenem Kreislauf zu realisieren, müssen diese Akteure standardisierte digitale Protokolle integrieren. Der Einsatz dezentraler Datenregister und digitaler Produktpässe ermöglicht es, dass eine Charge Rezyklat ihr vollständiges Analyseprofil direkt von der Sortier- und Aufbereitungsanlage bis zum Verpackungshersteller mitführt. Durch die Etablierung harmonisierter europäischer Reinheitsstandards und eines Open-Source-Datenaustauschs wandelt sich die Wertschöpfungskette von einem ungeordneten offenen Kreislauf hin zu einer hochgradig synchronisierten, qualitätsgesicherten Infrastruktur, die den Erhalt der Rohstoffsouveränität gewährleistet.

5 ABSCHLUSS

Der Übergang von der PPWD zur verbindlichen PPWR markiert einen strukturellen Wandel im Umgang des europäischen Binnenmarkts mit PC-Kunststoffen. Das anstehende Ziel für 2040, das eine Quote von 25 % Rezyklatanteil in kontaktkritischen Verpackungsanwendungen außerhalb des PET-Bereichs vorschreibt, stellt eine beispiellose Herausforderung für die Materialwissenschaft und die Infrastruktur dar. Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften und der Aufnahme von Verunreinigungen sind herkömmliche, auf Mengendurchsatz ausgerichtete mechanische Recyclingkreisläufe für den Wiedereinsatz im Lebensmittelkontakt grundsätzlich ungeeignet. Die anhaltende Problematik von NIAS und flüchtigen organischen Geruchsstoffen erfordert eine sofortige Neuausrichtung hin zu einem strengen, auf Reinheit fokussierten Verarbeitungsansatz. Um die Lücke bis zu den Zielen für 2040 zu schließen, ist die rasche Implementierung eines integrierten technologischen Systems erforderlich. Durch die Kombination von KI-gestützter Sortierung und digitalem Wasserzeichen mit fortschrittlichen Dekontaminationsverfahren für Feststoffe und Schmelzen lassen sich hochwertige PC-PO-Fraktionen erfolgreich im mechanischen Kreislauf erhalten. Letztlich wandelt die Skalierung dieses Verarbeitungsökosystems, ergänzt durch eine standardisierte Datenrückverfolgbarkeit, PC-PO von einer Umweltbelastung in eine regelkonforme Säule der Rohstoffsouveränität.

LITERATURVERZEICHNIS

Chen, Z., Cao, Y.-J., Fan, J.-P., & Chen, J. (2026). Advanced screening strategies for non-intentionally added substances (NIAS) in plastic food contact materials: Progress and challenges, and future perspectives. *Food Packaging and Shelf Life*, Artikel 101697. doi:https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2026.101697

Europäisches Parlament, & Rat der Europäischen Union. (2025). Verordnung (EU) 2025/40 vom 19. Dezember 2024 über Verpackungen und Verpackungsabfälle, zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020 und der Richtlinie (EU) 2019/904 sowie zur Aufhebung der Richtlinie 94/62/EG. *Amtsblatt der Europäischen Union*, 1-124. Von http://data.europa.eu/eli/reg/2025/40/o abgerufen

Nielsen, T., Hasselbach, J., Holmberg, K., & Stripple, J. (2020). Politics and the plastic crisis: A review throughout the plastic life cycle. *WIREs Energy and Environment*, Artikel e360. doi:https://doi.org/10.1002/wene.360

Sharmin, N., Bandyopadhyay, S., Radusin, T., Larsen, H., Hed, Y., & Pettersen, M. (2026). An overview of enhancing polyolefin recycling in food packaging: Navigating new EU regulations and design for recycling. *Journal of Food Science*, Artikel e70856. doi:https://doi.org/10.1111/1750-3841.70856

KONTAKT

Dr. Johanna Langwieser
johanna.langwieser@prezero.com
+43664 780 180 53
Product Development - RnD
PreZero Polymers Austria GmbH
www.prezero.com

Der Beitrag von rPS4FoodPackaging zur erfolgreichen Lebensmittelzulassung recycelter Polymerisate

David Mittermayr[1], Sandra Czaker[1], Alexander Felgel-Farnholz[1] & Joerg Fischer[1,2]
[1)] Johannes Kepler Universität Linz, Institute of Polymeric Materials and Testing, Linz, Österreich
[2)] Johannes Kepler Universität Linz, LIT Factory, Linz, Österreich

KURZFASSUNG: Der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft erfordert sichere und effiziente Recyclingpfade für Kunststoffverpackungen mit Lebensmittelkontakt. Am Beispiel des Projekts rPS4FoodPackaging wird gezeigt, welche wissenschaftlichen, analytischen und technologischen Schritte notwendig sind, um für andere Polymere als PET eine Lebensmittelkontaktzulassung zu erreichen. Der Beitrag beschreibt die Anforderungen an die Inputqualität, die Rolle von Objekt- und Flakesortierung, die Ableitung erforderlicher Dekontaminationseffizienzen, die Bestimmung von Diffusionskoeffizienten zur effektiven Prozessgestaltung, die Prozess-Validierung mittels Challenge Tests sowie die analytische Bewertung von Kontaminationsniveaus entlang der Prozesskette. Abschließend werden prozessinduzierte Materialveränderungen diskutiert und die Übertragbarkeit des entwickelten Ansatzes auf weitere Polymerströme aufgezeigt.

1 EINLEITUNG

Die weltweite Kunststoffproduktion ist in den vergangenen Jahrzehnten kontinuierlich angestiegen und überschreitet mittlerweile 430 Millionen Tonnen pro Jahr (Plastics Europe, 2026). Kunststoffe sind aufgrund ihrer vielseitigen Eigenschaften aus zahlreichen Anwendungsbereichen nicht mehr wegzudenken, gleichzeitig stellt ihre nachhaltige Nutzung und Verwertung am Ende des Lebenszyklus eine der größten Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft dar. Mit dem European Green Deal, dem Circular Economy Action Plan sowie der Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) verfolgt die Europäische Union das Ziel, den Einsatz von Post-Consumer-Rezyklaten in Verpackungen deutlich zu erhöhen und geschlossene Stoffkreisläufe zu etablieren (A new Circular Economy Action Plan, 2020; The European Green Deal, 2019; Regulation (EU) 2025/40). Insbesondere für Lebensmittelverpackungen bestehen jedoch hohe technische und regulatorische Anforderungen, die den Einsatz mechanisch recycelter Kunststoffe bislang erheblich einschränken.

Polystyrol (PS), insbesondere High Impact Polystyrene (HIPS), zählt aufgrund seiner hervorragenden Verarbeitbarkeit, Steifigkeit und sensorischen Eigenschaften zu den wichtigsten Werkstoffen für Lebensmittelverpackungen, beispielsweise für Joghurtbecher. Während für andere Kunststoffe wie PET bereits etablierte Closed-Loop-Recyclingsysteme existieren, steht ein vergleichbarer Kreislauf für PS noch aus (Welle, 2011). Neben einer hochreinen Sortierung stellen insbesondere die Entfernung organischer Kontaminationen sowie der Nachweis der Lebensmittelsicherheit nach den Vorgaben der Verordnung (EU) 2022/1616 zentrale Herausforderungen dar (Commission Regulation (EU) 2022/1616). Für eine Zulassung durch die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) muss für die Recyclingtechnologie nachgewiesen werden, dass potenzielle Schadstoffe zuverlässig entfernt werden und keine gesundheitlichen Risiken bestehen.

Das Projekt rPS4FoodPackaging verfolgte daher das Ziel, einen vollständigen Nachweis für die Eignung von recyceltem Polystyrol (rPS) für Lebensmittelkontaktanwendungen zu erbringen. Hierfür wird eine innovative mechanische Recyclingprozesskette untersucht, die auf drei aufeinander aufbauenden Säulen basiert: einer hochwertigen Vorbehandlung des Eingangsmaterials, einer neuartigen Materialkonvertierung mit effizienter Dekontamination sowie der Herstellung und

Validierung neuer Verpackungsprodukte aus Rezyklat. Die im Rahmen des Projekts entwickelte Methodik stellt zugleich einen generischen Leitfaden für weitere Polymerklassen dar.

2 METHODEN

Der erste Schritt auf dem Weg zur Lebensmittelzulassung ist die Sicherstellung einer geeigneten Inputqualität. Gemäß den regulatorischen Anforderungen muss der überwiegende Anteil des Eingangsmaterials aus Lebensmittelverpackungen stammen. Hierfür wurden Objekt- und Flakesortiertechnologien untersucht und validiert (Mittermayr et al., 2026a).

Ergänzend wurden Waschprozesse hinsichtlich ihrer Fähigkeit bewertet, anhaftende Verunreinigungen und Rückstände zu entfernen, ohne die Materialeigenschaften negativ zu beeinflussen (Mittermayr et al., 2026a).

Die toxikologische Sicherheitsbewertung bildet den Kern jedes Zulassungsverfahrens. Hierzu wurden Versuche mit Gaschromatographie in Kombination mit einem Massenspektrometer durchgeführt. Die Probenaufgabe erfolgte mittels thermischer Desorption (Czaker & Fischer, 2026) und mittels Extraktion (Felgel-Farnholz et al., 2025).

Basierend auf europäischen Verbraucherdaten und anhand von konservativen Migrationsmodellen wurden Sicherheitsgrenzwerte und erforderliche Dekontaminationseffizienzen definiert (Mittermayr et al., 2025a). Daraus konnten die maximal zulässigen Restkontaminationen im Rezyklat abgeleitet werden.

Zur Auslegung der Dekontaminationsstufe, also des Super-Cleaning-Prozesses, wurden Diffusionskoeffizienten repräsentativer Surrogate-Kontaminanten in geschmolzenem HIPS experimentell bestimmt (Mittermayr et al., 2026b). Die gewonnenen Daten ermöglichten die Entwicklung eines mathematischen Modells zur Vorhersage der Reinigungsleistung unter industriellen Prozessbedingungen.

Abschließend wurde der Super-Cleaning-Prozess mittels eines Challenge Tests bewertet (Mittermayr et al., 2025b; Mittermayr et al., 2026a).

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Ergebnisse der Sortierversuche auf Objekt- und auf Flakeebene zeigten, dass erst die Kombination mehrerer Sortierstufen eine ausreichend hohe Reinheit des Polystyrolstroms ermöglicht. Neben der Entfernung von Fremdpolymeren und Kontaminationen wurde sichergestellt werden, dass die verwendete Eingangsabfallfraktion einen Lebensmittelverpackungsanteil von über 95% enthielt (Mittermayr et al., 2026a).

Der Waschprozess wurde dahingehend optimiert, dass Restkontaminationen und Bedruckungsfarben eliminiert werden konnten. Anhand von Verbraucherdaten und Migrationssimulationen wurden die erforderlichen Dekontaminationseffizienzen bestimmt. Es wurde festgestellt, dass die Werte für Schalen für Gemüse und Früchte und der Verzehr durch Kleinkinder als der kritischste Fall zu betrachten ist (Mittermayr et al., 2025a; Mittermayr et al., 2026a). Die entsprechenden minimalen Dekontaminationseffizienzen sind in Abb. 1 dargestellt.

Die im Rahmen des Projekts ermittelten Diffusionskoeffizienten für unterschiedliche Substanzen in der Schmelzephase von PS wurden dazu genützt, den Super-Cleaning-Prozess zu optimieren (Mittermayr et al., 2026b). Dadurch wurde sichergestellt, dass für die Dauer der Dekontamination in der Schmelzephase nicht unnötig lange durchgeführt wird, um das Material zu schonen und einen Materialabbau zu minimieren.

Die Validierung des Recyclingprozesses erfolgte durch Challenge Tests mit gezielt eingebrachten Surrogate-Kontaminanten (Mittermayr et al., 2025b; Mittermayr et al., 2026a). Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die Super-Cleaning-Technologie die erforderlichen Dekontaminationseffizienzen sicher überschreitet (s. Abb. 1). Parallel dazu wurden umfangreiche Input- und Output-Analysen durchgeführt. Mittels GC-MS und weiterer analytischer Verfahren wurden flüchtige und nichtflüchtige Kontaminanten entlang der Prozesskette charakterisiert (Felgel-Farnholz, 2025; Mittermayr et al., 2026a). Die Untersuchungen zeigten, dass post-consumer Polystyrol aus Lebensmittelverpackungen vergleichsweise geringe Ausgangskontaminationen aufweist und daher ein besonders hohes Potenzial für hochwertige Kreislaufanwendungen besitzt.

Neben der Dekontamination wurden auch prozessinduzierte Materialveränderungen untersucht (Mittermayr et al., 2025b; Mittermayr et al., 2026a). Die hohen Temperaturen und Vakuumbedingungen der Dekontamination führen zu Veränderungen der Polymerstruktur. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass die mechanischen Eigenschaften des Materials auf einem hohen Niveau erhalten bleiben und für die Verarbeitung zu neuen Lebensmittelverpackungen geeignet sind. Migrationstests an fertigen Produkten bestätigten die Einhaltung der regulatorischen Anforderungen (Mittermayr et al., 2026a).

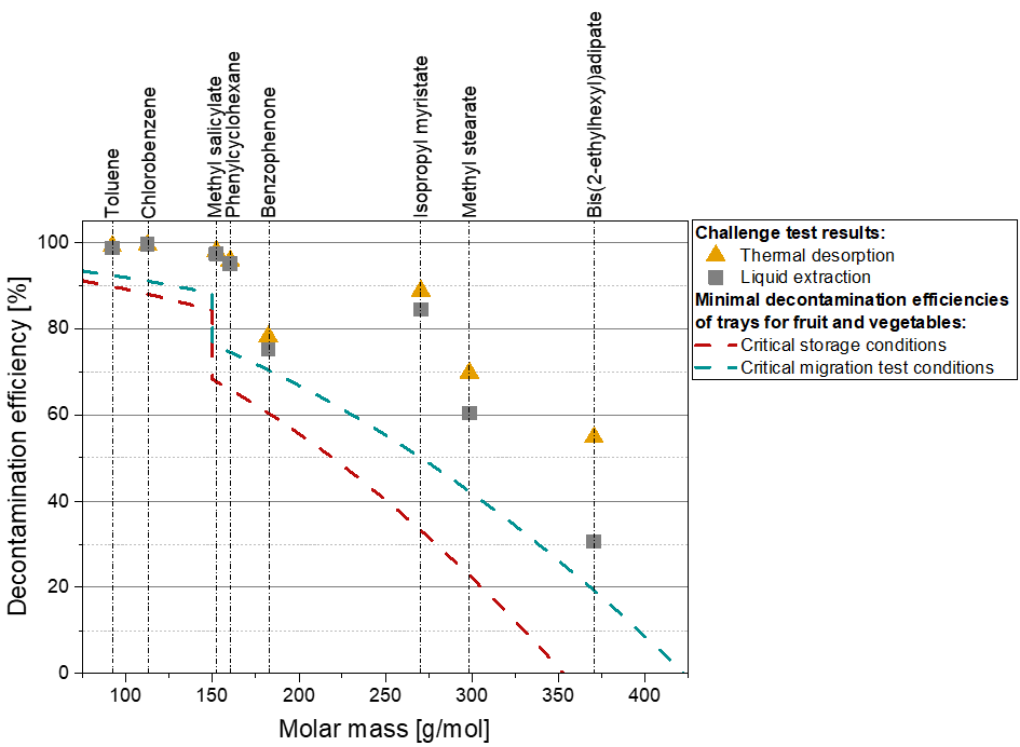


Abb. 1: Dekontaminationseffizienz des Super-Cleaning-Prozesses gemessen mit thermischer Desorption und Extraktion. Vergleich mit den geforderten minimalen Dekontaminationseffizienzen der kritischsten Lebensmittelkontakt-Anwendung; Schalen für Gemüse und Früchte – Grenzwerte für Kleinkinder (Mittermayr et al., 2026a).

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse von rPS4FoodPackaging zeigen, dass die Schließung des Materialkreislaufs für Polystyrol technisch, analytisch und regulatorisch möglich ist. Besonders relevant ist jedoch, dass der entwickelte Ansatz weit über Polystyrol hinausgeht. Die Kombination aus hochwertiger Vorsortierung, wissenschaftlich fundierter Sicherheitsbewertung, Diffusionsmodellierung, Challenge Testing, analytischer Prozessbegleitung und Materialcharakterisierung stellt einen allgemeinen Fahrplan für die zukünftige Lebensmittelkontaktzulassung weiterer recycelter Polymerwerkstoffe dar.

LITERATURVERZEICHNIS

A new Circular Economy Action Plan, (2020).

Commission Regulation (EU) 2022/1616 of 15 September 2022 on recycled plastic materials and articles intended to come into contact with foods, (2022).

Czaker, S., Fischer, J. (2026). Thermal Desorption Used to Characterize Volatile Organic Compounds of Recycled Plastics. Polymers, vol. 18, no. 7, p. 792, 2026, doi: 10.3390/polym18070792.

Felgel-Farnholz, A., Klampfl, C. W., Freud, P. J., Rittmannsberger, F., & Fischer, J. (2025). GC–MS analysis of process-induced changes during mechanical recycling of PP and PS waste streams. Resources, Conservation and Recycling, 223, 108496. doi:10.1016/j.resconrec.2025.108496.

Mittermayr, D., Czaker, S., Felgel-Farnholz, A., Pflügl, M., Zeilerbauer, L., Roland, W., Rittmannsberger, F., Fazeni-Fraisl, K., Klampfl, C., Fischer, J. (2026a). Closed-Loop mechanical recycling of post-consumer polystyrene for food-contact applications. Resources, Conservation & Recycling 234 (2026) 109056, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2026.109056.

Mittermayr, D., Czaker, S., Roland, W., Fischer, J. (2026b). Diffusion Coefficients of Organic Compounds in Molten High-Impact Polystyrene. Polymer Engineering & Science, 2026; 0:1–12, https://doi.org/10.1002/pen.70530.

Mittermayr, D., Roland, W., Fischer, J. (2025a). Analyses of Food-Consumption Data and Migration for the Safety Evaluation of Recycled Polystyrene Intended for Food-Packaging Applications. Polymers, 17, 1846 DOI: 10.3390/polym17131846.

Mittermayr, D., Roland, W., Fischer, J. (2025b). Investigating the Effect of Liquid State Decontamination on Material Properties of Post-Consumer High-Impact Polystyrene Recyclate. Conference proceeding for 39th International Conference of the Polymer Processing Society, DOI: 10.51573/Andes.PPS39.SS.CEP.8.

Plastics Europe. Plastics the Fast Facts 2025. Available online: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2025/09/PE_TheFacts_25_digital-1pager-scrollable.pdf (2026).

Regulation (EU) 2025/40 of the European Parliament and of the Council of 19 December 2024 on packaging and packaging waste, (2024).

The European Green Deal, (2019).

Welle, F. (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview. Resources, Conservation and Recycling 2011, 55, 865–875, doi:10.1016/j.resconrec.2011.04.009.

KONTAKT

Univ.-Prof. DI Dr. Jörg Fischer
joerg.fischer@jku.at
+43 732 2468 6617
Institut für Polymeric Materials and Testing
Johannes Kepler Universität Linz
https://www.jku.at/ipmt

Nutzung von Eigenschaftsprofilen bei der sensorbasierten Sortierung von Kunststoffen

Nikolai Kuhn[1], Moritz Mager[2], Gerald Koinig[1], Jörg Fischer[2] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] Johannes Kepler Universität Linz, Institut für Polymeric Materials and Testing / LIT Factory, Linz, Österreich

KURZFASSUNG: Um zukünftige Quoten einzuhalten, muss sowohl die Menge als auch die Qualität von Rezyklaten erhöht werden. In diesem Beitrag werden Ansätze zur besseren Charakterisierung als auch Sortierung von Kunststoffabfällen vorgestellt und diskutiert. Als Werkzeug hierfür wird der Ansatz der Formulierung von Eigenschaftsprofilen vorgeschlagen. Anhand einer partikelbasierten Abfallanalytik werden sowohl Potenziale von als auch Einflussfaktoren auf Leichtverpackungssammelmengen ermittelt. Ferner wird am Beispiel von Polypropylen die Diversität technischer Materialeigenschaften sowie deren Relation zu bestimmten Verpackungsarten diskutiert. Anschließend werden Ansätze zur sensorbasierten Sortierung vorgestellt, welche durch die Sortierung anhand indirekter Merkmal (weiß vs. natur) schon jetzt Rezyklate mit unterschiedlichen Substitutionspotenzialen erzeugen können. Zuletzt wird ein Ausblick in die zukünftige Sortierung anhand materialspezifischer Eigenschaften wie der Korrelation der Schmelzflussrate mit Infrarotspektren diskutiert.

1 EINLEITUNG

Die Steigerung der Rezyklatqualität stellt eine zentrale Voraussetzung dar, damit Sekundärkunststoffe in anspruchsvolleren Anwendungen Primärkunststoffe ersetzen können. Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft ist demnach eine einseitige Konzentration auf eine Steigerung der Rezyklatmengen (oder Recyclingquoten) nicht ausreichend s (Demets et al., 2021; SRU, 2020). Vielmehr müssen die Funktionalitäten der Materialien auch während der Aufbereitung so weit erhalten werden, dass Rezyklate definierte technische Anforderungen erfüllen (z. B. hinsichtlich Verarbeitbarkeit oder chemischer Belastung. Diese Anforderungen erlangen eine zunehmende regulatorische Relevanz. So sieht die PPWR ab dem Jahr 2030 die Vorgabe von Mindestrezyklatanteilen in Kunststoffverpackungen vor (beispielsweise 10 % für kontaktempfindliche Verpackungen aus Kunststoffen, ausgenommen PET).

Gleichzeitig ist festzustellen, dass der Begriff „Qualität“ im Kunststoffrecycling nicht eindeutig definiert ist. Die Interpretation des Konzepts der Qualität unterliegt einer Reihe von Variablen, die je nach spezifischer Recyclingroute, Zielanwendung und beteiligten Akteuren differieren können. Exemplarisch seien folgende Variablen genannt: sortenreine Polymerfraktion, definierte Schmelzflussrate, geringe chemische Exposition, spezifische Farbe oder rechtliche Konformität (vgl. Demets et al., 2021; Molenbuur et al., 2025). Für die Beschreibung dieser Eigenschaften eignen sich Eigenschaftsprofile, da sie eine pragmatische Ausdrucksweise ermöglichen. Es erfolgt die Beschreibung einzelner oder kombinierter Eigenschaften eines Kunststoffstroms, die Funktionalitäten direkt oder indirekt abbilden können. Zu den beschreibbaren Eigenschaften zählen beispielsweise die Materialart, die Form, die Farbe, die Anwendung sowie die Verarbeitungsmethode (vgl. Abb. 1).

Somit können Eigenschaftsprofile nicht nur für die Charakterisierung von Partikeln bzw. Stoffströmen genutzt, sondern auch zur Identifikation aufbereitungsrelevanter Eigenschaften herangezogen werden. Diese Eigenschaften können anschließend für die (Weiter)entwicklung von Aufbereitungstechnik (bspw. sensorbasierte Sortierung) genutzt werden.

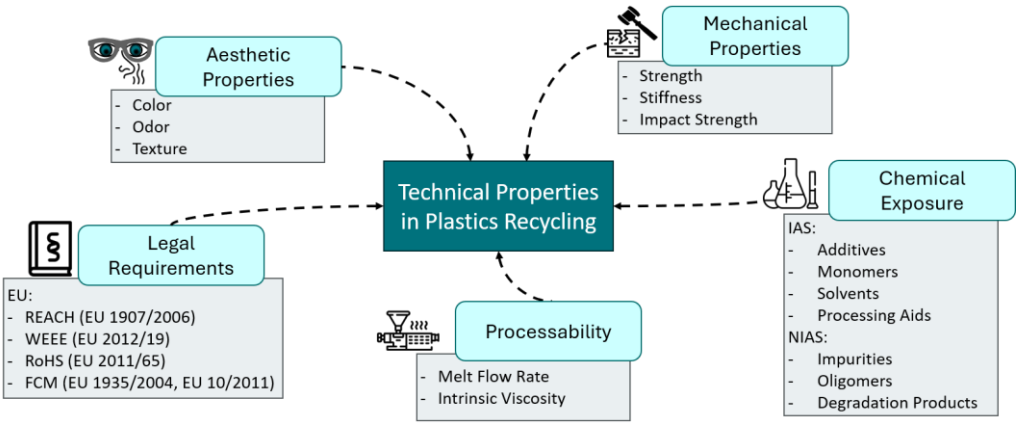


Abb. 1: Übersicht der Technischen Eigenschaften, die im Rahmen des Kunststoffrecyclings erhoben werden können. Eigene Abbildung auf Basis von Roosen et al. (2023).

2 EIGENSCHAFTSPROFILE IM (KUNSTSTOFF)RECYCLING

Die Flexibilität des Konzepts der Eigenschaftsprofile zeigen Kuhn et al. (2026a) in ihrer umfassenden Charakterisierung von Leichtverpackungsabfällen in Österreich. Dafür wurden über ein Jahr hinweg alle zwei Monate Proben (insgesamt 1.110 kg) aus urbanen, intermediären und ländlichen Regionen entnommen. Der methodische Kern dieser Arbeit liegt in der partikelbasierten Charakterisierung. Jedes Abfallpartikel wurde anhand recyclingrelevanter Merkmale beschrieben, was zu einem Datensatz von 55.197 einzeln beschriebenen Abfallpartikeln führte. Dieser Datensatz kann anschließend flexibel ausgewertet werden (z. B. Materialart & Anwendung, Verpackungstyp & Farbe oder Materialart & Packgut).

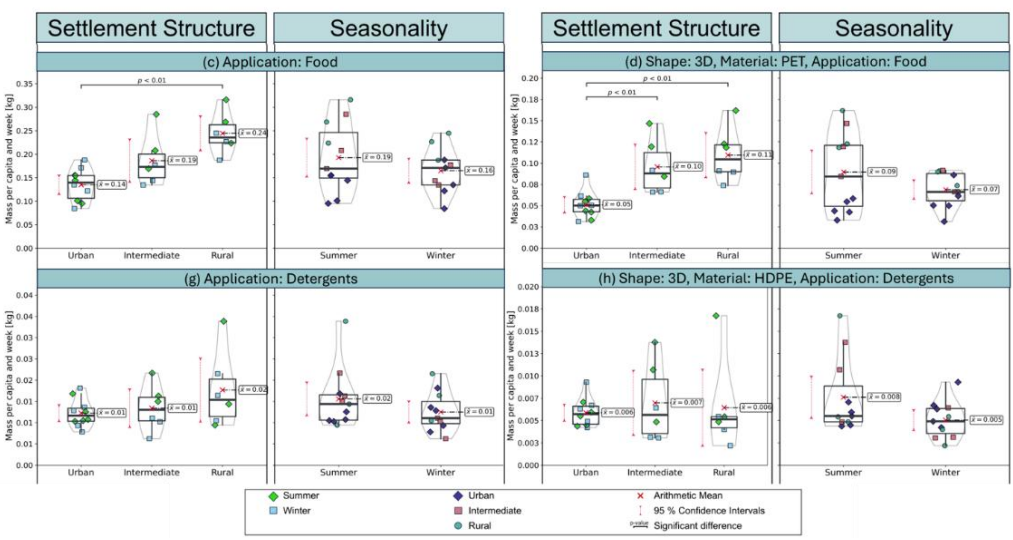


Abb. 2: Pro-Kopf und Woche gesammelte Leichtverpackungsmengen für ausgewählte Fraktionen (nach Anwendung [links] sowie Materialart & Anwendung [rechts] in Abhängigkeit der Besiedlungsstruktur (urban, intermediär, rural) und der Jahreszeit (Sommer, Winter).

Dadurch lassen sich Eigenschaftsprofile problembezogen definieren, ohne die Probenahme neu durchführen zu müssen. Dieser Ansatz ermöglicht beispielsweise die Abschätzung, welche Mengen für bestimmte Recyclingrouten verfügbar sind (z. B. lebensmittelnahe Anwendungen oder bestimmte Polymer-Produkt-Kombinationen).

In der konkreten Auswertung wurde der Datensatz auf besiedlungsstrukturelle und saisonale Einflüsse auf die gesammelten Leichtverpackungsmengen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Siedlungsstruktur einen stärkeren Einfluss auf die pro Kopf gesammelten Mengen über verschiedene Eigenschaftsprofile hinweg hatte als die Saisonalität (vgl. Abb. 2). Gleichzeitig waren die Mengen und die grundlegende Polymer- und Produkttypzusammensetzung über das Jahr relativ stabil, was eine wichtige wirtschaftliche Voraussetzung für anwendungsspezifische Recyclingrouten darstellt.

Ein weiteres Beispiel für die Anwendung von Eigenschaftsprofilen zur Charakterisierung von Leichtverpackungen bietet die Arbeit von Mager et al. (2026). Diese fokussiert sich auf Polypropylen (PP), einem der häufigsten verwendeten Verpackungskunststoffen. Hierzu wurden technische Datenblätter von 113 Neuware-Grades sowie 20 ausgewählte post-consumer-Verpackungen untersucht. Die Ergebnisse untermauern die Beliebtheit von PP als Verpackungsmaterial, welche nicht nur auf seinem günstigen Monomer und niedrigen Glasübergangstemperatur, sondern auch auf seiner Modifizierbarkeit hinsichtlich Co-Monomer und Molekulare Masse beruht: Bei post-consumer-Verpackungen wurden – je nach Verpackungsart – Schlagzähigkeiten zwischen 4 – 10 kJ m^{-2}, Zugmodule zwischen 800 – 1.990 MPa und Schmelzflussraten zwischen 2 – 90 g 10 min^{-1} festgestellt; zusätzlich wurden 143 chemische Substanzen sowie verschiedene Mehrschichtdesigns identifiziert. Bisher werden diese Verpackungen nicht nach weiteren Materialeigenschaften (bspw. Verarbeitbarkeit) sortiert. Daraus resultieren PP-Rezyklate mit fluktuierendem bzw. eingeschränktem Eigenschaftsprofil und damit einer reduzierten Anwendbarkeit. Die materialtechnische Vielfältigkeit von PP sowie Mischwirkung auf diese Eigenschaften bei post-consumer Rezyklaten ist in Abb. 3 dargestellt.

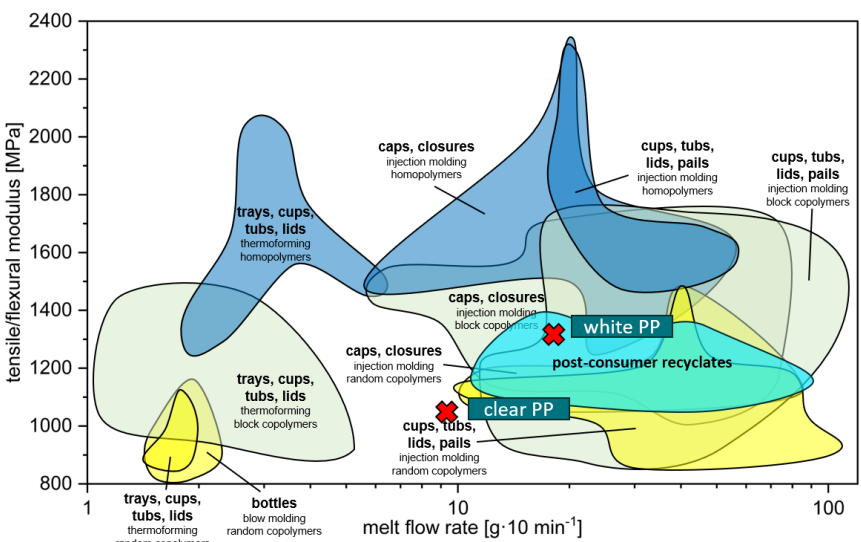


Abb. 3: Darstellung zweier technischer Eigenschaften von Kunststoffen (Elastizitätsmodul als mechanische Eigenschaft und Schmelzflussrate für die Verarbeitbarkeit) in einem Ashby-Diagramm für Verpackungen aus Polypropylen (PP). Jede Blase repräsentiert ausgewählte Verpackungskategorien typische Wertebereiche. Post-consumer Rezyklate weisen durch ihre Mischeigenschaften nur ein eingeschränktes Substitutionspotenzial dar. Durch die Sortierung nach weißem und naturfarbenem PP entstehen Rezyklate mit unterschiedlichen Eigenschaftsprofilen (vgl. Abschnitt 3).

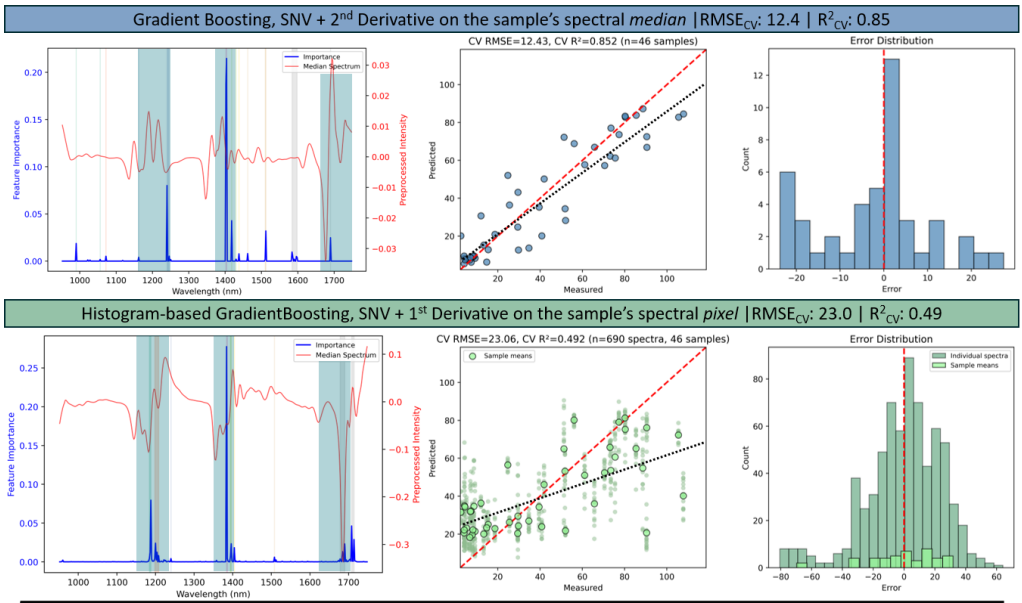
Für die Sortierung bestehen zwei Optionen. Indirekte Merkmale können auf Objektebene genutzt werden, sofern eine Verknüpfung mit technischen Eigenschaften möglich ist. Beispielsweise weisen Rezyklate aus Lebensmittelverpackungen eine geringere chemische Belastung als jene für Reinigungsmittel auf. Alternativ können direkte Merkmale auf Material- oder Flakeebene genutzt werden, sofern intrinsische Eigenschaften mittels Sensoren (bspw. spektroskopisch) erfasst werden können. Ein Beispiel wäre die Korrelation von Nahinfrarotspektren mit der Schmelzflussrate des Kunststoffs.

3 EINSATZ DER SENSORBASIERTEN SORTIERUNG

Die Berücksichtigung von mechanischen bzw. verarbeitungsrelevanten Eigenschaften mit verfügbarer sensorbasierter Sortiertechnik ist Gegenstand von Kuhn et al. (2025). Hierzu sortierten die Autoren 2.240 kg post-consumer-PP-Verpackungen hinsichtlich ihrer Opazität bzw. Transluzenz auf Artikel- und Flakeebene. Hierzu wurde die Materialart mittels Nahinfrarot-Spektroskopie und die Opazität/Transluzenz mittels Farbkamera detektiert. Die gewonnenen Rezyklate unterscheiden sich neben ihrer Ästhetik (Farbe) in ihrem Elastizitätsmodul (weiß: 1.424 MPa; natur: 1.154 MPa) und Schmelzflussrate (weiß: 17,2 g 10 min^{-1}; natur: 9,1 g 10 min^{-1}). Die unterschiedlichen Elastizitätsmodule der Rezyklate können mit einem höheren Anteil an Random-Copolymeren und damit geringerer Kristallinität des naturfarbenen PP erklärt werden; die unterschiedliche Verarbeitbarkeit hingegen mit einem höheren Anteil spritzgegossener bzw. blasgeformter Verpackungen. Durch diese unterschiedlichen Eigenschaftsprofile weisen die Rezyklate jeweils ein erhöhtes Substitutionspotenzial gegenüber Neuware dar. Zur besseren Kontextualisierung der Ergebnisse sind diese in Abb. 3 eingetragen.

Ein weiteres Beispiel für die Berücksichtigung von Eigenschaftsprofilen in der sensorbasierten Sortierung stellen Kuhn et al. (2026b) mit ihrer Untersuchung der Korrelation von Nahinfrarotspektren mit der Verarbeitbarkeit von PP dar. Als Parameter für die Verarbeitbarkeit wurde die Schmelzflussrate gewählt, welche in signifikantem Zusammenhang mit dem Molekulargewicht steht. Im Vergleich zur zuvor beschriebenen farbbasierten Methode weist diese Methode den Vorteil auf, dass eine direkte Erfassung über spektroskopische Merkmale eine höhere Robustheit aufweist als eine rein indirekte Sortierung nach visuellen Eigenschaften. Dies ist darauf zurückzuführen, dass indirekte Merkmale durch neue Verpackungsdesigns oder neue kommerzielle Grades beeinflusst werden können.

Insgesamt wurden 82 post-consumer-PP-Verpackungen mit ihren Schmelzflussraten mittels verschiedener Regressionsmodelle sowohl an weißem als auch an naturfarbenem PP korreliert. In diesem Kontext erzielten Entscheidungsbäume die besten Ergebnisse, wobei die Modellperformanz sowohl wellenlängen- als auch farbspezifisch war. Es zeigte sich, dass weißes PP mit einem Bestimmungsmaß von 0,85 eine bessere Eignung aufwies als naturfarbenes PP (R^2 = 0,61). Allerdings ist der RMSE mit über 12,4 g 10 min^{-1} für eine direkte industrielle Anwendung zu hoch. Deshalb wurde zusätzlich eine binäre Klassifikation bei diversen Schwellenwerten (6, 12, 30 und 60 g 10 min^{-1}) analysiert. Dabei wurden balancierte Genauigkeiten von 0,82 bis 0,92 erreicht (Abb. 4). Dies lässt darauf schließen, dass die direkte Schmelzflussrate-Sortierung für Klassifikationsaufgaben vielversprechend erscheint, für präzise Regression jedoch weitere Entwicklung vonnöten ist. Darüber hinaus scheint der mittlere Infrarotbereich keine zusätzlichen, klassifikationsrelevanten Informationen zu enthalten. Zukünftige Untersuchungen sollten daher insbesondere Sensorik mit hoher spektraler Auflösung und hohem Signal-Rausch-Verhältnis einsetzen.



Regression (median spectra)

	NIR			MIR		
Sample Set	*R^2*	*RMSE*	*Model & Prepr.*	*R^2*	*RMSE*	*Model & Prepr.*
All samples	0.66	17.3	ExtraTrees, 2nd Der.	0.60	17.6	XGBoost, 2nd Der.
Clear samples	0.61	14.0	ExtraTrees, 1st Der.	0.64	13.4	ExtraTrees, 1st Der.
White samples	0.85	12.4	GradBoost, 2nd Der.	0.67	17.4	XGBoost, 2nd Der.

Classification (@ 12 g 10 min^{-1} & median spectra)

	NIR			MIR		
Sample Set	*Acc.*	*F1*	*Model & Prepr.*	*Acc.*	*F1*	*Model & Prepr.*
All samples	0.70	0.75	ExtraTrees, 2nd Der.	0.82	0.83	XGBoost, 2nd Der.
Clear samples	0.82	0.83	ExtraTrees, 1st Der.	0.79	0.79	ExtraTrees, 1st Der.
White samples	0.95	0.96	HistGradBoost, 2nd Der.	0.80	0.86	XGBoost, 2nd Der.

Abb. 4: Korrelation der Infrarotspektren mit der Schmelzflussrate von post-consumer PP. Die Grafiken oben links zeigen die für das performanteste Vorhersagemodell wichtigsten spektralen Banden sowie die erste und zweite Ableitung (rot). Die Grafiken oben mittig zeigen die jeweiligen Regressionsgeraden; die Grafiken oben rechts die Verteilung der vorhergesagten Schmelzflussraten. Die unteren beiden Tabellen zeigen die relevantesten Metriken zur Bewertung der Regression (R^2, RMSE) sowie der Klassifikation (Genauigkeit, F1-Score) für die Nah- und Mittleren-Infrarotspektren.

Zusätzlich ist ein besseres Verständnis der Wechselwirkung von Chemie und Morphologie mit Nahinfrarot-Spektren im diffusen Reflexionsmodus für eine spätere industrielle Implementierung notwendig. Alternativ zur Zielgröße Schmelzflussrate könnten auch andere, materialwissenschaftlich präzisere Alternativen, wie die Schmelzviskosität bei verarbeitungsrelevanten Scherraten, eingesetzt werden.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Mithilfe von Eigenschaftsprofilen können anthropogene Stoffströme flexibel anhand ihrer technischen Eigenschaften und Funktionalität beschrieben werden. Als Beispiel hierfür wurde für das Kunststoffrecycling von Leichtverpackungen das Potenzial der partikelbasierten Charakterisierung vorgestellt. Diese Methode ermöglicht auch die Untersuchung von Mengenpotenzialen bzw. Einflussfaktoren auf die Sammelmengen. Am Beispiel von PP-Leichtverpackungen konnte zudem die große mechanische, chemische und anwendungsbezogene Heterogenität innerhalb einer Leichtverpackungsfraktion aufgezeigt werden. Wird diese Heterogenität beim Recycling nicht berücksichtigt, reduziert dies das Substitutionspotenzial der Rezyklate.

Anschließend wurde gezeigt, wie sich die Qualität der Rezyklate durch zusätzliche sensorbasierte Sortierung erhöhen lässt. Durch die Sortierung nach Opazität und Transluzenz wurden Rezyklate mit unterschiedlichen mechanischen und rheologischen Eigenschaften erzeugt. Die anschließende Korrelation der Schmelzflussrate mit Infrarotspektren zeigt, dass künftig auch eine direkte Sortierung nach technischen Eigenschaften, wie der Schmelzflussrate, möglich ist.

LITERATURVERZEICHNIS

Demets, R., van Kets, K., Huysveld, S., Dewulf, J., Meester, S. de, & Ragaert, K. (2021). Addressing the complex challenge of understanding and quantifying substitutability for recycled plastics. Resources, Conservation and Recycling, 174, 105826. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105826

Kuhn, N. E., Koinig, G., Kloeckl, A., Stipanovic, H., Spies, A. M., Schuch, D., Fischer, J [J.], & Tischberger-Aldrian, A. (2026). From particles to patterns: do settlement structure and seasonality impact the composition of lightweight packaging waste? Resources, Conservation and Recycling, 229, 108861. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2026.108861

Kuhn, N., Mager, M., Fischer, J., Koinig, G., & Tischberger-Aldrian, A. (2025). Increasing the PP-recyclate quality by enhanced mechanical processing of post-consumer packaging waste. Resources, Conservation and Recycling, 223, 108494. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108494

Kuhn, N., Mager, M., Koinig, G., Geier, J., Andreu, J.-P., Fischer, J., & Tischberger-Aldrian, A. (2026). Assessing Melt Flow Rate in Post-Consumer Polypropylene via Near-Infrared Hyperspectral Imaging. Polymers, 18(4). https://doi.org/10.3390/polym18040524

Mager, M., Zeilerbauer, L., Felgel-Farnholz, A., Czaker, S., Fischer, J., Postema, S. H. J., Kasper, J. B., & van Eijk, M. C. P. (2026). Advancing mechanical recycling of polypropylene: Lessons from sorting, washing, and life cycle assessment. Waste Management (New York, N.Y.), 212, 115356. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115356

Molenbuur, M., van Eijk, M. C. P., Harm Urbanus, J., Diepenmaat, H., & Ragaert, K. (2025). Perceptions and alignment on quality along the circular plastics packaging material chain. Waste Management (New York, N.Y.), 200, 114758. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114758

Roosen, M., Tonini, D., Albizzati, P. F., Caro, D., Cristóbal, J., Lase, I. S., Ragaert, K., Dumoulin, A., & Meester, S. de (2023). Operational Framework to Quantify „Quality of Recycling“ across Different Material Types. Environmental Science & Technology, 57(36), 13669–13680. https://doi.org/10.1021/acs.est.3c03023

SRU. (2020). Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa: Umweltgutachten 2020. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Kap_03_Kreislaufwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Entwicklung einer Methodik zur Erhebung des Kunststoffanteils in EAG hinsichtlich der Ermittlung des Kunststoffrecyclingpotenzials

Ralf Brüning[1], Florian Witt[1] & Christian Kitazume[2]
[1)] Dr. Brüning Engineering UG, Brake, Deutschland
[2)] Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Deutschland

KURZFASSUNG: Im Forschungsvorhaben „Entwicklung einer Methodik zur Erhebung des Kunststoffanteils in Elektro- und Elektronikaltgeräten und Ermittlung des Kunststoffrecyclingpotenzials“ wurde eine Methode zur Ermittlung der Kunststoffarten in EAG der SG1, SG2, SG4 und SG5 erarbeitet und praktisch umgesetzt. Mit ihr wurden die gesammelten EAG von 55 Abfallsammelcontainern auf ihre Zusammensetzung und ihre Kunststoffart hin untersucht. Das Vorgehen und die Ergebnisse werden hier auszugsweise dargestellt.

1 ZU WENIG KUNSTSTOFFE AUS EAG IM RECYCLING

Im Jahr 2023 wurden in Deutschland bei einem Gesamtkunststoffaufkommen von 348 kt aus gesammelten Elektro(nik)geräten 67 kt der stofflichen Verwertung (Recycling) und 280 kt der energetischen Verwertung zugeführt (Conversio 2024). Somit lag der Anteil recycelter Kunststoffe bei 19,3% und es zeigt sich, dass die Kunststoffe aus EAG vornehmlich energetischen Verfahren zugeführt wurden. Damit post-consumer (PC) Rezyklate von den Herstellern in ihren bestehenden Prozessen verstärkt eingesetzt werden können, muss die Qualität geeigneter Kunststoffrezyklate und Verfügbarkeit verbessert und die Nachfrage durch geeignete Anreize für den PC-Rezyklateinsatz erhöht werden. Dazu können verbindliche PC Recycling- und Rezyklateinsatzquoten wichtige Push- und Pull-Faktoren sein, wie sie u.a. im Bereich der Batterien in der europäischen Batterieverordnung bereits festgeschrieben sind (EU 2023). Kunststoffe aus Elektro(nik)geräten stellt jedoch eine komplexe Herausforderung für die Kreislaufführung dar. So werden bspw. in den einzelnen Geräten diverse Kunststoffe eingesetzt, die wiederum mit unterschiedlichsten Schad- und / oder Störstoffen belastet sein können. Diese Kunststoffe unterscheiden sich in ihrer Art und Qualität von den Kunststoffen aus z.B. dem Verpackungsrecycling und sind nicht unmittelbar kompatibel, da sie oft Additive beinhalten, um bestimmte Eigenschaften zu erreichen (u.a. PCB, bromierte Flammschutzmittel, Weichmacher). Umgekehrt sind Kunststoffe aus dem Verpackungsbereich nur bedingt für den Einsatz in Elektro(nik)geräten geeignet, daher musst der Einsatz im Closed-Loop eingehender untersucht und geprüft werden.

Vor diesem Hintergrund führte das Unternehmen Dr. Brüning Engineering UG in Zusammenarbeit mit der ARGUS - Statistik und Informationssysteme in Umwelt und Gesundheit GmbH, der cyclos GmbH und der INTECUS GmbH - Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management im Auftrag des deutschen Umweltbundesamtes von 2022 bis 2024 das Forschungsvorhaben „Entwicklung einer Methodik zur Erhebung des Kunststoffanteils in Elektro- und Elektronikaltgeräten und Ermittlung des Kunststoffrecyclingpotenzials“ durch.

Das Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer wissenschaftlichen Grundlage für die Einführung von Recyclingquoten von Kunststoffen aus EAG. Die Ergebnisse dienten als empirische Grundlage zur Umsetzung der in ElektroG (2022, § 22 Abs. 4 S. 8) festgelegten Überprüfung der Einführung einer Recyclingquote für Kunststoffe aus EAG. Im Vorhaben wurde eine Methodik zum Erlangen einer repräsentativen Datengrundlage für das Bundesgebiet entwickelt. Darauf aufbauend sollten Schadstoffanalysen und weiterfolgend fundierte Empfehlungen von Zielquoten für das Recycling von Kunststoffen aus EAG abgeleitet werden sowie zur Fortentwicklung in Richtung Rezyklateinsatzquote in Elektro(nik)geräten Grundlagen schaffen.

2 DATENERHEBUNG DURCH SORTIERUNG UND DEMONTAGE

Die Datenerhebungen wurden durchgeführt für die EAG der Sammelgruppe 1 (Wärmeüberträger), Sammelgruppe 2 (Bildschirmgeräte), Sammelgruppe 4 (Großgeräte) und Sammelgruppe 5 (Kleingeräte und kleine ITK). Insgesamt wurden so 55 Containerinhalte bei insgesamt sieben unterstützenden Erstbehandlungsanlagenbetreibern untersucht. Bei der Auswahl der Container wurden Herkunft – entweder über die ear-Zuweisung oder über die örE-Optierung – sowie die Siedlungsstruktur berücksichtigt. Die Differenzierung nach Siedlungsstruktur erfolgt anhand der Bevölkerungsdichte, wobei ländliche Gebiete mit ≤750 Einwohnern pro km² und städtische Gebiete mit >750 Einwohnern pro km² definiert sind.

Die Containerinhalte wurden sortiert und verwogen. In SG 2, SG 4 und SG 5 wurden die ausgewählte Elektro(nik)altgeräte anschließend demontiert. Dies beinhaltete das Verwiegen der demontierten Fraktionen, Beproben der Kunststoffbauteile und Eintüten der Kunststoffproben sowie das Protokollieren der Zusammensetzungen, Eigenschaften und Gewichte. Bei den EAG der SG1 erfolgte die mechanische Zerkleinerung im Rahmen eines Anlagenversuchs.

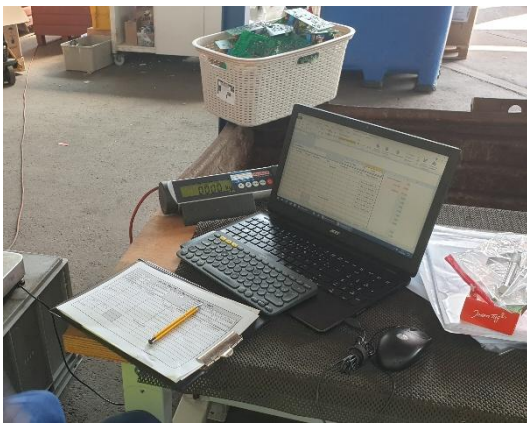


Abb. 1: Beispiel eines zu sortierenden Containerinhalts der SG 2 (Quelle: eigene Aufnahme, Dr. Brüning Engineering UG)

Die Inhalte der Container wurden nacheinander von den Forschenden auf die Zusammensetzung hin untersucht und dokumentiert. Dabei wurden die enthaltenen EAG den je Sammelgruppe spezifischen UNU Keys (Sortiergruppen) zugeordnet. Außerdem wurden Fehlwürfe, Batterien und im Container enthaltene nicht EAG-bezogene Reste protokolliert. Das Gewicht jeder Sortiergruppe wurde mit einer Waage ermittelt. Die entsprechenden Gewichte wurden protokolliert und die Massenanteile im späteren Projektverlauf ausgewertet. Im Anschluss an die erfolgten Sortierungen wurden je untersuchten Container die Demontagearbeiten durchgeführt. Dazu wurden für die SG 2 sowie SG4 mindestens zwei EAG je Sortiergruppe und für die SG 5 mindestens vier EAG je Sortiergruppe zufällig ausgewählt. Die Demontage der EAG sowie Beprobung der Kunststoffteile erfolgte händisch. Vor der Entnahme der Kunststoffproben wurden je EAG die einzelnen Kunststoffbauteile sowie die Summe der Nicht-Kunststoffbauteile verwogen und zur Bestimmung des Massenverhältnisses protokolliert.



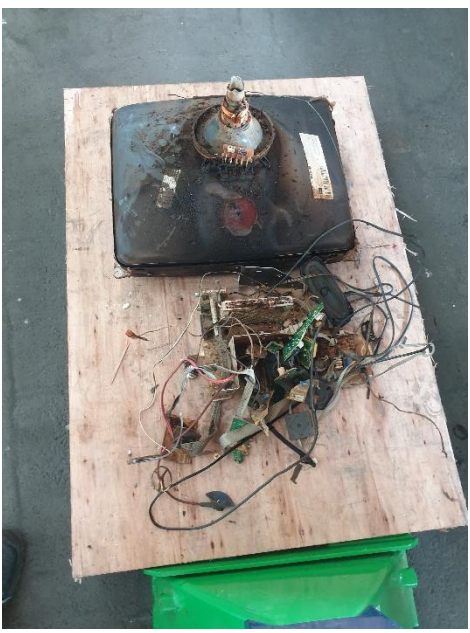
Gewichtsermittlung eines zu beprobenden EAG mittels Waage.



Blick auf den Arbeitsplatz der Protokolliertätigkeiten.



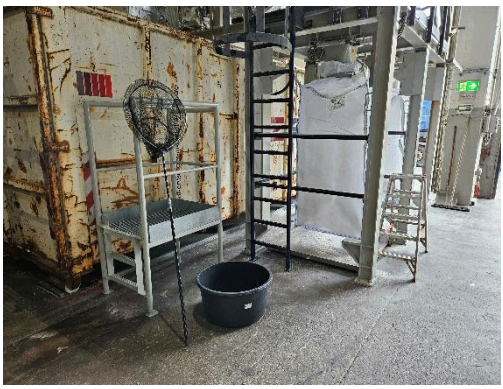
Gewichtsermittlung von nicht beprobbaren Restmaterials mittels Hubwagenwaage.



Blick auf die demontierten Bauteile der Nicht-Kunststofffraktion eines Bildröhrengerätes.

Abb. 2: Beispiele der Verwiegungen und Protokollierung aus den Demontagearbeiten (Quelle: eigene Aufnahmen, Dr. Brüning Engineering UG)

Nach erfolgter Sortierung von acht Containern der SG 1 wurde bei einem Erstbehandlungsanlagenbetreiber ein Anlagenversuch durchgeführt. Dazu wurden die EAG aus den Containern der SG1 durch das Anlagenpersonal händische entladen und auf die Förderbänder gegeben.



Der Arbeitsplatz zur Probenentnahme mit bereitgestelltem Equipment zur Entnahme.



Blick auf den Zugang für die Probenentnahme aus dem laufenden Abfallstrom.



Der Arbeitsplatz für das Vermischen, die Verwiegung und der Zufallsentnahme des Probenmaterials.



Blick auf abgetütete und beschriftete Chargen des entnommenen Probenmaterials.

Abb. 3: Anlagenversuch SG 1 Aufbau Messplatz und Durchführung (Quelle: eigene Aufnahmen, Dr. Brüning Engineering UG)

Je nach Auslastung waren 1 oder 2 Förderbänder in Betrieb. Das in den EAG der Kühlgeräte (UNU Key 0108) und Gefriergeräte (UNU Key 0109) beinhaltende Glas wurde separiert und verwogen. Wenn Leiterplatten und Displays vorhanden waren, wurden sie ebenfalls vom Anlagenpersonal separiert und verwogen. Im Anschluss erfolgte auf den Förderbändern der Absaugvorgang der Kühlflüssigkeit. Danach wurden die EAG-Korpusse im Zerkleinerungsaggregat durch rotierende Stahlketten zerkleinert. Das Zerkleinerungsaggregat benötigte für einen Zerkleinerungsvorgang von circa 12-15 EAG circa 2 Minuten. Durch den an das Aggregat angeschlossene Heizmischer wurde das in den EAG-Korpussen enthaltene Kältemittel bzw. Treibmittel abgeschieden. Als Outputfraktionen wurde unter anderem neben PUR, die metallhaltige Fraktion sowie die Kunststoffmischfraktion (Mischung ohne PUR-Anteil) verzeichnet. Die Kunststoffmischfraktion besteht aus den Kunststoffarten PS und ABS. Geplant war eine zu zerkleinernde Menge von circa 10 t (circa 250 Geräte). Der Versuch dauerte (mit Unterbrechungen) circa 5,5 Stunden und es wurden 261 EAG der UNU Keys 0108 (203) und 0109 (58) zerkleinert. Der Input-Mengenanteil für UNU Key 0108 belief sich auf 77,78% und für UNU Key 0109 auf 22,22%. Während des Anlagenbetriebs befanden sich die Forschenden in der Anlage und konnten am laufenden Strom das benötigte Probenmaterial im Output der Kunststoffmischfraktion mit einem Kescher entnehmen. Bei der Entnahme des Probenmaterials wurde darauf geachtet, nicht immer im selben Zyklus des Zerkleinerungsprozesses und nicht immer von derselben Stelle aus dem

selben Zyklus des Zerkleinerungsprozesses und nicht immer von derselben Stelle aus dem laufenden Strom zu entnehmen. Das entnommene Probenmaterial wurde in einer Rundwanne gesammelt und verwogen und später der analytischen Bestimmung zugeführt.

3 ANALYSE DER KUNSTSTOFFARTEN

Zum einen wurden im Rahmen der Demontagearbeiten bei SG 2, 4 und 5 ermittelte Kennzeichnungen der Kunststoffarten an Kunststoffbauteilen durch die Forschenden erfasst und protokolliert. Zum anderen wurden Kunststoffproben aus den EAG-Bauteilen durch bspw. Schneiden, Brechen oder Sägen entnommen, die im späteren Projektverlauf einer Kunststoffartenbestimmung im Labor oder mit dem NIR-Handheld unterzogen wurden. In diesem Zusammenhang wurde festgestellt, dass die Verwendung der Kennzeichnung, wenn sie vorhanden war, nicht einheitlich durchgeführt wird. In der Untersuchung der Kunststoffkennzeichnung konnten bei 2.385 von 4.427 Kunststoffteilchen (circa 54 %) während der Demontage entsprechende Kennzeichnungen erfasst werden. Für eine effektive Bestimmung der vorhandenen Kunststoffarten wurden die Ergebnisse der Kunststoff-Kennzeichnung mit den Ergebnissen des NIR-Verfahrens komplementär zusammengeführt. Diese Zusammenführung ermöglichte es, die Einschränkungen des NIR-Verfahrens bei der Erkennung sehr dunkler oder schwarzer Kunststoffe durch die zusätzlichen Informationen aus der Kennzeichnung zu kompensieren. Insgesamt konnten 3.582 (circa 81 %) der Kunststoffteile identifiziert werden, was eine deutlich höhere Ausbeute darstellt als bei einem einzelnen Verfahren (Kunststoff-Kennzeichnung: circa 54 %; NIR-Verfahren: circa 53 %). Von den verbliebenen, nicht identifizierten Kunststoffteilen (circa 19 %) war der Großteil ebenfalls dunkel gefärbt (87,5 %). Bei etwa 27 % der Teilchen stimmten die NIR- und Kennzeichnungs-Ergebnisse überein, und für etwa 23 % der Teilchen wurde die Kennzeichnung verwendet, da sie aufgrund ihrer dunklen Farbe vom NIR-Verfahren nicht erkannt werden konnten.

4 ERLANGTE ERGEBNISE

Im Forschungsvorhaben wurden Daten erhoben und ermittelt zu:

- den derzeit recycelten Kunststoffmengen aus Elektro(nik)altgeräten,
- der Sammelmengen-Zusammensetzung nach UNU-Key-Gruppen,
- des Massenverhältnisses Kunststoffanteil zum Nicht-Kunststoffanteil,
- der Zusammensetzung an verbauten Kunststoffarten bzw. Kunststoffsorte.

Bei den in den EAG der SG2 eingesetzten Kunststoffen sind SBC (Styrol-Butadien-Copolymer), PS (Polystyrol), PMMA (Polymethylmethacrylat) und PP (Polypropylen) die Kunststoffe mit den größten Massenanteilen. Besonders hervorzuheben ist SBC, das in mehreren Kategorien signifikante Mengen aufweist. Bei den in den EAG der SG4 eingesetzten Kunststoffen nimmt Polypropylen (PP) den größten Anteil an Kunststoffen ein. PP wird besonders häufig in Waschmaschinen (UNU-Key 0104) und Trocknern (UNU-Key 0105) verwendet. SBC (Styrol-Butadien-Copolymer) ist ebenfalls ein bedeutender Bestandteil der Kunststoffzusammensetzung der SG4. Besonders hohe Mengen finden sich in den Geräten der Professional IT (UNU-Key 0307) und Trockner (UNU-Key 0105). In den EAG der SG5 eingesetzten Kunststoffen nimmt Styrol-Butadien-Copolymer (SBC) den größten Anteil an Kunststoffen ein. SBC kommt besonders häufig in den Staubsaugern (UNU-Key 0204) und Druckern (UNU-Key 0304) vor. Ebenfalls bedeutende Kunststoffe der SG5 sind Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS).

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die im Rahmen des Vorhabens circa 4500 gesammelten und bestimmten Kunststoffproben wurden archiviert, um die Möglichkeit zu nutzen, in weiterführenden Analysen die Schad- und Störstoffe identifizieren zu können.

Mit den im Forschungsvorhaben durchgeführten Arbeiten, gesammelten Proben und erlangten Daten wurde die Grundlage geschaffen für die weiterführenden Bestimmung:

- des Kunststoffrecyclingpotenzials insgesamt,
- das Kunststoffrecyclingpotenzial je Sammelgruppe
- und das Kunststoffrecyclingpotenzial je Kunststoffart bzw. Kunststoffsorte.

Darauf aufbauend können fundierte Empfehlungen von Zielquoten für das Recycling von Kunststoffen aus EAG abgeleitet sowie weitere Entscheidungsgrundlagen für die potentielle Fortentwicklung in Richtung Rezyklateinsatzquote in Elektro(nik)geräten geschaffen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Conversio (2024): Kurzfassung der Conversio „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 - Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen“ 2023. Online verfügbar unter https://www.bkv-gmbh.de/files/bkv/studien/Kurzfassung%20Stoffstrombild%202023.pdf, Zugriff am: 01.07.2026.

EU (2023): Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj?locale=de, Zugriff am: 01.07.2026.

KONTAKT

Dr. Ralf Brüning
info@dr-bruening.de
+49 4401 7049760
Geschäftsführer
Dr. Brüning Engineering UG
https://www.dr-bruening.de/

Charakterisierung der Heterogenität von PP post-consumer Verpackungsabfällen: Implikationen für Objekt- und eigenschafts-basierte Flakesortierung

Moritz Mager[1], Nikolai Kuhn[2], Alexander Felgel-Farnholz[1] & Jörg Fischer[1]
[1)] Johannes Kepler Universität Linz, Institut für Polymeric Materials and Testing, Österreich
[2)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Österreich

KURZFASSUNG: Die Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) schreibt ab 2030 Mindestrezyklatanteile für PP-Verpackungen vor und erfordert demnach deutliche Qualitätsverbesserungen bei PP-Rezyklaten. Der post-consumer Strom starrer PP-Verpackungen ist jedoch hinsichtlich Fließfähigkeit, mechanischer Eigenschaften, Molekülgewichtsverteilung und chemischer Belastung stark heterogen, was den Einsatz von Rezyklaten in high-performance Anwendungen erschwert. Diese Studie charakterisiert 20 repräsentative starre PP-Verpackungsprodukte aus der österreichischen getrennten Sammlung umfassend und leitet daraus Implikationen für Sortierstrategien ab. Die Ergebnisse belegen die grundsätzlichen Grenzen objektbasierter Sortierung und das Potenzial eigenschaftsbasierter Flakesortierung. Eine systemische Kombination beider Ansätze wird als Weg zu anwendungsspezifischen, high-performance PP-Rezyklaten vorgeschlagen.

1 EINLEITUNG

Die Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) legt für Polypropylen (PP) einen Mindestrezyklatanteil von 10 % für kontaktsensitive und 35 % für sonstige Verpackungsanwendungen bis 2030 fest [1]. Die Erfüllung dieser Ziele setzt neben ausreichenden Recyclingkapazitäten vor allem wesentliche Verbesserungen der Rezyklatqualität voraus, um high-performance Verpackungsanwendungen bedienen zu können [2].

Der post-consumer Strom starrer PP-Verpackungen umfasst eine breite Palette an Blasform-, Tiefzieh- und Spritzgussprodukten, die auf Basis unterschiedlicher PP-Subtypen (Homopolymere, Random- und Block-Copolymere) und Additivpakete formuliert sind [3–5]. Die zentrale Herausforderung besteht daher nicht allein in der sortenreinen Trennung nach dem Polymertyp PP, sondern in der Erzeugung differenzierter Rezyklate mit definierten Eigenschaftsprofilen, die spezifische Substitution von Neuware in anspruchsvollen Produktsegmenten ermöglichen [6]. Sensorsortierung ist bereits in industriellen Recyclinglinien etabliert [7], reicht jedoch auf Objektebene allein nicht aus, um die für eigenschaftsspezifische Rezyklate erforderliche Homogenität unter ökoeffizienten Bedingungen zu erzeugen [8].

Da Materialformulierungen von Herstellern nicht offengelegt werden und reale Materialeigenschaften z.B. durch den unbekannten Degradationsgrad einzelner Produkte nicht verfügbar sind, wurde eine empirische Charakterisierung von 20 repräsentativen starren PP-Verpackungsprodukten aus der österreichischen getrennten Sammlung durchgeführt. Rheologische, mechanische, thermische, molekulare und chemische Analysen wurden kombiniert, um eine Produkt-Eigenschafts-Matrix zu entwickeln und daraus Implikationen für Sortierstrategien abzuleiten.

2 MATERIALIEN UND METHODEN

Die Probenahme erfolgte an einer österreichischen Sortieranlage für separat gesammelte Leichtverpackungsabfälle. Insgesamt wurden 20 häufig vorkommende weiße, klare und naturfarbene PP-Produkte ausgewählt, die die wesentlichen Anwendungskategorien (blasgeformte Flaschen,

tiefgezogene Trays und Becher, sowie spritzgegossene Becher und Eimer) abdecken. Nach Entfernung von Deckeln, Etiketten und Siegelfolien wurden die Produkte zerkleinert (20 mm Sieb), gewaschen (Vorwäsche: 5 min, 20 °C, 0,5 % NaOH; Hauptwäsche: 10 min, 60 °C, 2 % NaOH; Spülen: 5 min, 20 °C), und getrocknet (8 h, 60 °C). Prüfkörper wurden direkt aus Flakes gefertigt, da die Homogenisierung bereits durch die produktspezifische Sortierung gegeben war.

Die Charakterisierung umfasste primär die Bestimmung der Datenblattwerte Schmelzflussrate (MFR; ISO 1133-1, 230 °C/2,16 kg), Zugmodul (ISO 527), und Charpy-Kerbschlagzähigkeit (ISO 179-1), sowie vertiefender Analysen mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC; ISO 11357), Hochtemperatur-Gelpermeationschromatographie (HT-GPC) und Headspace-Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (Headspace-GC-MS).

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Heterogenität der PP Abfallfraktion

Ein Screening von 113 kommerziellen Virgin PP-Verpackungs-Grades zeigte die Eigenschaftsvielfalt des Werkstoffes, wobei Schmelzflussrate (MFR), Zugmodul und Kerbschlagzähigkeit über eine weite Bandbreite variieren. Dies ist primär durch den Einsatz unterschiedlicher PP-Subtypen (Homopolymere, Random- und Block-Copolymere) und der Etablierung diverser Verarbeitungsverfahren bedingt. Wie in Abbildung 1 dargestellt, decken die untersuchten post-consumer Produkte diesen Eigenschaftsraum weitgehend ab, zeigen aber eine systematische Verschiebung zu höheren MFR-Werten gegenüber vergleichbaren Virgin Grades – ein klares Indiz für prozessinduzierte Degradation während der Primärverarbeitung und Aufbereitung.

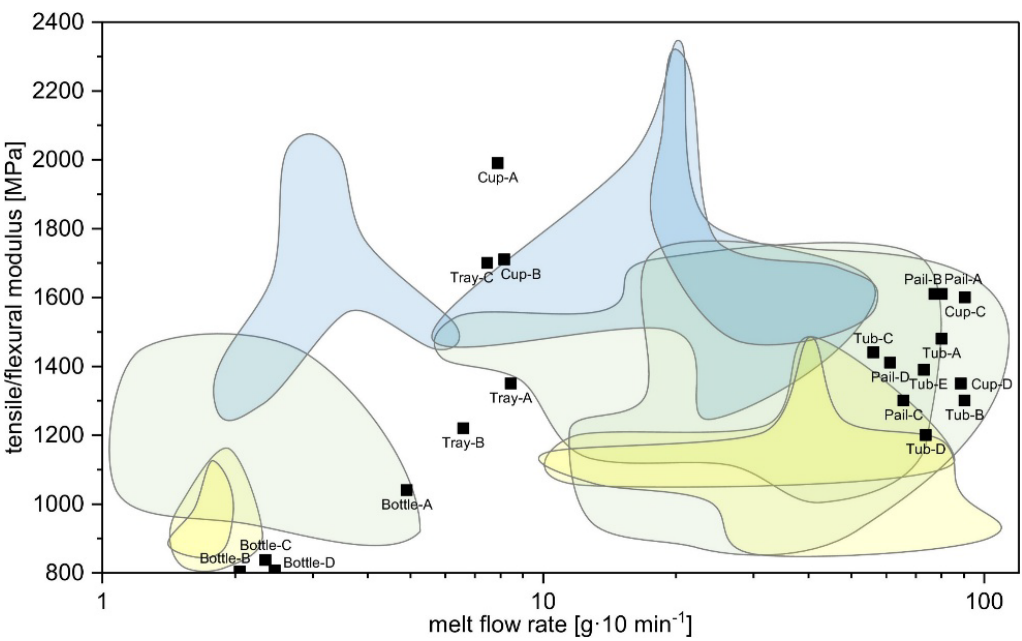


Abb. 1: Zusammenhang zwischen Zugmodul und Schmelzflussrate der untersuchten starren PP-Verpackungsprodukte. Die farbigen Flächen zeigen als Referenz die Eigenschaftsbereiche kommerzieller Neuware-Grades nach PP-Subtyp – Homopolymere (blau), Random-Copolymere (gelb), Block-Copolymere (grün) – und Verarbeitungsverfahren (Blasformen, Tiefziehen, Spritzguss).

Die MFR-Bereiche trennten sich klar nach Verarbeitungsverfahren: Flaschen (2,1-4,9 g·10 min⁻¹), tiefgezogene Produkte (6,6-8,4 g·10 min⁻¹) und Spritzgussprodukte (56,1-90,4 g·10 min⁻¹). Die Zugmoduli spiegelten die eingesetzten PP-Subtypen wieder: Hohe Steifigkeiten wie bei Cup-A (1990 MPa) sind charakteristisch für Homopolymere, die für dünnwandige Anwendungen mit hoher Steifigkeitsanforderung eingesetzt werden. Die niedrigsten Zugmoduli zeigten erwartungsgemäß die Flaschen (800–1040 MPa), für die Random-Copolymere typisch sind – diese weisen eine vergleichsweise hohe Schlagzähigkeit auf (6,8–10,5 kJ·m⁻²), jedoch auf Kosten eines geringeren Zugmoduls. Bei der Kerbschlagzähigkeit bildete Tub-D mit 9,3 kJ·m⁻² eine deutliche Ausnahme, was auf ein Block-Copolymer hindeutet – charakteristisch für Tiefkühlverpackungen, bei denen Schlagfestigkeit auch bei Minustemperaturen gewährleistet sein muss. Die DSC-Analyse bestätigte die Steifigkeit-Kristallinitäts-Korrelation (R^2 = 0,77) und offenbarte zudem Mehrkomponentendesigns: In zwei Produkten wurde ein EVOH-Schmelzpeak bei ~183 °C detektiert, der auf Sauerstoff-Barriereschichten zurückzuführen ist. Die GPC-Analyse (siehe Abbildung 2) zeigte eine enge inverse Korrelation zwischen gewichtsmittlerem Molekulargewicht (M_w) und MFR (R^2 = 0,97), wobei Produkte mit vergleichbarem Molekulargewicht sich in Steifigkeit und Schlagzähigkeit erheblich unterscheiden können.

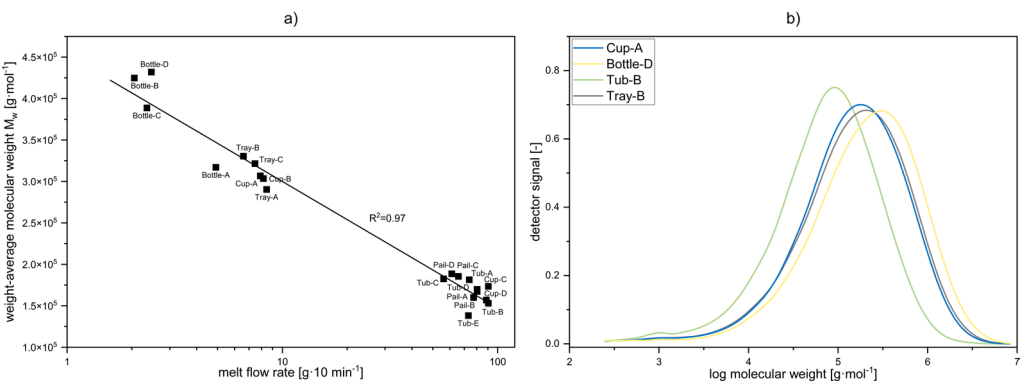


Abb. 2: a) Korrelation zwischen gewichtsmittlerem Molekulargewicht und Schmelzflussrate der untersuchten Produkte sowie b) ausgewählte Molekulargewichtsverteilungskurven (Cup-A, Bottle-D, Tub-B und Tray-B).

3.2 Grenzen der Objektsortierung und Potenzial der eigenschaftsbasierten Flakesortierung

Die Ergebnisse verdeutlichen die grundsätzlichen Grenzen objektbasierter Sortierung: Relevante Materialeigenschaften wie MFR, Zugmodul oder Kerbschlagzähigkeit lassen sich aus äußeren Produktmerkmalen (z.B. Geometrie, Farbe, Marke/Brand) nicht zuverlässig ableiten, da Materialformulierungen herstellerseitig nicht offengelegt werden und der Degradationsgrad der einzelnen Produkte unbekannt ist. Dennoch bleibt Objektsortierung für spezifische Aufgaben unverzichtbar: die Abtrennung von Lebensmittelkontaktmaterialien, die Entfernung kritischer Kontaminationsquellen sowie die Aussortierung von Mehrkomponentenprodukten mit Barriereschichten, wie die DSC-Befunde belegen. So wiesen Non-Food-Produkte in der GC-MS-Analyse deutlich erhöhte Konzentrationen an Aromen, Detergenzien und Kosmetika auf gegenüber Lebensmittelverpackungen – ein klares Argument für die objektbasierte Trennung beider Ströme.
Die eigenschaftsbasierte Flakesortierung bietet hier komplementäre Stärken. Nach der nassmechanischen Aufbereitung weisen Flakes eine deutlich höhere spektrale Qualität auf, da Oberflächenkontaminationen und Etiketten weitgehend entfernt sind. Die identifizierten Korrelationen – Schmelzenthalpie–Zugmodul (R^2 = 0,77) und M_w–MFR (R^2 = 0,97) – belegen, dass intrinsische Materialeigenschaften in spektral erfassbaren Strukturmerkmalen verankert sind und eine eigenschaftsbasierte Klassifikation damit grundsätzlich möglich ist. Der zentrale Engpass liegt derzeit

in der fehlenden Verfügbarkeit robuster Vorhersagemodelle, die NIR/MIR-Spektraldaten mit PP-Eigenschaften verknüpfen.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Der starre PP-Verpackungsabfallstrom weist eine ausgeprägte Heterogenität über alle relevanten Materialdimensionen auf. Die Vermischung von Homopolymeren, Random- und Block-Copolymeren führt bei der Verarbeitung zu Rezyklaten mit durchschnittlichen, wenig spezifischen Eigenschaften. Eine systemische Kombination aus objekt- und eigenschaftsbasierter Flakesortierung bietet daher einen realistischen Weg zu anwendungsspezifischen Rezyklaten: Die Abtrennung von Lebensmittelkontaktmaterialien und relevanten Kontaminationsquellen erfolgt auf Objektebene, während die eigenschaftsbasierte Flakesortierung nach der nassmechanischen Aufbereitung komplementär die Klassifikation anwendungsspezifischer Fraktionen anhand intrinsischer Merkmale ermöglicht. Die Entwicklung robuster spektral-basierter Vorhersagemodelle für PP-Eigenschaften stellt dabei einen entscheidenden Forschungsschwerpunkt dar, um high-performance PP-Rezyklate zu erzeugen, die Neuware in anspruchsvollen Verpackungsanwendungen substituieren können.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] European Parliament and the Council. Regulation (EU) 2025/40 of the European Parliament and of the Council of 19 December 2024 on packaging and packaging waste, amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC.; 2025. Available online: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2025/40 (accessed on 4 December 2025).

[2] Plastics Recyclers Europe. HDPE & PP Rigids Market in Europe: State of play, data 2023.; 2023. Available online: https://www.plasticsrecyclers.eu/publications/ (accessed on 4 December 2025).

[3] M. Mager, M. Berghofer, J. Fischer, *Polymers* **2023**, 15.

[4] M.K. Eriksen, J.D. Christiansen, A.E. Daugaard, T.F. Astrup, *Waste management (New York, N.Y.)* **2019**, 96, 75–85.

[5] J. Geier, M. Bredács, A. Witschnigg, D. Vollprecht, G. Oreski, *Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* **2024**, 42, 767–775

[6] R. Demets, K. van Kets, S. Huysveld, J. Dewulf, S. de Meester, K. Ragaert, *Resources, Conservation and Recycling* **2021**, 174, 105826.

[7] N. Kroell, X. Chen, K. Greiff, A. Feil, *Waste management (New York, N.Y.)* **2022**, 149, 259–290.

[8] N. van Camp, I.S. Lase, S. de Meester, S. Hoozée, K. Ragaert, *Waste management (New York, N.Y.)* **2024**, 189, 300–313.

Dieser Beitrag basiert auf: M. Mager, N. Kuhn, A. Felgel-Farnholz, J. Fischer, *Journal of Applied Polymer Science* **2026**, e71068. https://doi.org/10.1002/app.71068

KONTAKT

DI Dr. Moritz Mager
moritz.mager@jku.at

Im Kreis, aber unter Beobachtung: Zyklische Degradation von Kunststoffrezyklaten

Matthias Frühwirth[1] & Nina Krempl[2]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung, Leoben, Österreich / ib-frühwirth e.U., Ingenieurbüro für technischen Umweltschutz, Wien, Österreich
[2)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Die steigenden Anforderungen an geschlossene Kunststoffkreisläufe erfordern Rezyklate mit konstant hoher Qualität und zuverlässigen Materialeigenschaften – auch nach mehreren Recyclingzyklen. Eine wesentliche Herausforderung stellt dabei die unbekannte Vorgeschichte von Post-Consumer-Materialien dar, da wiederholte Verarbeitungsschritte sowie mögliche Kontaminationen die spätere Einsatzfähigkeit beeinflussen können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Verhalten von rezykliertem Polypropylen (rPP) über zehn simulierte Recyclingzyklen untersucht. Dabei wurden die Auswirkungen wiederholter Verarbeitung auf die Molekülstruktur, das Fließverhalten sowie die mechanischen Eigenschaften analysiert und der Einfluss einer gezielten Stabilisierung bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass geeignete Stabilisierungsstrategien den Abbau der Polymerketten deutlich reduzieren und dazu beitragen können, ein hohes Eigenschaftsniveau über mehrere Verarbeitungszyklen hinweg aufrechtzuerhalten. Neben der Erhaltung der Materialeigenschaften ist die frühzeitige Erkennung von Verunreinigungen ein entscheidender Faktor für hochwertige Recyclingprozesse. Daher wurde ergänzend der Einsatz einer inlinefähigen Raman-Spektroskopie zur Detektion von Fremdpolymeren während der Verarbeitung untersucht. Die Ergebnisse zeigen das Potenzial dieser Technologie als prozessintegrierte Qualitätskontrolle zur Überwachung von Rezyklatströmen. Die Kombination aus verbessertem Verständnis der Materialdegradation, gezielter Stabilisierung und kontinuierlicher Inline-Analytik bildet damit eine wichtige Grundlage, um hochwertige Rezyklate herzustellen und geschlossene Kunststoffkreisläufe langfristig umzusetzen.

1 EINLEITUNG

Neben den Vorgaben der PPWR (EU-Verordnung über Verpackungen und Verpackungsabfälle) wächst bei Konsumenten und Händlern das Bewusstsein für den Einsatz von Rezyklaten in Kunststoffverpackungen. Die große Palette an unterschiedlichen Polymeren und deren spezifischen Materialeigenschaften stellen geschlossene Materialkreisläufe allerdings vor große Herausforderungen. Besonders relevant ist hierbei der Materialabbau im Zuge der Verarbeitung. Insbesondere bei Food-Contact-Verpackungen, welche in der Regel eine kurze Gebrauchsdauer aufweisen, kann es zu mehrfachen Recyclingzyklen kommen. Jeder Verarbeitungsvorgang führt zu einer Degradation des Kunststoffes durch Reduktion der Molekülkettenlänge (Ehrenstein, 2007). Speziell während der Polymerverarbeitung führen thermo-oxidative und mechanische Abbauprozesse zum Zerreißen von Molekülketten. Die mittlere Molmasse, die das Durchschnittsgewicht der Moleküle sowie die Molmassenverteilung, welche die Verteilungskurve der einzelnen Kettenlängen beschreibt, haben dabei eine große Relevanz für die mechanischen und rheologischen Eigenschaften. Diese spiegeln die späteren Gebrauchseigenschaften und die Verarbeitbarkeit wieder. Das Input-Material für industrielle Recyclingprozesse von Leichtverpackungen ist in der Regel sehr heterogen. Dementsprechend ist es schwierig, die „Vorgeschichte“ des Materials lückenlos zu bestimmen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, das Abbauverhalten der Kunststoffe bestmöglich zu verstehen, um aus einzelnen, möglichst repräsentativen Messungen, Aussagen über die Qualität der Rezyklate sowie deren Einsatzmöglichkeiten treffen zu können.

Im Zuge des Forschungsprojektes „Pack2theLoop“, gefördert durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG, wurde an der Montanuniversität Leoben das

Abbauverhalten von PP Rezyklaten und die Möglichkeiten einer Inline-Raman-Spektroskopie untersucht. Der Materialabbau wurde mit Hilfe von 10 simulierten Recycling- und Verarbeitungszyklen untersucht (10 x Compoundieren, Spritzgießen und Zerkleinern) und die Proben wurden jeweils nach dem ersten, fünften und zehnten Zyklus analysiert. Das Material wurde sowohl unstabilisiert, als auch einmalig stabilisiert durch ein antioxidativ wirksames Masterbatch, verarbeitet. Durch den Einsatz der Raman-Spektroskopie wurde untersucht, ob Fremdpolymerkonzentrationen unmittelbar nach dem Extrudier-/ Compoundierprozess am Schmelzestrang inline detektierbar sind.

2 METHODEN

2.1 Methoden und Materialien der zyklischen Verarbeitung

Für die Untersuchung des Abbauverhaltens wurde PP aus der deutschen LVP-Sammlung herangezogen, welches zuvor durch Projektpartner einem optimierten Recyclingprozess unterzogen wurden. Dieser beinhaltete unter anderem eine Vorsortierung auf Rigidbasis mit Lebensmittelkontakt, eine Kaltwäsche, eine Heißwäsche und einer Dekontamination mittels Heißluftreaktor.

Das Material wurde im Labormaßstab zehn Mal compoundiert (inkl. Nassgranulierung und Trocknung mittels Hydrozyklons), Spritzgegossen und mittels Schneidmühle zerkleinert. Diese drei Prozessschritte simulieren die abbau-relevanten Verarbeitungsschritte des Material-Lebenszyklus. Neben einer unstabilisierten Variante (V1) wurde ebenso eine Variante mit 3 Gew.% an antioxidativ wirksamen Stabilisator verarbeitet (V2). Aufgabe des antioxidativen Stabilisators ist das Einfangen bzw. Stabilisieren von Radikalen, welche sich beispielsweise durch mechanisch bedingte Kettenbrüche bilden. Diese Radikale können in weiterer Folge durch eine Reaktion mit Sauerstoff zu weiterer Degradation des Polymers führen (Maier, 2016; Camacho,2000).

Folgende Analysen wurden an den Proben jeweils nach dem ersten, fünften und zehnten Zyklus durchgeführt:

- Messungen der Viskosität, sowie Speicher- und Verlustmodul zur Beurteilung der mittleren Molmasse (Rotationsrheometer)

Für die Verarbeitung thermoplastischer Kunststoffe ist entscheidend, wie lang die einzelnen Polymerketten sind und wie stark sich ihre Längen voneinander unterscheiden. Generell lässt sich sagen, dass mit sinkender mittlerer Molmasse die Viskosität der Kunststoffschmelze sinkt und das Material daher leichter fließfähig ist (Menges, 2011). Dies senkt zwar den Druckbedarf für Extrusion und Spritzgießen, kann aber durch eine verminderte Schmelze- und Formstabilität die möglichen Verarbeitungsprozesse einschränken.

- Zugversuch zur Ermittlung von E-Modul und Bruchdehnung (Zugprüfmaschine)

Relevante mechanische Basisparameter werden mithilfe eines Zugversuches gemessen. Bei diesem wird ein Schulterstab (Universalprüfkörper) an beiden Enden eingespannt und anschließend wird in der Regel mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit angezogen. Damit sind Aussagen über das Verformungsverhalten und die aufnehmbaren Kräfte möglich.

- Ermittlung der Oxidationsinduktionszeit und oxidativen Onset Temperatur (OIT/OOT) zur Analyse der Stabilisatorwirksamkeit bzw. des Stabilisatorverbrauchs (DSC-Gerät)

Die Oxidationsinduktionszeit ist ein Maß für die Oxidationsbeständigkeit des Kunststoffes (Frick, 2011; Ehrenstein, 2004). Die Analyse der Probe erfolgt hierbei durch die Messung der

Wärmestromveränderung im schmelzeflüssigen Zustand unter Sauerstoffatmosphäre. Die OIT erlaubt den Vergleich von stabilisierten und unstabilisierten Polymeren und kann als Maß für den Verbrauch des Stabilisators herangezogen werden.

- Gelpermeationschromatographie (GPC) zur quantitativen Beurteilung der Molmassenverteilung und des Abbauverhaltens

Bezüglich der Molmasse gilt, dass sowohl die durchschnittliche Kettenlänge als auch die Form der Verteilungskurve Einfluss auf die Viskosität des Materials haben. Analysiert wurden neben der Verteilungskurve auch die beiden Parameter M_n und M_w. Bei M_n handelt es sich um die durchschnittliche Masse aller Polymermoleküle. Dieser Wert reagiert besonders empfindlich auf Kettenabbau, beziehungsweise kurzkettigere Moleküle (viele kurze Moleküle senken M_n). Im Gegensatz dazu gewichtet das Gewichtsmittel M_w längere (und damit schwerere) Polymerketten stärker. Diese langen Ketten sind insbesondere für die Schmelzefestigkeit und die Zähigkeit verantwortlich.

2.2 Methoden und Materialien der Inline-Raman-Spektroskopie

Bei der Raman-Spektroskopie handelt es sich um eine komplementäre spektroskopische Methode zu NIR, welche im Recyclingprozess weit verbreitet ist. Sie zeichnet sich durch eine Reihe von Vorteilen während der Kunststoffverarbeitung aus. Zu diesen Vorteilen gehören unter anderem die geringe Sensitivität für Wasser, die Möglichkeit durch Glasscheiben zu messen, die robusten Messungen bei hohen Temperaturen sowie die kompakte Bauweise der Raman-Sonde (Metrohm Inula, 2022; Otto, 2019). In einem ersten Schritt, wurde versucht, die Kontamination durch Fremdpolymere zu bestimmen. Polymerkontaminationen können beispielsweise durch Multi-Layer-Materialien in die Rezyklate eingebracht werden. Der Raman-Messaufbau der Firma i-Red wurde unmittelbar nach dem Doppelschneckenextruder auf dem Abzugsband angebracht (siehe Abbildung 1).

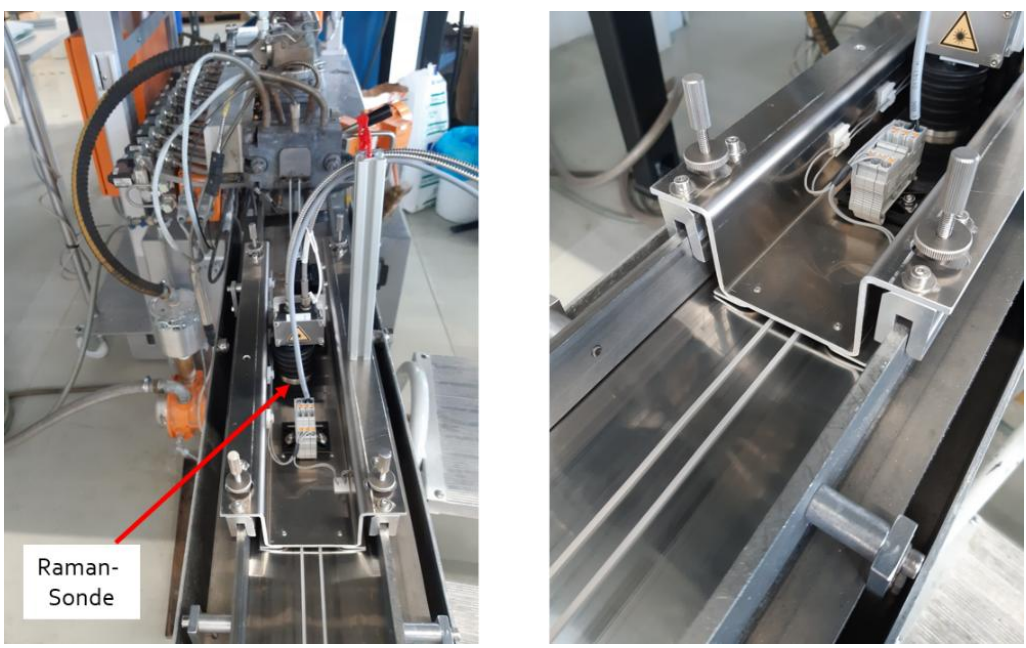


Abb. 1: Unterschiedliche Ansichten des Raman-Sonden-Aufbaus am Abzugsband (nach Doppelschneckenextruder)

Die Compundierung von Rezyklaten mit relevanten Additiven (beispielsweise Farbstoffen oder Stabilisatoren) sowie die anschließende Granulierung/ Pelletierung sind in der Regel die letzten Prozessschritte des Kunststoffrecyclings vor einer Dekontamination, beispielswiese mittels Heißluftreaktor, bevor das Material zu neuen Produkten verarbeitet wird. Untersucht wurden Mischungen aus Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol (jeweils Neuware) in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen von 1-50 Gew.% Fremdpolymer.

3 ERGEBNISSE

Die Analyseergebnisse der zyklischen Verarbeitung zeigen eine deutliche Veränderung im Eigenschaftsniveau hinsichtlich mechanischer und rheologischer Eigenschaften mit zunehmenden Verarbeitungszyklen. In Abbildung 2 ist die Entwicklung relevanter Eigenschaften über die Zykluszahl dargestellt, diese wurde jeweils auf den maximalen Wert normiert.

Zusätzlich zu den Veränderungen mit steigender Anzahl an Verarbeitungszyklen, sind auch klare Unterschiede zwischen dem stabilisierten und unstabilisierten rPP feststellbar. Besonders ausgeprägt sind diese Unterschiede bei der Oxidationsinduktionszeit (OIT), welche mit zunehmender Zyklenzahl abnimmt. Das stabilisierte rPP weißt selbst nach zehn Verarbeitungszyklen noch eine deutlich höhere OIT auf als das unstabilisierte Material nach dem ersten Zyklus. Dies deutet auf eine weiterhin bestehende Wirksamkeit des Stabilisatorsystems hin.

Weiter ist in Abbildung 3 die Entwicklung der Molmassen über zehn Recyclingzyklen zu sehen. Beim stabilisierten Polypropylen bleibt die mittlere Kettenlänge nahezu konstant. Gleichzeitig sinkt der Anteil besonders langer Polymerketten (Gewichtsmittel) auf etwa zwei Drittel des Ausgangswerts ab. Im unstabilisierten Material ist dieser Effekt deutlich stärker ausgeprägt: Die mittlere Kettenlänge verringert sich um 22 %, während der Anteil langer Polymerketten um 59 % abnimmt. Dies zeigt, dass der Stabilisator den Abbau der Polymerketten während des wiederholten Recyclings deutlich verlangsamt.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den mechanischen Eigenschaften. Der E-Modul bleibt auch nach zehn Verarbeitungszyklen nahezu unverändert. Deutlich stärker betroffen ist jedoch die Bruchdehnung, welche die Verformungsfähigkeit des Materials beschreibt, bevor es bricht. Beim unstabilisierten rPP sinkt diese nach 10 Zyklen um rund 90 %. Beim stabilisierten Material beträgt die Abnahme dagegen ca. 45 %. Zusätzlich nimmt beim unstabilisierten rPP auch die maximal aufnehmbare Kraft um mehr als 20 % ab.

Diese Veränderungen können sich direkt auf die Gebrauchseigenschaften auswirken. Produkte werden spröder und brechen leichter. Bei Anwendungen wie Butterbehältern, die eine gewisse Flexibilität aufweisen müssen, kann dies die Funktionalität deutlich beeinträchtigen.

Im Zuge der Inline-Raman Messungen konnten technische Herausforderungen identifiziert werden. Diese spiegelten sich beispielsweise durch die kleine Messfläche der Raman-Sonde (1,5 mm^2) wider. Weiters kam es zu deutlich ausgeprägten, horizontalen Bewegungen der Schmelzestränge am Abzugsband. Dies führte zu einer vergleichsweise schlechten Signalqualität, da sich der Strang nicht durchgehend im Messfeld des Raman-Sensors befand. Ursache der horizontalen Bewegung waren sowohl die am Abzugsband montierten Kühlventilatoren sowie die Schneidmühle zur Granulierung (direkt anschließend an das Abzugsband).

Um die Eignung der Technologie dennoch zu bewerten, wurden in Summe 38 binäre Materialmischungen aus Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol mittels Spritzgießen hergestellt (Fremdpolymergehalte: 1%,2%, 5%, 10%, 20% sowie 50%). Diese wurde im Anschluss statisch, beziehungsweise quasidynamisch (unter Nutzung eines Förderbandes) analysiert. Hierbei zeigte sich, dass bereits geringe Fremdpolymerkonzentrationen von etwa 2% recht zuverlässig erkannt

werden können. Der Einsatz multivarianter chemometrischer Modelle, würde diese Grenze vermutlich noch deutlich nach unten verschieben.

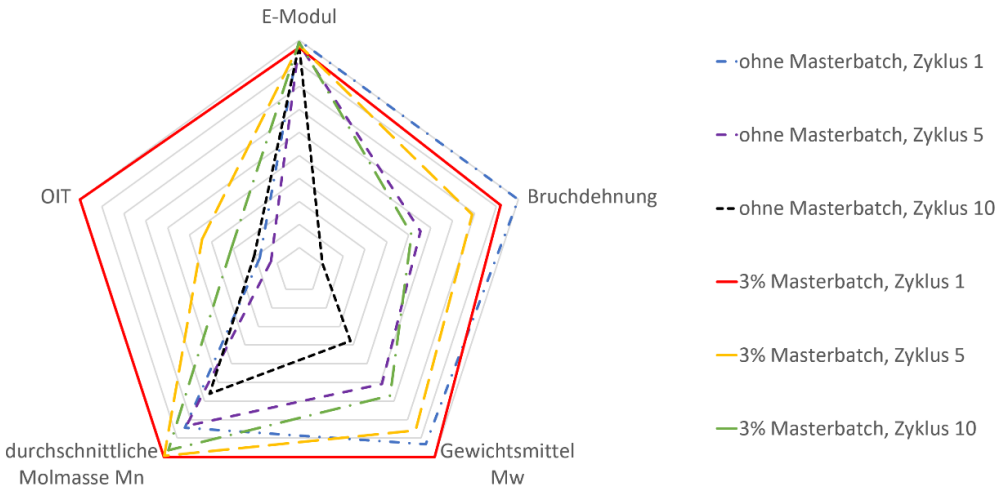


Abb. 2: Entwicklung der Molmassen Mn=durchschnittliche Molmasse, Mw=Gewichtsmittel, mechanischen Eigenschaften (Bruchdehnung, E-Modul) und Oxidationsstabilität (OI) über 10 Zyklen

4 DIE VISION

Abbildung 3 zeigt eine mögliche Nutzung der Raman-Technologie direkt im Verarbeitungsprozess von Rezyklaten.

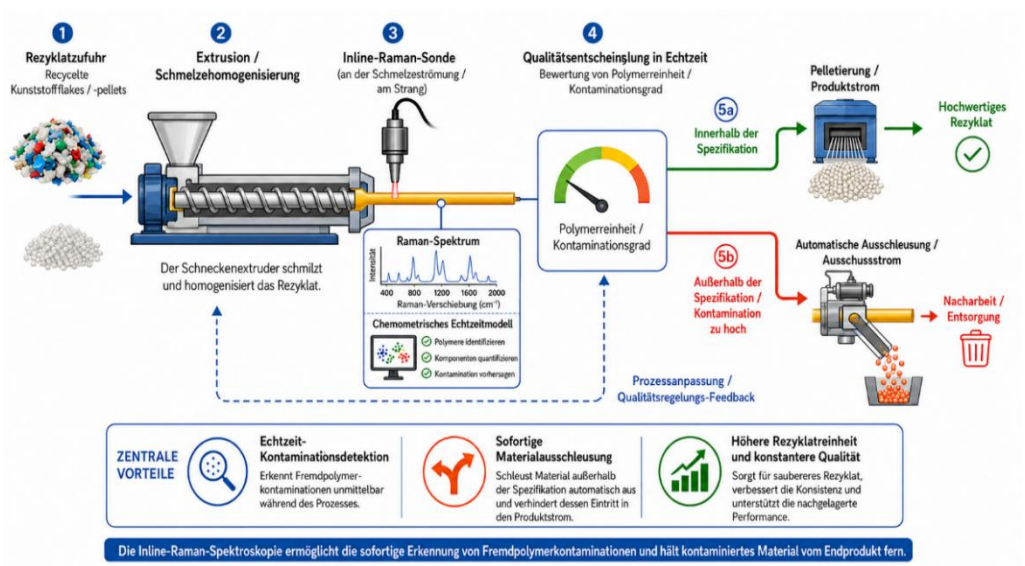


Abb.3: Schematische Darstellung der Inline-Qualitätskontrolle mit anschließender Echt-Zeit-Ausschleusung von Rezyklat, welches nicht die Qualitätsanforderungen erfüllt (Grafik erstellt mittels ChatGPT 5.5 auf Basis von Frühwirth, 2025)

Raman-Sonden analysieren hierbei in Echtzeit die Zusammensetzung des Polymers. Um die bereits beschriebenen Herausforderungen der Inline-Messungen zu umgehen, wäre es auch denkbar, die Rama-Sonde direkt im Zyklinder des Compounders zu platzieren. Material, das aufgrund von Fremdpolymeren (oder auch anderen, unter Umständen sogar gesundheitsgefährdenden) Kontaminationen nicht die erforderlichen Qualitätsstandards erfüllt, wird in Echtzeit aus dem Prozess ausgeschleust. Dadurch wird eine durchgängig hohe Qualität der Produkte gewährleistet.

5 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die gezielte Stabilisierung von Kunststoffen einen wesentlichen Beitrag zum Erhalt der Materialeigenschaften über mehrere Verarbeitungszyklen leisten und einer fortschreitenden Materialdegradation entgegenwirken kann. Für die erfolgreiche Umsetzung geschlossener Materialkreisläufe ist jedoch neben der Stabilisierung ein umfassendes Verständnis des Materialzustands erforderlich, insbesondere da die Zusammensetzung, Vorgeschichte und mögliche Kontaminationen von Rezyklaten häufig variieren.

Mit zunehmendem Einsatz von Rezyklaten gewinnt daher eine prozessbegleitende Materialüberwachung weiter an Bedeutung. Inline-Methoden wie die Raman-Spektroskopie bieten hierbei die Möglichkeit, Qualitätsabweichungen und Verunreinigungen bereits während der Verarbeitung zu erkennen und damit eine gezielte Prozesssteuerung zu unterstützen. Die Kombination aus angepasster Stabilisierung, fundierter Materialcharakterisierung und kontinuierlicher Qualitätskontrolle bildet somit eine wesentliche Grundlage für die Herstellung hochwertiger Rezyklate und die Etablierung nachhaltiger Kunststoffkreisläufe.

LITERATURVERZEICHNIS

Camacho, W. & Karlsson, S. (2000). Quality-determination of recycled plastic packaging waste by identification of contaminants by GC–MS after microwave assisted extraction (MAE). *Polymer Degradation and Stability*, Jg. 71, Nr. 1, S. 123–134.

Ehrenstein, G. W. & Pongratz, S. (2007). *Beständigkeit von Kunststoffen (Edition Kunststoffe).* München: Hanser.

Ehrenstein, G. W., Riedel, G., & Trawiel, P. (2004). *Thermal analysis of plastics: Theory and practice.* München: Hanser.

Frick, A. (2011). *Praktische Kunststoffprüfung.* München: Hanser.

Frühwirth, M. (2025). *Einfluss der Mehrfachverarbeitung auf die Eigenschaften von Polyolefinen und Polystyrol sowie Untersuchung der Eignung von inline Raman-Spektroskopie während des Verarbeitungsprozesses für die Feststellung von Materialkontaminationen.* Masterarbeit, Montanuniversität Leoben.

Maier, R.-D. & Schiller, M. (2016). *Handbuch Kunststoff-Additive (4. Aufl.).* München: Hanser.

Menges, G., Haberstroh, E., Michaeli, W., & Schmachtenberg, E. (2011). *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe (6. Aufl.).* München: Hanser.

Metrohm Inula GmbH, Hg. (15. 06 2026). *Metrohm Inula GmbH.* Von Near-infrared and Raman-spectroscopy for polymer analysis: An in-troduction: https://www.metrohm.com/de_at/applications/E-books/EB-004.html abgerufen.

Otto, M. (2019). *Analytische Chemie, 5. Aufl. (Bachelor).* Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Future Waste – Ein Begriff zwischen inflationärer Verwendung und realer wissenschaftlicher Bedeutung

Thomas Nigl[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Seit seiner Einführung vor zwölf Jahren hat der Begriff *Future Waste* eine bemerkenswerte Karriere gemacht – in Fachliteratur, Projektanträgen und Strategiepapieren, jedoch zum Teil ohne klare Bedeutung. Der Beitrag vermisst diese Verwendungslandschaft und identifiziert vier Lesarten: gänzlich neue Abfälle, das anthropogene Lager als Abfall im Wartezustand, Abfälle aus Zukunftstechnologien sowie den metaphorisch-normativen Gebrauch. Österreichische Beispiele (Gips-, Mineralwolle- und Textilabfälle) zeigen, dass *Future Waste* nicht nur durch technologische Innovation, sondern ebenso durch regulatorische Intervention entsteht. Drei Fallbeispiele (Wasserstofftechnologien, Photovoltaik-Module und Lithium-Ionen-Batterien) werden als Momentaufnahmen derselben Entwicklung in unterschiedlichen Reifestadien gelesen und machen sichtbar, wie sich die Handlungslücke schließt. Daraus leitet sich eine operationalisierbare Definition mit drei konkreten Kriterien ab: Zeitbezug, Antizipierbarkeit und Handlungslücke. So wird der Begriff vom Schlagwort zum Planungsinstrument – und die Abfallwirtschaft von einer reagierenden zu einer antizipierenden Disziplin.

1 EINLEITUNG: FUTURE WASTE – EIN BEGRIFF MACHT KARRIERE

Seit seiner erstmaligen Erwähnung und Definition in der wissenschaftlichen Fachliteratur durch Pomberger und Ragossnig (2014) lässt sich beobachten, dass der Begriff *Future Waste* zunehmend Verwendung findet. Sei es in Projektanträgen, Konferenztiteln, Marketingtexten oder gar politischen Strategiepapieren, zukünftige Abfälle / Abfälle der Zukunft scheinen in aller Munde.

Diese stark steigende Verwendung ist jedoch nicht bloß ein Bauchgefühl, sondern lässt sich auch messen. Etwa wie von Nigl und Pomberger (2026) gezeigt im Anstieg jener wissenschaftlicher Fachartikel, in denen der Begriff *Future Waste* Erwähnung findet.

Damit stellt sich eine Frage, die dieser Beitrag beantworten möchte: Reden alle, die von *Future Waste* sprechen, tatsächlich über dasselbe? Und wenn nicht – lässt sich der Begriff so schärfen, dass er über seine Karriere als Schlagwort hinaus einen realen wissenschaftlichen Nutzen entfaltet? Der Beitrag vermisst dazu zunächst die aktuelle Verwendungslandschaft des Begriffs (Kapitel 2), stellt anschließend die Forschungsansätze der Arbeitsgruppe „*Future Waste* und Abfallwirtschaft“ vor (Kapitel 3) und leitet abschließend eine operationalisierbare Definition samt ihrem wissenschaftlichen und praktischen Nutzen ab (Kapitel 4).

2 FUTURE WASTE INFLATIONÄR VERWENDET? EINE BESTANDSAUFNAHME

Natürlich stellt sich die Frage, ob es sich bei *Future Waste* um einen inflationär verwendeten Modebegriff handelt bzw. inwiefern dieser Grundlage für ein funktionierendes wissenschaftliches Konzept sein kann. Dazu ist es nötig die begriffliche Verwendung etwas näher zu fassen.

2.1 Future Waste als Projektionsfläche: Der Versuch einer Typologie

Future Waste dient aktuell vielfach als Projektionsfläche. Der Versuch einer Typologie ergibt vier unterschiedliche Lesarten:

(a) Abfälle, die es heute noch gar nicht gibt (neue Produkte, neue Materialien),
(b) heutige Produkte, die morgen zu Abfall werden (das anthropogene Lager als Abfall im Spannungsfeld zwischen Nutzungs- und „Wartezustand"),
(c) Abfälle aus Zukunftstechnologien (z.B. aus der Energie- und Mobilitätswende, wie etwa PV-Module, Traktionsbatterien, Rotorblätter, Wasserstofftechnologien, Carbonfasern) und
(d) der metaphorisch-normative Gebrauch des Begriffs Abfall der Zukunft, welcher primär den Vermeidungsaspekt adressiert und ein gewisser Nachhaltigkeitsappell innewohnt.

Bei der ersten Verwendungsart (a) führen die Gedanken zweifelsohne erst zu neuen zukünftigen Entwicklungen. Abfälle aus großteils schon sehr realen, sogenannten Zukunftstechnologien (c), wie etwa Lithium-Ionen-Batterien, Photovoltaik-Module oder Wasserstofftechnologien liegen hier nahe. Aber nicht nur das: In Österreich hat insbesondere der behördliche Regelungsdruck dazu geführt, dass aus Abfällen, die so zuvor (zumindest als getrennt gesammelte Fraktion) noch nicht da waren, plötzlich Thema sind. Die Rede ist beispielsweise von Gipsabfällen, Mineralwolleabfällen aber auch von Textilabfällen. Für diese gab es bis vor kurzer Zeit keine oder nur schwach etablierte getrennte Erfassungssysteme und somit in der Regel auch keine spezifischen Verwertungslösungen. Das Deponierungsverbot von Gips- und Mineralwolleabfällen einerseits und die Pflicht zur getrennten Sammlung von Textilien andererseits änderten das schlagartig, wenngleich mit völlig unterschiedlichen Entwicklungspfaden in den einzelnen Fallbeispielen. *Future Waste* entsteht also nicht nur durch technologische Innovation, sondern ebenso durch regulatorische Intervention: Der Rechtsrahmen kann Abfallströme gewissermaßen „erschaffen", die stofflich längst existierten, abfallwirtschaftlich aber schlecht sichtbar bis unsichtbar waren.

Die Lesart (b) verschiebt den Blick vom Neuen auf das Bestehende: Alles, was heute in Gebäuden, Infrastrukturen und langlebigen Gütern gebunden ist, ist – abfallwirtschaftlich gedacht – Abfall im Wartezustand. Das anthropogene Lager wird so zur größten und zugleich am besten prognostizierbaren Quelle künftiger Abfallströme, denn seine Zusammensetzung steht heute bereits fest; unsicher sind lediglich Zeitpunkt und Pfad der Freisetzung.

Die Lesart (d) schließlich ist die begrifflich unschärfste, aber öffentlich wirksamste: „Abfall der Zukunft" als Appell, dass es diesen möglichst gar nicht geben möge. Diese normative Aufladung ist legitim und anschlussfähig, trägt aber wesentlich zur Verwässerung des Begriffs bei, weil sie *Future Waste* vom analytischen Gegenstand zur rhetorischen Figur macht.

2.2 Verwandte, aber nicht deckungsgleiche Konzepte

Verwandte, aber nicht deckungsgleiche Konzepte wie *Emerging Waste Streams*, *Urban Mining* und anthropogene Lager, *Design for Recycling* oder die prospektive Materialflussanalyse sorgen zusätzlich dafür, dass in der begrifflichen Abgrenzung eine gewisse Unruhe besteht. Eine Gegenüberstellung verdeutlicht die Unterschiede (siehe Tabelle 1).

Die Tabelle zeigt: *Future Waste* ist keines dieser Konzepte, aber es berührt sie alle. Genau darin liegt sowohl die integrative Stärke als auch die Verwechslungsgefahr des Begriffs.

2.3 Warum die Unschärfe problematisch ist

Solange *Future Waste* alles Mögliche bedeuten kann, bedeutet der Begriff wissenschaftlich wenig. Drei konkrete Probleme folgen daraus: Erstens leidet die Vergleichbarkeit von Studien. Wer Mengenprognosen für *Future Waste* publiziert, ohne die zugrunde liegende Lesart offenzulegen, produziert scheinbar widersprüchliche Zahlen. Zweitens belohnt die Förderlandschaft griffige Schlagworte, doch ohne definierten Begriffskern droht *Future Waste* zum Etikett zu werden, das Anträge schmückt, aber keine Forschungsfrage trägt. Drittens braucht evidenzbasierte Politikberatung definierte Größen: Ein Deponierungsverbot, eine Sammelverpflichtung oder eine Behandlungskapazität lässt sich nicht auf Basis einer Metapher planen.

Die Diagnose der inflationären Verwendung ist damit gestellt. Sie ist jedoch kein Grund, den Begriff aufzugeben – sondern Anlass, ihn zu schärfen. Genau hier setzt die Arbeit der Arbeitsgruppe „*Future Waste* und Abfallwirtschaft“ an.

Tab. 1: Gegenüberstellung von *Future Waste* zu anderen abfallwirtschaftlichen Konzepten.

Konzept	**Zeithorizont**	**Betrachtungsgegenstand**	**Typische Perspektive**
Future Waste	vorausschauend (Jahre bis Jahrzehnte)	künftig anfallende Abfallströme in Menge, Qualität und Zeitpunkt	abfallwirtschaftliche Systemplanung
Emerging Waste Streams	gegenwartsnah	bereits erstmalig auftretende, neuartige Abfälle	Abfallcharakterisierung, Abfallverfahrenstechnik
Urban Mining / anthropogenes Lager	Bestand heute (Freisetzung morgen)	in Nutzung befindliche Material- und Produktlager	Ressourcenwirtschaft, Sekundärrohstoffe
Design for Recycling	Produktentwicklung heute	Produktgestaltung mit Blick auf das Lebensende	Produktdesign, Kreislaufwirtschaft
Prospektive Materialflussanalyse	modellhaft, szenariobasiert	Stoffflüsse und Lager als Systemgrößen	Methode/Werkzeug (nicht Gegenstand)

3 FORSCHUNGSANSÄTZE ZU FUTURE WASTE

3.1 Selbstverständnis und Forschungsfragen

Die Arbeitsgruppe „*Future Waste* und Abfallwirtschaft“ am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben versteht *Future Waste* nicht als Schlagwort, sondern als Forschungsauftrag.

Eine der zentralen Fragestellungen lautet: Wie lassen sich künftige Abfallströme in Menge, Zusammensetzung, Qualität und Anfallzeitpunkt antizipieren, bevor sie in relevantem Umfang anfallen und welche abfallwirtschaftlichen Handlungserfordernisse leiten sich daraus ab?

Daraus ergeben sich drei Teilfragen, die das Forschungsprogramm strukturieren:

1. Antizipation: Welche Datengrundlagen, Modelle und Szenarien erlauben belastbare Aussagen über künftige Abfallströme?
2. Charakterisierung: Welche stofflichen, verfahrenstechnischen und schadstoffseitigen Eigenschaften werden diese Abfälle aufweisen und was bedeutet das für ihre Verwertbarkeit?
3. Systemgestaltung: Welche Sammel-, Behandlungs- und Verwertungsstrukturen müssen wann verfügbar sein, und welche Rückkopplungen in Produktdesign und Regulierung sind möglich?

3.2 Methodisches Instrumentarium

Methodisch verbindet die Arbeitsgruppe modellgestützte Prognostik mit experimenteller Abfallcharakterisierung – eine Kombination, die für die Future-Waste-Forschung grundlegend ist, weil weder Modelle ohne stoffliche Realität noch Laborbefunde ohne Mengengerüst zu Handlungsempfehlungen führen.

3.3 Exemplarische Anwendungsfälle: Drei Momentaufnahmen einer Entwicklung

Die folgenden drei Fallbeispiele sind bewusst gewählt: Sie stammen sämtlich aus dem Feld der Zukunftstechnologien (Lesart c), befinden sich jedoch in unterschiedlichen Reifestadien. Gelesen als Abfolge, zeigen sie dieselbe Entwicklung zu drei verschiedenen Zeitpunkten und machen damit sichtbar, was *Future-Waste*-Forschung leisten soll: Die Handlungslücke zu schließen, bevor die Mengen anfallen (vgl. auch Tabelle 2).

Tab. 2: Entwicklung von *Future Wastes* anhand dreier Fallbeispiele.

Fallbeispiel	**Wasserstofftechnologien**	**Photovoltaik-Module**	**Lithium-Ionen-Batterien**
Marktstadium	Beginn des Ausbaus	Boomphase	etabliert, hochdynamisch
Rücklaufmengen	praktisch keine	einsetzend, prognostizierbar	signifikant und steigend
Stand der Recyclingtechnik	Labormaßstab	Pilot-/Prototypenmaßstab	industrieller Maßstab
Handlungslücke	maximal	im Schließen	weitgehend geschlossen
primärer Forschungsauftrag	Verfahrensentwicklung, Design-Feedback	Skalierung, Kapazitätsplanung	Bedarfsorientierte Skalierung

3.3.1 Wasserstofftechnologien – Der möglichst frühe Zeitpunkt

Grüner Wasserstoff ist als nachhaltiger Energieträger insbesondere für die Industrie, aber auch für andere Sektoren von erheblicher Relevanz in der Defossilisierung; allein der prognostizierte Bedarf der Eisen- und Stahlmetallurgie ist enorm. Aktuell stehen wir jedoch erst am Beginn großer Ausbauvorhaben bei Elektrolyseanlagen und Netztransformation. Rücklaufmengen, etwa bei ausgedienten Elektrolyseuren, existieren praktisch noch nicht und dennoch, oder gerade deshalb, befindet sich die Erforschung spezifischer Recyclingverfahren für H_2-Technologie-Komponenten bereits im Labormaßstab. Hier ist *Future Waste* im Wortsinn Zukunft: Der Abfall ist heute noch nicht da, seine Zusammensetzung wird gerade erst durch Designentscheidungen festgelegt. Genau das eröffnet das größte Gestaltungsfenster des gesamten Zyklus – Rückkopplungen in Anlagen- und Komponentendesign sind zu diesem Zeitpunkt noch möglich und vergleichsweise kostengünstig.

3.3.2 Photovoltaik-Module – Der Übergang

Nach Jahrzehnten kontinuierlicher Weiterentwicklung erlebten PV-Module, die zentralen Hoffnungsträger der Energiewende, in den letzten Jahren einen regelrechten Boom bei Neuinstallationen. Dieser Zubau determiniert bereits heute die Rücklaufwelle der kommenden Jahrzehnte. Menge und Anfallzeitpunkt sind über Lebensdauerverteilungen belastbar prognostizierbar, wenn auch mit Bandbreiten. Forschung und Entwicklung zu spezifischen Recyclingverfahren existieren in großer Bandbreite; Prototypenanlagen im Pilotmaßstab sind in Planung und Errichtung. Der Fall steht damit exemplarisch für die entscheidende Übergangsphase: Der Abfall fällt in geringen Mengen an, der Anstieg ist absehbar, die Verfahren sind demonstriert, aber die industrielle

Kapazität ist noch nicht aufgebaut. Ob die Skalierung rechtzeitig gelingt, entscheidet sich in diesem Zeitfenster.

3.3.3 Lithium-Ionen-Batterien – Das (vorläufig) geschlossene Fenster

Lithium-Ionen-Batterien waren möglicherweise der Inbegriff von *Future Waste* der letzten Jahrzehnte. Seit der Markteinführung 1992 hat die Technologie Fortschritte gemacht, die in Geschwindigkeit und Dynamik ihresgleichen suchen: War es anfangs die schrittweise Eroberung verschiedener Elektro- und Elektronikproduktgruppen, legte die Technologie später den Grundstein für die laufende Elektrifizierung des Mobilitätssektors. Recyclingverfahren sind heute vorhanden, im industriellen Maßstab umgesetzt und werden regulativ wie qualitativ laufend optimiert. Die verbleibende Aufgabe ist primär die bedarfsorientierte Skalierung der Recyclingrouten und deren Optimierung. Der Fall zeigt: Die Handlungslücke schließt sich – aber sie schließt sich nicht von selbst, sondern durch mehrere Jahrzehnte gezielter Forschung, Regulierung und Investition. Und er zeigt zugleich die Grenzen der Prognose, denn die Dynamik der Zellchemien hat jede frühe Vorhersage über die stoffliche Zusammensetzung der Rückläufe relativiert.

4 SYNTHESE: VOM SCHLAGWORT ZUM WISSENSCHAFTLICHEN KONZEPT

Aus der Bestandsaufnahme (Kapitel 2) und der Forschungspraxis (Kapitel 3) lässt sich eine Arbeitsdefinition ableiten, die die produktiven Kerne der vier Lesarten integriert und den metaphorischen Rand abschneidet:

> *Future Waste* bezeichnet Stoffströme, die aufgrund heute in Verkehr gebrachter Produkte, absehbarer Technologie- und Konsumpfade oder regulatorischer Entwicklungen mit begründbarer Wahrscheinlichkeit künftig als Abfall anfallen werden und für die die heutigen abfallwirtschaftlichen Systeme noch keine adäquaten Erfassungs-, Behandlungs- oder Verwertungslösungen bereithalten.

Drei Definitionskriterien leiten sich daraus ab:

1. Zeitbezug: Der Abfall fällt in der Zukunft an; das anthropogene Lager, laufende Inverkehrsetzungen oder absehbare Regelungen determinieren ihn aber bereits heute.
2. Antizipierbarkeit: Der künftige Anfall ist keine Spekulation, sondern über Daten, Modelle und Szenarien begründbar. *Future Waste* ist prognostizierbarer Abfall, nicht beliebiger Zukunftsabfall.
3. Handlungslücke: Es besteht eine Diskrepanz zwischen dem erwartbaren Abfallanfall und den heute verfügbaren abfallwirtschaftlichen Lösungen. Erst diese Lücke macht *Future Waste* zum Forschungs- und Planungsgegenstand und grenzt ihn von jenen künftigen Abfällen ab, für die bestehende Erfassungs- und Verwertungsstrukturen bereits ausreichen.

Diese Definition ist bewusst offen für unterschiedliche Entstehungsmechanismen (technologisch, regulatorisch, bestandsgetrieben, etc.) und grenzt sich zugleich klar von den verwandten Konzepten ab. So nutzt sie beispielsweise die prospektive Materialflussanalyse als Methode, das anthropogene Lager als Datenquelle und *Design for Recycling* als Handlungsoption – ohne mit ihnen identisch zu sein.

5 DER REALE WISSENSCHAFTLICHE UND PRAKTISCHE NUTZEN

Mit dem geschärften Begriff wird *Future Waste* vom Etikett zum Planungsinstrument. Der Nutzen entfaltet sich auf mehreren Ebenen: Vorausschauende Infrastruktur- und Kapazitätsplanung wird möglich, weil Mengengerüste und Anfallzeitpunkte vorliegen, bevor Engpässe entstehen. Recyclingverfahren können entwickelt und skaliert werden, bevor kritische Mengen anfallen – die Fallbeispiele der regulatorisch geschaffenen Abfallströme zeigt, welche Friktionen entstehen, wenn dies unterbleibt. Design-Feedback an Produktentwickler und Produktentwicklerinnen wird

systematisierbar, weil die abfallseitigen Konsequenzen heutiger Designentscheidungen quantifizierbar werden. Politikberatung erhält definierte Größen: Sammelverpflichtungen, Deponierungsverbote und Behandlungsanforderungen lassen sich mit Anfallprognosen synchronisieren, statt ihnen vor- oder nachzulaufen. Schließlich erlaubt der Begriff eine rationale Priorisierung von Forschungsmitteln: Nicht jeder künftige Abfall verdient dieselbe Aufmerksamkeit – wohl aber jener mit großer Menge, hoher stofflicher Relevanz und großer Handlungslücke.

Wissenschaftliche Redlichkeit gebietet es, auch die Grenzen des Konzepts zu benennen. Jede Anfallprognose erbt die Unsicherheiten ihrer Eingangsgrößen – Lebensdauerverteilungen, Exportströme und Hortungsverhalten sind notorisch schwer zu fassen. Disruptive Technologiesprünge können Szenarien entwerten; wer 2010 die Rücklaufmengen von Traktionsbatterien prognostizierte, konnte die heutige Zellchemie-Vielfalt kaum vorwegnehmen. Weiters stellt die Datenverfügbarkeit ein strukturelles Problem dar: Inverkehrsetzungsdaten sind häufig fragmentiert, vertraulich oder einfach nur schlicht nicht erhoben. *Future-Waste*-Forschung muss daher stets mit Bandbreiten statt Punktwerten arbeiten und ihre Annahmen offenlegen. Gerade das unterscheidet sie vom bloß schlagwortartigen Gebrauch des Begriffs.

6 FAZIT UND AUSBLICK

Die Karriere des Begriffs *Future Waste* ist kein Problem, doch sein undefinierter Gebrauch ist es. Die Bestandsaufnahme hat gezeigt, dass sich hinter dem Schlagwort mindestens vier Lesarten verbergen, deren unreflektierte Vermischung die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit gefährdet. Die vorgestellte Arbeitsdefinition mit ihren drei konkreten und praxisrelevanten Kriterien – Zeitbezug, Antizipierbarkeit, Handlungslücke – bietet einen Weg, den Begriff aus der inflationären Verwendung zurückzuholen und ihm reale wissenschaftliche Bedeutung zu geben.

Dahinter steht letztlich ein Perspektivwechsel: Abfall nicht als Endpunkt zu denken, sondern als vorhersagbare künftige Ressource und Planungsgröße. Die Abfallwirtschaft war historisch eine reagierende Disziplin: Sie hat behandelt, was anfiel. Die *Future-Waste*-Perspektive macht sie zu einer antizipierenden Disziplin: Sie behandelt, was anfallen wird, bevor es anfällt – zumindest gedanklich, methodisch und planerisch. So wird Abfallwirtschaft zu Kreislaufwirtschaft.

Der Definition- als auch der Konzeptvorschlag verstehen sich dabei ausdrücklich als Diskussionsangebot an die Fachcommunity. Die Recy & DepoTech ist der richtige Ort, sie zu prüfen, zu kritisieren und weiterzuentwickeln – damit *Future Waste* das wird, was ein guter wissenschaftlicher Begriff sein sollte: Nicht nur in aller Munde, sondern klar und deutlich in allen Köpfen.

LITERATURVERZEICHNIS

Nigl, T. & Pomberger, R. (2026) Future Waste – Abfälle von Morgen verstehen und gestalten. In Huber-Heim/Dittrich/Schönberg (Hrsg.), Handbuch Kreislaufwirtschaft (2026), Linde Verlag Ges.m.b.H., Wien.

Pomberger, R. & Ragossnig, A. (2014) Future waste – waste future. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy. 2014;32(2):89-90. DOI: https://doi.org/10.1177/0734242X14521344.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Dr.mont. Thomas Nigl
thomas.nigl@unileoben.ac.at
Arbeitsgruppe Future Waste und Abfallwirtschaft
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben
https://www.unileoben.ac.at/avaw/

Optimierung der mechanischen Eigenschaften recycelter Kurzglasfaser aus geschredderten Windradflügeln und Post-Industrial Abfall in Epoxidharz Platten

Bianca Purgleitner[1] & Christoph Burgstaller[1,2]
[1] Transfercenter für Kunststofftechnik GmbH, Wels, Österreich
[2] Fachhochschule Oberösterreich GmbH, Wels, Österreich

KURZFASSUNG: Im Zuge eines steigenden Umweltbewusstseins gewinnen erneuerbare Energien kontinuierlich an Bedeutung, was insbesondere den Ausbau von Windkraftanlagen vorantreibt. Am Ende der Lebensdauer stellt die Entsorgung der ausgedienten Rotorblätter eine enorme Herausforderung dar, da diese überwiegend aus schwer recycelbarem glasfaserverstärktem Kunststoff bestehen. Unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Kriterien hat sich das mechanische Recycling als praktikabelster Ansatz etabliert. Im Zuge dieser Arbeit wurde der Einfluss von Partikelgröße und Vorbehandlung von geschredderten Windturbinenblättern sowie Post-Industrial Laminatabfällen auf die mechanischen Eigenschaften gepresster Epoxidplatten untersucht. Die Wirksamkeit verschiedener Haftvermittler zur Verbesserung des Zugmoduls und der Zugfestigkeit wurde untersucht. Um die Umweltverträglichkeit der neuen Composites zu erhöhen, wurde ein alternatives Epoxidharz mit hohem Bio-C Anteil getestet. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Partikelgröße und unterstreichen die Relevanz einer Minimierung von Verunreinigungen. Zudem wird die Notwendigkeit der Entwicklung angepasster Haftvermittlersysteme zur Optimierung der Grenzflächenhaftung hervorgehoben.

1 EINLEITUNG

Durch den steigenden Energiebedarf und die Förderung von erneuerbaren Energiequellen werden weltweit immer mehr Windenergieanlagen gebaut und installiert. Anlagen mit einer Betriebsdauer von 20 bis 25 Jahren werden nun stillgelegt und für die Windradflügel (WRF), die hauptsächlich aus glasfaserverstärkten, duroplastischen Kunststoffen (GFK) bestehen, gibt es keine sinnvolle End-of-Life (EoL) Strategie (Beauson, et al., 2022; Liu & Barlow, 2017). Während Deponierung und Verbrennung lange Zeit die Entsorgung von Verbundwerkstoffabfällen dominierten, treiben ein wachsendes Umweltbewusstsein und strengere Vorschriften nun die Suche nach nachhaltigen Lösungen voran. Trotz mehr als drei Jahrzehnten Forschung (Murphy, 1994) sind skalierbare und wirtschaftlich tragfähige Recyclingansätze nach wie vor begrenzt.

Die State-Of-The-Art Recycling-Prozesse umfassen thermische Verfahren (Pyrolyse und Wirbelschichtverbrennung), chemische Löseverfahren, strukturelles Recycling von größeren Windradflügelteilen und mechanisches Recycling (verschiedene Zerkleinerungsverfahren), wobei letztere derzeit die wirtschaftlich machbarste Technologie darstellt (Paulsen & Enevoldsen, 2021). Die Zerkleinerungsverfahren (Zerschneiden, Schreddern, Mahlen) erfordert einfache Anlagen, sind industriell skalierbar und weisen einen geringen Energieverbrauch auf. Beim Mahlen oder Zerkleinern von GFK bleiben die Glasfasern in der Polymermatrix eingebettet, es wird lediglich die makroskopische Struktur verändert. Mechanisch zerkleinertes GFK wird bereits erfolgreich in Polymeren, Beton und Gipsverbundwerkstoffe eingearbeitet, was zu einer verbesserten Biegefestigkeit und Rissbeständigkeit führt (Gonçalves, et al., 2022). Eine breitere Umsetzung hängt jedoch von Faktoren ab, die über die technische Machbarkeit hinausgehen, wie beispielsweise der Aufbau skalierbarer Recyclinginfrastrukturen, standardisierte Materialdokumentation, regionale Logistik und Regulierungsmechanismen einschließlich einer erweiterten Herstellerverantwortung.

Um zerkleinerte glasfaserverstärkte Kunststoffe aus WRF für neue Anwendungsbereiche attraktiver zu machen, war das Ziel dieser Arbeit, die mechanischen Eigenschaften von Composite Platten aus Epoxidharz, verstärkt mit geschreddertem GFK-Material (rGFK) aus postindustriellen Abfällen (PI) und aus EoL Windradflügeln zu verbessern. Dafür wurde der Einfluss der Partikelgröße sowie der Herkunft des rGFK auf die Zugeigenschaften in gepressten Verbundplatten untersucht. Zur Ermittlung weiterer Verbesserungsmöglichkeiten wurden verschiedene Haftvermittler getestet und ein Epoxidharz mit biobasierten Rohstoffen untersucht.

2 MATERIAL UND METHODEN

Als Verstärkungsstoff wurden glasfaserverstärkte Kunststoffe aus verschiedenen Quellen untersucht: Post Consumer Material (PC) aus geschredderten Rotorblättern von Windenergieanlagen (von BCUB GmbH) und zerkleinerter Glasfaser-Laminat-Verschnitte aus einem Post-Industrial (PI) Abfallstrom (Danutec Composites GmbH & Co KG). Beide Ausgangsmaterialien wurden mittels Taumelsieb TSM 600 (Allgaier, Deutschland) in mehrere Fraktionen unterteilt, um eine vergleichbare Korngrößenverteilung zu erzielen. Für diese Arbeit wurden nur die feineren Fraktionen verwendet. Da rGFK aus WRF ohne zusätzliche Bearbeitung viele unerwünschte Bestandteile enthält (Purgleitner & Burgstaller, 2026), wurden zum Vergleich zwei unterschiedlich aufbereitete, geschredderte WRF-Materialien untersucht. Das rGFK aus Windradflügel (labPC_0—0,5 von BCUB) wurde im Labormaßstab gereinigt. Das Material von Thornmann (indPC_0—0,5) stammt aus geschredderten WRF aus Osteuropa und wurde in großtechnischen Verfahren aufbereitet. Die Hersteller beider Materialien halten ihre Methoden aus Geheimhaltungsgründen unter Verschluss, daher können keine Angaben zu den genauen Aufbereitungsverfahren gemacht werden. Alle verwendeten Materialien sind in Tab. 1 aufgelistet und deren Aussehen ist in Abb. 1 dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Vorbehandlungen und verfügbaren Mengen konnte die Partikelgröße der aufbereiteten WRF-Material nicht genau dem gesiebten rGFK-Material aus WRF und PI-Laminat angepasst werden und weicht geringfügig davon ab.

Tab. 1: Gewählte Bezeichnung, Lieferant, Vorbehandlung und Siebgröße der verwendeten Materialien.

Name	Lieferant	Ursprung	Vorbehandlung	Siebgröße
PC_0,1—0,4 PC_0,4—1,4	BCUB[a]	WRF	Schreddern, Sieben	0,1–0,4 mm 0,4–1,4 mm
PI_0,1—0,4 PI_0,4—1,4	Danutec[b]	Laminat Verschnitt	Schreddern, Sieben	0,1–0,4 mm 0,4–1,4 mm
labPC_0—0,5	BCUB[a]	WRF	Schreddern, Sieben, Aufbereiten	0—0,5 mm
indPC_0—0,5	Thornmann[c]	WRF	Schreddern, Sieben, Aufbereiten	0—0,5 mm

[a]… BCUB GmbH, Amstetten, Österreich
[b]…Danutec Composites GmbH & Co. KG, Neumarkt im Hausruck, Österreich
[c]…Thornmann Recycling Sp z o.o., Warschau, Polen

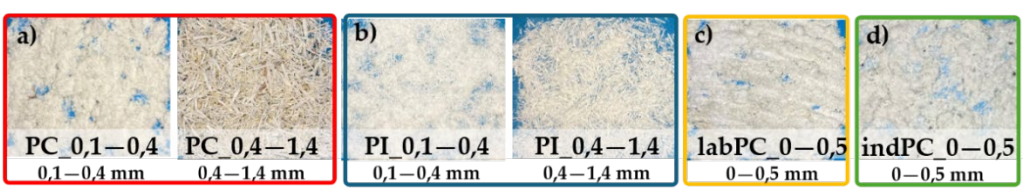


Abb. 1: Aussehen und Bezeichnung der verwendeten rGFK-Materialien aus a) Post-Consumer (PC) Abfällen (geschredderte WRF) b) Post-Industrial (PI) Laminat-Verschnitt c) im Labormaßstab aufbereitetes WRF-Material d) im industriellen Maßstab aufbereitetes WRF-Material.

Zur Bestimmung des Fasergehalts der Verstärkungsstoffe wurden die Ausgangsstoffe für 2 h bei 105 °C getrocknet, jeweils 2 g mittels Macro-TGA (LECO Instrument GmbH, Deutschland) für 2 h bei 625 °C verascht.

Pro Versuch wurden je 45 g geschreddertes rGFK-Material mit 39 g Harz-Härter Gemisch (Mischungsverhältnis lt. Tab. 2) händisch verrührt und in einem Tauchkantenwerkzeug in der Heizpresse (WLP 80/4/3, Wickert Maschinenbau GmbH, Deutschland) bei 100°bar und 80 °C für 60°min zu 100x100x4 mm³ großen Composite Platten gepresst. Für die Ermittlung des Einflusses der Fraktionsgröße, Herkunft und Haftvermittler wurde ein speziell entwickeltes Epoxidharz (KR44.39, Tab. 2) der Firma bto.epoxy GmbH (Österreich) verwendet. In einer weiteren Versuchsreihe wurde ein ebenfalls von bto.epoxy GmbH formuliertes Epoxidharz mit einem möglichst hohen Anteil aus nachwachsenden Rohstoffen verwendet, um den Einfluss der Bio-Anteile auf die mechanischen Eigenschaften im Verbund mit rGFK zu ermitteln.

Tab. 2: Verwendete Epoxid Harze und deren Eigenschaften. Der Bio-Anteil gibt an, wie hoch der Anteil an Rohstoffen aus nachwachsenden Ressourcen ausfällt.

Name	Harz	Bio Anteil	Härter	Bio-Anteil	Mischungs-verhältnis	Harz-Viskosität
KR44.39	KR44.39-A1.00	0 %	IH77.72-B2.00	0 %	100:33	4000-6000 mPas
Bio-Variante	KR44.39-B4.01	29 %	IH77.72-B6.03	37 %	100:40	4100-6500 mPas

Zur Modifikation der Faser-Matrix-Haftung wurden unterschiedliche Haftvermittler der Firma BYK-Chemie GmbH (Deutschland) ausgewählt und in den in Tab. 3 angegebenen Mengen dem Epoxidharz vor der Vermengung mit den rGFK-Fraktionen zugegeben.

Tab. 3: Bezeichnung und verwendete Menge verschiedener Haftvermittler zur Verbesserung der Faser-Harz-Haftung.

Name	Hauptfunktion	Empfohlene Menge	Zugegebene Menge
BYK-C8001	Haftvermittler	1—3%	1,7%
BYK 9920	Netz- und Entlüftungshilfe	0,5—3%	1,7%
BYK 306	Oberflächenspannungsreduktion	0,1—0,5%	1%
BYK-W985	Netz- und Dispergier Additiv	0,5—1,5%	1%

Die gefertigten Composite Platten wurden zur Dokumentation fotografiert und es wurden Durchlichtaufnahmen gemacht, um ein Bild von der Verteilung des Verstärkungsstoffs über die Fläche sowie eventuelle Fehlstellen zu erhalten.

3 ERGEBNISSE

Da beim Veraschen der Ausgangsmaterialien in der Macro-TGA alle Harzanteile vollständig verbrennen, kann davon ausgegangen werden, dass der Ascherückstand der Proben ausschließlich aus Glasfaser besteht. Die untersuchten rGFK-Materialien zeigten einen hohen Glasfasergehalt von 66,15% (PC_0,1—0,4) bis zu 71,92% (indPC_0—0,5) (Abb. 2). Alle verwendeten, geschredderten und gesiebten Ausgangsmaterialien ließen sich gut mit dem Epoxidharz vermengen und zu Platten pressen. Der Zugmodul und die Zugfestigkeit ist bei den Composite-Platten mit höherem Reinheitsgrad (PI und indPC) am besten. Die rGFK-Materialien, die Aufbereitungsschritten unterzogen wurden (labPC und indPC) zeigen höhere mechanische Kennwerte, als das unbehandelte Post-Consumer Material (PC).

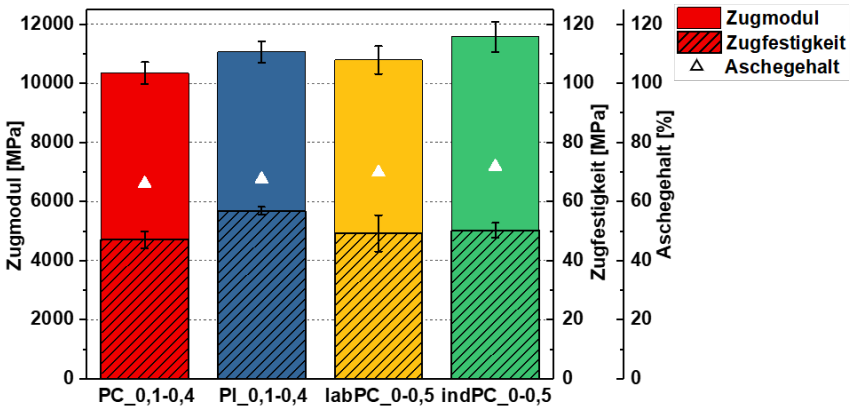


Abb. 2: Zugmodul und -festigkeit von Epoxidharzplatten mit verschiedenen rGFK-Fasern. Zusätzlich ist der Aschegehalt der reinen Verstärkungsstoffe dargestellt.

Zur Verbesserung der Faserbenetzung mit Epoxidharz wurden systematisch verschiedene Haftvermittler im empfohlenen Anteil beigemengt, bevor zuerst der Härter und anschließend die PC- oder PI-rGFK-Verstärkungsstoffe der Mischung zugesetzt und die Platten gepresst wurden. Die getesteten Haftvermittler zeigten keinen signifikanten Einfluss auf den Zugmodul und die Zugfestigkeit, die Abweichungen vom Ausgangswert ohne Haftvermittler sind kaum größer als die Standardabweichung (Abb. 3). Der Verstärkungsstoff aus Post-Industrial Abfällen wies höhere Werte auf als die Post-Consumer rGFK-Materialien aus zerkleinerten WRF. Deutlich ist die Abhängigkeit der Fraktionsgrößen erkennbar: die gröbere Siebfraktion (PC_0,4—1,4) liefert sowohl geringere Werte beim Zugmodul als auch bei der Zugfestigkeit. Dieser Zusammenhang wurde schon in früheren Untersuchungen festgestellt (Purgleitner et al, 2026).

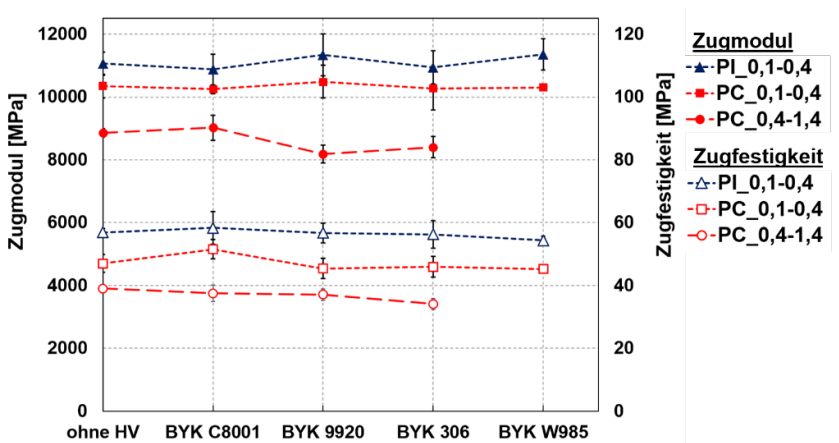


Abb. 3: Zugmodul und -festigkeit von mit und ohne Haftvermittler (HV) hergestellten GFK-Platten aus Post-Indusrial und Post-Consumer Abfallströmen.

Das Epoxidharz mit hohem Bio-Anteil (Bio-Alternative) war für die Fertigung von Composite Platten genauso geeignet wie das rein petrochemisch basierte System. Durchlichtaufnahmen von den produzierten Platten zeigten lokale Anhäufungen in der Verteilung des Verstärkungsmaterials, bedingt durch das händische Einbringen der Harz-Faser-Masse und die begrenzte Fließfähigkeit des Materials im Werkzeug. Bei den Fraktionsgrößen 0,4—1,4 mm sind die größeren Partikel in den Aufnahmen der PC Materialien (aus WRF) deutlich erkennbar.

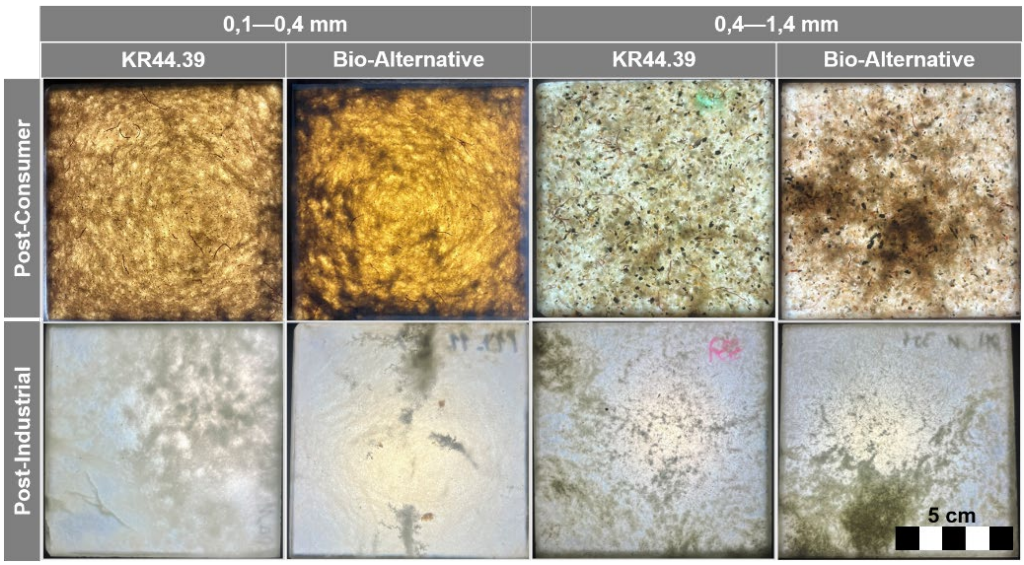


Abb. 4: Durchlichtaufnahmen der produzierten Composite Platten mit verschiedenen rGFK-Materialien, Fraktionsgrößen und Epoxidharzsystemen.

Die Versuchsreihe mit petrochemischem und teilweise bio-basiertem Epoxidharz zeigte wiederrum eine starke Abhängigkeit von der Fraktionsgröße des rGFK bei beiden Harzsystemen (Abb. 5). Sowohl Zugmodul als auch Zugfestigkeit sind bei den feinere Partikelgrößen am höchsten. Anders als beim petrobasierten System KR44.39, erzielt bei der Bio-Variante das rGFK Material aus Post-Consumer (WRF) Quelle geringfügig höhere Emodul-Werte. Generell sind die mechanischen Kennwerte beide Harzsysteme mit rGFK-Verstärkung sehr ähnlich. Bei der Fraktionsgröße 0,4—1,4 mm ist der Zugmodul um 6% (PC) bzw. um 17% (PI) verringert, wenn als Matrixmaterial das Epoxidharzsystem mit Bio-Anteil verwendet wird.

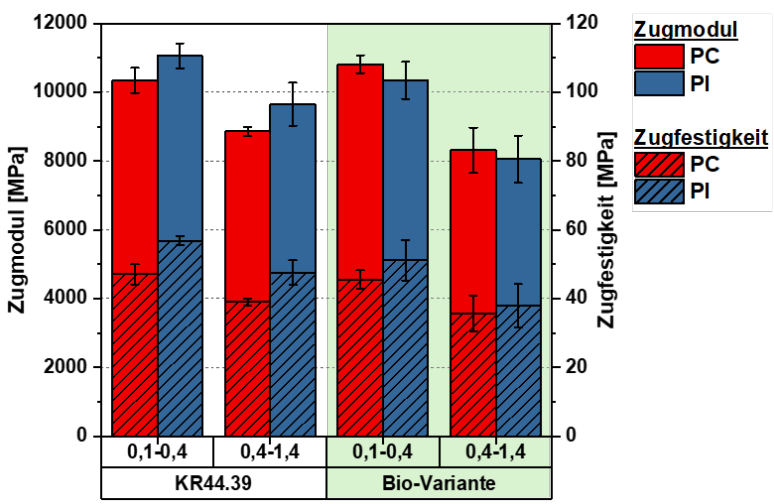


Abb. 5: Zugmodul und Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Fraktionsgröße des verwendeten GFK-Materials und des verwendeten Harzsystems.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Im Zuge dieser Arbeit wurden gepresste Epoxidharzplatten mit Glasfaserverstärkung aus geschredderten Windradflügeln und Laminat-Verschnitt zur Evaluierung der verschiedenen Einflussparameter wie Partikelgröße, Matrixmaterial, verwendete Haftvermittler und Rohstoffaufbereitung hergestellt. Die Ergebnisse geben Aufschluss über die Möglichkeiten zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften:

- Beim Veraschen der Verstärkungsmaterialien zeigte sich ein hoher Glasfasergehalt von etwa 70%. Materialien mit geringem Fremdstoffanteil, wie Post-Industrial oder gereinigtes Post-Consumer rGFK, weisen den höchsten Glasfasergehalt auf.
- Die Zugversuchskennwerte sind bei Epoxidharzplatten mit Verstärkung aus geschredderten PI-Laminat-Verschnitten und aus industriell gereinigtem WRF-Material am höchsten. Das unterstreicht die Notwendigkeit geeigneter Aufbereitungsschritte, damit geschreddertes Windradflügelmaterial effizient in neuen strukturellen Anwendungen eingesetzt werden kann.
- Verschiedene Additive, die dem Epoxidharz beigemengt wurden, zeigten einen wenig signifikanten Einfluss auf die Zugkennwerte in der untersuchten Zugabe Menge. Weitere Versuche mit höherer Additivierung könnten hier deutlichere Ergebnisse erzielen. Da die Haftvermittler allerdings auf eine Glasfaserverstärkung mit Neuware Glasfaser ausgelegt sind, wären besser angepasste Zuschlagstoffe wünschenswert. Diese sind jedoch derzeit noch nicht erhältlich.
- Das verwendeten Epoxidharz-Systems kann dort wo es möglich ist mit Bestandteilen aus biologischen Quellen formuliert werden. Ein Bio-Anteil von bis zu 29% im Harz und 37% im Härter hat kaum Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit sowie auf die mechanischen Kennwerte.

Es zeigte sich, dass eine Verstärkung mit kleineren Partikelgrößen und gereinigtem PC- oder PI-Abfall zu höheren mechanischen Kennwerten in Epoxidharzplatten führt. Eine Kontrolle der Fraktionsgröße und Minimierung der Fremdstoffe ist demnach essenziell für eine Anwendung des Sekundärrohstoffs in strukturellen Composite Platten.

LITERATURVERZEICHNIS

Beauson, J. Laurent, A. Rudolph. D.P, Pagh Jensen, J. (2022).The Complex End-of-Life of Wind Turbine Blades: A Review of the European Context (Renewable Sustainable Energy Reviews). 155. 111847

Liu P, Barlow CY. (2017). Wind Turbine Blade Waste in 2050 (Waste Management). 62, 229–240.

Murphy, J. (1994). Recycling of Reinforced Plastics (The Reinforced Plastics Handbook) 1st ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 318–338.

Paulsen EB, Enevoldsen PA. (2021) Multidisciplinary Review of Recycling Methods for End-of-Life Wind Turbine Blades. Energies, 14, 4247.

Gonçalves RM, Martinho A, Oliveira JP. (2022) Recycling of Reinforced Glass Fibers Waste: Current Status. (Materials), 15, 1596.

Purgleitner, B. Burgstaller, C. (2026) Enhancing the mechanical performance of shredded glass fiber composites in epoxy resin bulk molding compounds. Proceedings of ECCM22, Oslo, Norway

Purgleitner, B. Liedl, B. Burgstaller, C. (2026) Investigation of Shredded Glass Fiber Composites from Post-Industrial and Post-Consumer Waste from Wind Turbine Blade for Reuse in Structural Epoxy Resin Plates (Fibers), 14 (5)

KONTAKT

Bianca Purgleitner, MSc.
bianca.purgleitner@tckt.at
0043 7242 1088 2023
Transfercenter für Kunststofftechnik GmbH
www.tckt.at

A green alternative to aqua regia for platinum recovery from PEM electrolyser stacks

Richard Yaw Nti[1], Veronika Kanzler[1], Lea A. Brandner[2] & Thomas Nigl[1]
[1)] Technical University of Leoben, Department of Environmental and Energy Process Engineering, Leoben, Austria
[2)] HyCentA Research GmbH, Graz, Austria

ABSTRACT: The end-of-life recovery of platinum from porous transport layers (PTLs) in proton exchange membrane (PEM) electrolysers is increasingly critical given the projected scale-up of green hydrogen production and the scarcity of platinum group metals (PGMs). Aqua regia, the established lixiviant for this application, achieves near-complete Pt dissolution (92.16 % for thermally platinised PTLs and 99.89 % for PVD-coated PTLs) but generates toxic nitrogen oxides (NO_x) and poses significant safety and waste-handling challenges. We evaluated H_2O_2/HCl in 12 M HCl, at 3, 5, and 10 vol % H_2O_2 as a greener alternative, in which peroxide reduction yields only water, eliminating NO_x. All experiments were conducted in triplicate at ambient temperature using thermally platinised PTLs, PVD-coated PTLs, and NIST SRM 2556 (spent autocatalyst) for analytical validation of the workflow. On thermally platinised PTLs, recovery increased modestly with oxidant concentration (53.84 % to 58.11 ± 19.3 %), reaching approximately 63 % of the aqua regia benchmark, though wide coefficients of variation (26—35 %) reflect underlying coating heterogeneity. In contrast, PVD-coated PTLs yielded consistently negligible recovery (<10 %) across all concentrations, with tight error bars confirming that the dense, uniform film imposes a diffusion barrier that this baseline lixiviant cannot overcome. SRM 2556 achieved a 68.3 ± 17.7 % recovery, confirming the kinetic benefits of high surface area provided by nano-dispersed platinum and validating the methodology. These results establish H_2O_2/HCl as a viable, sustainable alternative for heterogeneous porous matrices, delivering complete NO_x elimination and ambient-temperature operation. However, its moderate recovery on thermally platinised PTLs and failure on PVD coatings demand further enhancement. Ongoing work is therefore investigating ionic additives to bridge this performance gap, preserve the titanium substrate, and enable downstream Pt purification, thereby extending the approach to PVD-coated materials without compromising its green chemistry advantages.

1 INTRODUCTION

Transitioning from conventional energy systems to green hydrogen has advanced rapidly to support the global goal of defossilisation and decarbonisation. Proton exchange membrane water electrolysis (PEMWE) plays a pivotal role in this important strategy. Despite the attractive advantages of PEMWE, including high-purity hydrogen production, faster dynamic response, and compact design, it unfortunately relies on critical raw materials (CRMs), such as platinum group metals (PGMs), including platinum, iridium, and ruthenium. Platinum is employed not only as an electrocatalyst but also as a protective coating for titanium-based porous transport layers (PTLs) against highly corrosive and oxidising conditions [1], [2] (see Figure 1). However, platinum scarcity and geographic supply chain concentration make end-of-life recovery not only an economic priority but also a strategic one [3]. The protective platinum coating is usually deposited via physical vapour deposition (PVD) sputtering, which yields a denser and more uniform film than achieved by electroplating and thermal decomposition (producing a heterogeneous surface) [4], [5]. Since these different methods produce different kinds of coatings with differences in microstructure, it is expected to influence leaching behaviour after end of life (EoL), but, to the best of our knowledge, this has not been extensively explored.

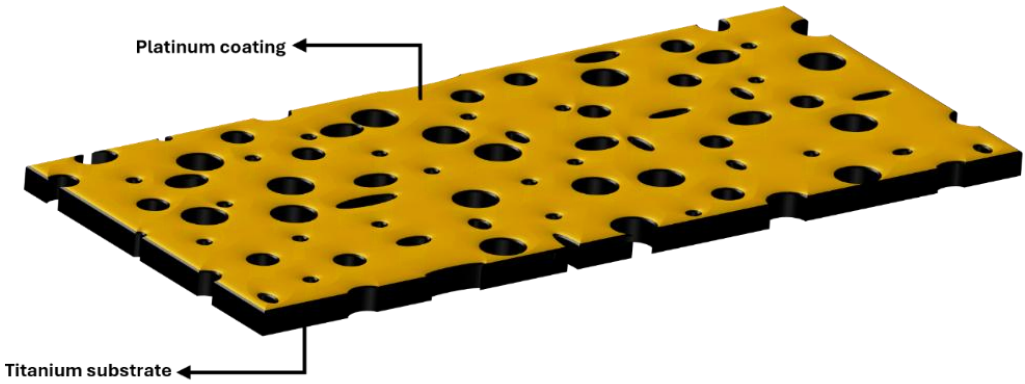


Fig. 1: Platinum-coated titanium porous transport layer (PTL)

So far, aqua regia has been reported as a suitable lixiviant for Pt leaching [6], [7], [8]. It achieves near-complete Pt dissolution in a highly oxidising chloride environment but generates toxic NO_x, produces complex mixed-acid waste, and even requires scrubbing infrastructure. In contrast, H_2O_2 is an attractive alternative oxidant, thermodynamically capable of oxidising Pt in chloride media, with water as a reduction product, thereby eliminating NO_x. H_2O_2 combined with HCl forms an H_2O_2/HCl system that affords independent control of oxidant and chloride concentrations, a key advantage over aqua regia. Prior work has already shown H_2O_2/HCl applicability to PGM-coated or containing materials [7], but no study has evaluated this across different PTL coating types.

2 MATERIALS AND METHODS

Investigated samples were thermally platinised PTLs and uncoated titanium PTLs, which were further coated with platinum via PVD, both sourced from Fuel Cell Store. The platinum loading of each PTL type was determined by complete dissolution in aqua regia (HNO_3/HCl) followed by ICP-OES analysis. To validate the accuracy of the entire analytical workflow, National Institute of Standards and Technology standard reference material (NIST SRM) 2556 from a spent automotive catalyst, with a certified Pt content of 697.4 ± 2.3 mg kg^{-1}, was processed identically alongside the PTL samples and served as a reference material.

Platinum was deposited onto non-platinised PTLs by DC magnetron sputtering at 372 V, 20 mA, 30 rpm substrate rotation, with a 99.9 % Pt target. Samples were coated using a custom-made polylactic acid 3D-printed holder accommodating 20 specimens per cycle. Coating thickness was verified by focused ion beam (FIB) cross-sectioning.

Leaching experiments were conducted using four systems in triplicate: 3, 5, and 10 vol % H_2O_2 in 12 M HCl, and freshly prepared aqua regia (25 vol % HNO_3/HCl) as the benchmark lixiviant. The three peroxide concentration levels were selected to identify the minimum oxidant threshold required for effective recovery while avoiding excessive gas evolution (O_2 bubbling) that occurs at higher H_2O_2 concentrations, which can disrupt solid-liquid contact.

All experiments were conducted at ambient temperature without external heating, using a fixed solid-to-liquid ratio, continuous agitation at 500 rpm, and a leaching duration of 24 hours. Upon completion, the leachates were vacuum-filtered through a Type 13A paper disc filter (diameter 150 mm; pore size 5-8 µm) and analysed by ICP-OES (Agilent Vista MPX CCD) for platinum. Platinum recovery was calculated as (Pt dissolved/initial Pt) x 100 %. Results are expressed as mean ± standard deviation (SD, n = 3), and the coefficients of variation (CV = SD/mean x 100 %) was used to assess the precision and reproducibility of the leaching procedure.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Aqua regia benchmark

Aqua regia (HNO_3/HCl) achieved 92.16 ± 13.01 % and 99.89 ± 10.02 % platinum recovery on thermally platinised and PVD-coated PTL, respectively (Figure 2). The overlapping confidence intervals between these two feeds are substantial: they confirm that under sufficiently aggressive oxidising conditions, the coating deposition method does not dictate the leaching outcome, and that near-complete platinum dissolution is achievable regardless of the PTL microstructure. Aqua regia is the only system in the study that warrants a combined statement across both PTL types, and it establishes the performance benchmark against which all H_2O_2/HCl systems are evaluated. When evaluated against the reference material, aqua regia achieved 82.89 ± 8.46 %, which is lower than both PTL feeds with non-overlapping confidence intervals. This result could be attributed to the complex oxide support matrix of the autocatalyst, which may entrap a fraction of the platinum or reduce lixiviant access relative to the PTL coating morphology.

3.2 H_2O_2/HCl concentration series — Thermally platinised PTLs

For thermally platinised PTLs, platinum recovery increased monotonically with H_2O_2 concentration: 53.84 ± 18.85 %, 54.71 ± 14.33 %, and 58.11 ± 19.32 % at 3, 5, and 10 vol %, respectively (Figure 2). The small 4.3 % gain across a more than threefold increase in oxidant concentration, combined with moderate-to-wide coefficients of variation (CV=26-35 %), reveals two key insights into this system. First, the weak oxidant dependence indicates that platinum oxidation at the coating surface is not the primary rate-limiting step under 12M HCl conditions, that chloride supply is non-limiting at this acid concentration, and that additional H_2O_2 provides only marginal benefit. Second, the wide CVs reflect the inherent heterogeneity of thermally deposited coatings, in which local variation in platinum loading and surface accessibility among replicate samples introduces replicate scatter. Despite this scatter, the consistent directional trend is mechanistically meaningful and confirms that oxidant availability does influence dissolution rate on this porous, accessible surface. At 10 vol % H_2O_2, the 58.11 % recovery corresponds to 63.0 % of the aqua regia benchmark. This gap could be bridged through ionic additive enhancement of the lixiviant, as reported by Sandig et al. [7].

3.3 H_2O_2/HCl concentration series — PVD-coated PTLs

The PVD-coated PTLs told a categorically different story. Platinum recovery at 3, 5, and 10 vol % H_2O_2 was 9.76 ± 4.04 %, 5.13 ± 1.85 %, and 9.69 ± 2.58 %, respectively, essentially near-zero across the entire concentration range (Figure 2). Tighter error bars and CVs of 27—41 % confirm these results are reproducible and reflect a genuine coating property rather than experimental noise. The H_2O_2/HCl system alone without additives is therefore conclusively ineffective for PVD-coated PTLs across the tested concentration range. It is hypothesised that the dense, uniform microstructure of PVD Pt films imposes a diffusion barrier that the H_2O_2/HCl system cannot overcome without ionic modification of the surface reactivity. Importantly, the near-quantitative aqua regia result (99.89 %) confirms that Pt is fully accessible in principle, indicating the challenge

is insufficient lixiviant driving force, not intrinsic coating inaccessibility. This observation implies that ionic modification of the leaching environment offers a clear and justified path to improvement.

3.4 H_2O_2/HCl concentration series — SRM 2556

For SRM 2556, platinum recovery at 3 and 10 vol % H_2O_2/HCl was 62.33 ± 4.03 % and 68.34 ± 17.71 %, respectively, directionally consistent with the thermally platinised PTL trend, and surpassing thermally platinised PTL recoveries at comparable concentrations. This result is consistent with the enhanced kinetic dissolution enabled by the high surface-area-to-volume ratio of nano-dispersed platinum on the autocatalyst alumina support, relative to the PTL coating morphology. This structural advantage compensates for the weaker oxidising power of H_2O_2 compared to aqua regia. The result at 5 vol % H_2O_2 (51.92 ± 31.70 %, CV = 61 %) exhibits the highest variability in the dataset and is excluded from the trend analysis; additional replicates are required to resolve leaching behaviour at this concentration. The reliability of the 3 and 10 vol % H_2O_2 SRM 2556 results, combined with the agreement between measured and certified platinum values under aqua regia, validates the experimental methodology across all three feed types.

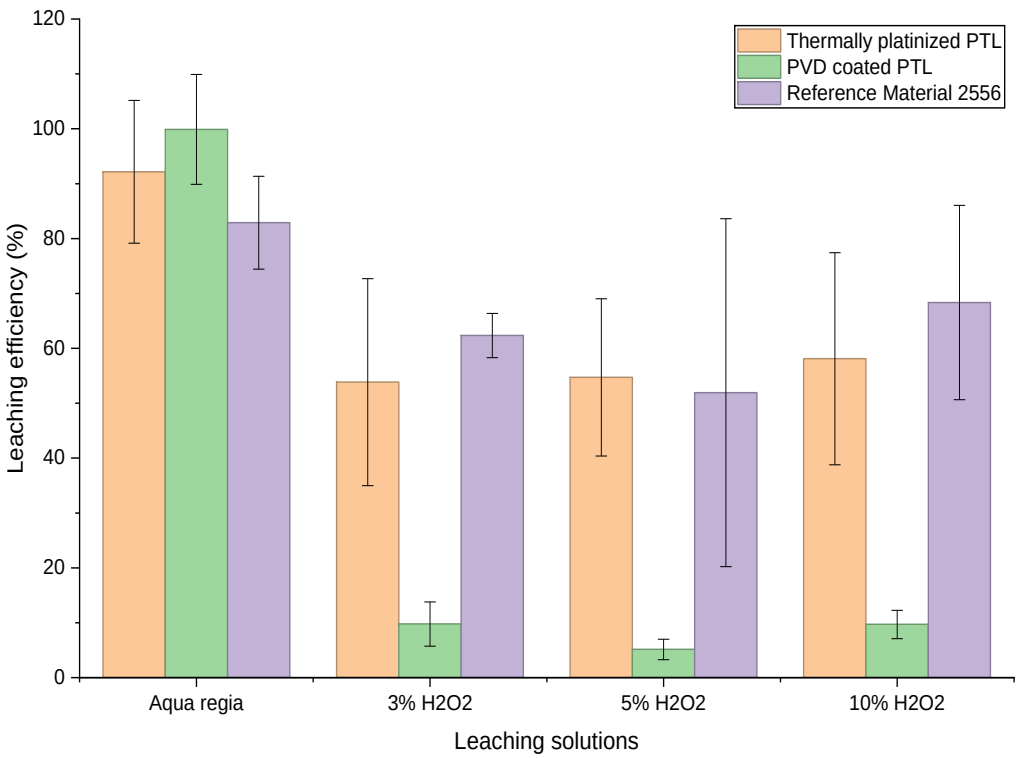


Fig. 2: Platinum recovery efficiency (%) for all four leaching systems

3.5 Environmental assessment

The H_2O_2/HCl systems currently offer two categorical environmental advantages over aqua regia that are independent of recovery level and apply unconditionally across all systems tested. First, complete NO_x elimination: H_2O_2 reduction yields water as its primary by-product, entirely removing the toxic nitrogen oxide generation that requires dedicated off-gas scrubbing infrastructure in aqua regia processing and represents its most significant industrial environmental liability [9]. Second, ambient temperature operability: all experiments in this study were conducted at room temperature without external heating, confirming that thermodynamically and kinetically viable platinum dissolution is achievable without energy input for thermal activation. The moderate recovery gap for thermally platinised PTL (63 % of aqua regia at 10 vol % H_2O_2) reflects the current cost of these environmental gains and may be addressable through additive enhancement without compromising the NO_x elimination advantage, demonstrating that the H_2O_2/HCl approach offers important environmental benefits despite current recovery limitations.

4 CONCLUSION & OUTLOOK

This study presents a comparative evaluation of H_2O_2/HCl leaching on PEM electrolyser PTLs, demonstrating that while baseline formulations achieve moderate platinum recovery from thermally platinised substrates (54—58 %) and SRM 2556 (62—68 %), dense PVD coatings remain highly resistant (< 10 %). Near-quantitative aqua regia recoveries (~92—100 %) confirm that the PVD platinum phase is inherently accessible, identifying insufficient chemical driving force rather than physical isolation as the primary bottleneck. Shifting to an H_2O_2/HCl system eliminates toxic NO_x emissions and enables ambient-temperature operation, establishing it as a more sustainable alternative for specific microstructures. To bridge the PVD performance gap and increase recovery in the other material feeds, ongoing work evaluates ionic additive enhancement alongside investigations into titanium substrate preservation and downstream platinum recovery.

5 ACKNOWLEDGEMENT

This work was carried out within the COMET Project ReCycle as part of the HyCentA COMET Centre (grant ID 892427). The HyCentA COMET Centre is funded within the COMET – Competence Centres for Excellent Technologies Programme, which is supported by BMIMI, BMWET, the co-financing federal provinces of Styria, Upper Austria, Tyrol, and Vienna, and the SFG. FFG manages COMET.

REFERENCES

[1] E. Eikeng, A. Makhsoos, and B. G. Pollet, “Critical and strategic raw materials for electrolysers, fuel cells, metal hydrides and hydrogen separation technologies,” Jun. 19, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.096.

[2] R. Y. Nti, T. Nigl, L. Brandner, H. Antrekowitsch, and R. Pomberger, “Advancements in recycling techniques for hydrogen technologies with focus on electrolysers,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 48, Jul. 2026, doi: 10.1016/j.susmat.2026.e01935.

[3] B. Teixeira, M. Centeno Brito, and A. Mateus, “Strategic raw material requirements for large-scale hydrogen production in Portugal and European Union,” *Energy Reports*, vol. 12, pp. 5133–5144, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.11.002.

[4] G. Stelmacovich and S. Pylypenko, “Characterization of Porous Transport Layers Towards the Development of Efficient Proton Exchange Membrane Water Electrolysis,” Oct. 16, 2024, *John Wiley and Sons Inc*. doi: 10.1002/celc.202400377.

[5] H. PHẠM HỒNG, P. Đoàn Đình, L. Đỗ Chí, L. Nguyễn Đức, and M. Lê Tuấn, “Fabrication of platinum coating on titanium transport layer for Proton exchange membrane water electrolyzer (PEMWE),” *Vietnam Journal of Catalysis and Adsorption*, vol. 14, no. 1, pp. 63–68, Mar. 2025, doi: 10.62239/jca.2025.012.

[6] L. Duclos, L. Svecova, V. Laforest, G. Mandil, and P. X. Thivel, “Process development and optimization for platinum recovery from PEM fuel cell catalyst,” *Hydrometallurgy*, vol. 160, pp. 79–89, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.hydromet.2015.12.013.
[7] L. Sandig-Predzymirska *et al.*, “Recovery of Platinum and Ruthenium from PEM Electrodes via Hydrometallurgical Approach,” *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 11, no. 1, pp. 145–159, Mar. 2025, doi: 10.1007/s40831-025-01011-8.
[8] M. K. Jha, J. C. Lee, M. S. Kim, J. Jeong, B. S. Kim, and V. Kumar, “Hydrometallurgical recovery/recycling of platinum by the leaching of spent catalysts: A review,” 2013, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.hydromet.2012.11.012.
[9] L. Gan, Y. Liu, P. Ye, H. Niu, and K. Li, “Reaction Mechanism for the Removal of NO_x by Wet Scrubbing Using Urea Solution: Determination of Main and Side Reaction Paths,” *Molecules*, vol. 28, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/molecules28010162.

Kunststoffkomponenten aus Elektrofahrzeugen: Materialzusammensetzung und Verwertungspotenziale

Philipp Schetter[1] & Sabine Flamme[1]
[1)] FH Münster, IWARU, Münster, Deutschland

KURZFASSUNG: Mit der zunehmenden Verbreitung der Elektromobilität gewinnen Strategien zur hochwertigen Kreislaufführung von Kunststoffkomponenten aus diesem Segment zunehmend an Bedeutung. Diese Entwicklung wird durch neue europäische und nationale Regelwerke verstärkt, die höhere Anforderungen an den Einsatz von Rezyklaten, die Demontierbarkeit und die Recyclingfähigkeit von Fahrzeugbauteilen stellen. Vor diesem Hintergrund werden die Materialzusammensetzung von Elektrofahrzeugen sowie geeignete Verwertungspfade für Kunststoffkomponenten in diesem Beitrag untersucht. Hierzu werden neben der Durchführung von Literaturrecherchen elektrifizierte Fahrzeuge vollständig demontiert und hinsichtlich ihrer Werkstoffe, Verbindungstechniken und Rückbaubarkeit systematisch analysiert. Aufbauend auf den gewonnenen Daten werden die Kunststoffbauteile den möglichen Verwertungspfaden ReUse, Aufbereitung (Repair, Refurbish, Remanufacture) und Recycling zugeordnet und bewertet. Erste Ergebnisse einer Demontagestudie sowie laufender Untersuchungen an einem weiteren Fahrzeug zeigen eine Vielzahl polyolefinbasierter Werkstoffe, insbesondere Polypropylen-Typen. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung bauteilspezifischer Handlungsempfehlungen zur möglichst hochwertigen Kreislaufführung von Kunststoffkomponenten aus Elektrofahrzeugen.

1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG

Die Automobilindustrie befindet sich im Zuge der Elektrifizierung des Verkehrs in einem umfassenden Transformationsprozess. Elektrofahrzeuge (EVs) gelten dabei als wesentlicher Baustein nationaler und europäischer Klimaschutz- und Dekarbonisierungsstrategien (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2025; Bundesregierung Deutschland, 2023). Gleichzeitig rücken Fragen der Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit zunehmend in den Fokus der Fahrzeugentwicklung (Europäische Kommission & Generaldirektion Umwelt, 2023; Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2024). Der Wandel hin zu elektrifizierten Antriebssystemen beeinflusst dabei nicht nur die technische Ausgestaltung von Fahrzeugen, sondern auch die Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe. Insbesondere Kunststoffe gewinnen aufgrund ihres geringen Gewichts, ihrer wirtschaftlichen Verarbeitbarkeit sowie ihrer hohen Gestaltungsfreiheit weiter an Bedeutung. In modernen Elektrofahrzeugen kommen zunehmend Verbundwerkstoffe zum Einsatz, die sowohl in funktionalen Komponenten als auch in Bauteilen des Fahrzeuginnenraums eingesetzt werden (Bachmann & Sautter, 2014; Buchmeiser, 2014).

Mit der zunehmenden Verwendung dieser Materialien stellt sich zugleich die Frage nach ihrer Rückführung in den Stoffkreislauf. Nach der Verwertung von Fahrzeugen gelangen viele Kunststofffreste in die sogenannte Shredderleichtfraktion (SLF), die durch eine stark heterogene Zusammensetzung aus unterschiedlichen Polymerarten und weiteren nichtmetallischen Materialien gekennzeichnet ist. Diese Materialheterogenität erschwert die Trennung und damit eine hochwertige werkstoffliche Verwertung (Jody et al., 2010). Vor dem Hintergrund der wachsenden Zahl von Elektrofahrzeugen ist künftig mit einem steigenden Aufkommen entsprechender Kunststoffströme zu rechnen. Dadurch gewinnen Strategien zur Demontage, Wiederverwendung und Aufbereitung von Kunststoffbauteilen zunehmend an Bedeutung. Parallel dazu setzen europäische und nationale Regelwerke, insbesondere die neue Altfahrzeugverordnung, verstärkt auf höhere Recyclingquoten sowie den verstärkten Einsatz von Rezyklaten (Europäische Kommission &

Generaldirektion Umwelt, 2023). Im Dezember 2025 einigten sich Europäisches Parlament, Rat und Kommission im Trilog-Verfahren auf einen vorläufigen Kompromiss zur künftigen europäischen Altfahrzeugverordnung. Dieser sieht gestufte Rezyklateinsatzquoten vor. Sechs Jahre nach Inkrafttreten der Verordnung müssen Kunststoffkomponenten in neu zugelassenen Fahrzeugen mindestens 15 % recyceltes Material enthalten, nach zehn Jahren mindestens 25 %. Mindestens 20 % dieser Rezyklatmenge müssen aus Altfahrzeugen stammen. Der Kompromiss wurde im Februar 2026 von den zuständigen Parlamentsausschüssen ENVI und IMCO gebilligt und im Juni 2026 vom Europäischen Parlament bestätigt (Ragonnaud, 2026; Popp, 2026). Die formelle Annahme durch den Rat sowie die Veröffentlichung im Amtsblatt der Europäischen Union stehen zum Zeitpunkt der Beitragserstellung noch aus. Ferner rücken im Zuge der Umsetzung der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) die sogenannten R-Strategien als strukturierender Rahmen für eine nachhaltigere Gestaltung von Produktlebenszyklen und eine ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft stärker in den Fokus der Bundesregierung (Bundesregierung Deutschland, 2025). Dadurch bekommt eine hochwertige Rückgewinnung von Kunststofffraktionen aus dem Fahrzeugrecycling und deren Rückführung in ein Materialkreislauf eine größere Bedeutung.

2 STAND DER TECHNIK DES KUNSTSTOFFKREISLAUFS AUS ELEKTROFAHRZEUGEN

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Verbreitung von Elektrofahrzeugen werden zunächst deren aktueller Bestand und die Entwicklung der Neuzulassungen betrachtet. Darauf aufbauend erfolgt eine Literaturrecherche zum aktuellen Forschungsstand zum Einsatz von Kunststoffen im Fahrzeugbau sowie zu bestehenden Demontage-, Wiederverwendungs- und Recyclingstrategien für Elektrofahrzeuge.

Zum 1. Januar 2026 waren in Deutschland 2.034.260 Fahrzeuge mit reinem Elektroantrieb zugelassen. Europaweit belief sich der Bestand auf 8.158.392 Elektrofahrzeuge. Während batterieelektrische Fahrzeuge damit im Gesamtbestand bislang noch einen geringen Anteil ausmachen, weisen die Neuzulassungen auf eine zunehmende Relevanz elektrifizierter Antriebe im Neuwagenmarkt hin. Im Mai 2026 wurden in Deutschland 59.969 batterieelektrische Fahrzeuge neu zugelassen, während 51.806 Neuzulassungen auf benzinbetriebene Fahrzeuge entfielen. Den größten Anteil an den Neuzulassungen hatten jedoch Hybridfahrzeuge mit insgesamt 95.466 Fahrzeugen, darunter 27.921 Plug-in-Hybride. Europaweit wurden im selben Monat 184.031 batterieelektrische Fahrzeuge sowie 84.659 Plug-in-Hybride neu zugelassen (Kraftfahrt Bundesamt, 2026; Directorate General for Mobility and Transport, 2026). Mit dem wachsenden Bestand elektrifizierter Fahrzeuge gewinnt zugleich die Materialzusammensetzung an Bedeutung. Kunststoffe nehmen dabei einen wesentlichen Anteil ein. Ein modernes Fahrzeug mit einer Gesamtmasse von etwa 1.500 kg weist typischerweise einen Kunststoffanteil von etwa 12 bis 15 % auf, was einer Kunststoffmasse von etwa 180 - 225 kg entspricht. Dieser Anteil variiert je nach Fahrzeugtyp und Ausstattungsvariante (PlasticsEurope AISBL, 2013). Kunststoffe kommen in nahezu allen Fahrzeugbereichen zum Einsatz, wobei die Kunststoffnachfrage des europäischen Automobilsektors im Jahr 2016 insgesamt rund 5,0 Mio. t betrug. Der größte Anteil entfällt mit 53 % auf den Einsatzbereich im Fahrzeuginnenraum, beispielsweise auf Sitze, Schalter sowie Verkleidungselemente. Weitere Einsatzbereiche sind Exterieurbauteile mit 20 %, Anwendungen im Motorraum mit 14 % sowie elektrische und lichttechnische Bauteile mit 13 %. Innerhalb der eingesetzten Kunststoffe dominieren insbesondere Polypropylen (PP) mit 26 %, Polyurethan (PUR) mit 15 % und Polyamide (PA) mit 11,9 %. Daneben werden unter anderem Polyethylen, ABS/SAN, PVC, Polystyrol und weitere technische Kunststoffe verwendet (PlasticsEurope AISBL, 2013). Die Auswahl der betrachteten Kunststoffarten und Bauteile basiert auf ihrer Relevanz für eine hochwertige Kreislaufführung. Im Mittelpunkt stehen insbesondere polyolefinbasierte Werkstoffe wie Polypropylen (PP), Ethylen-Propylen-Mischungen sowie Polyurethan (PUR) (Ortego et al., 2023). Diese Werkstoffe besitzen einerseits eine hohe quantitative Bedeutung im Fahrzeugbau, weisen andererseits jedoch spezifische Herausforderungen hinsichtlich

ihrer Verwertung auf. PP wird häufig in modifizierter Form eingesetzt, beispielsweise mit Elastomeren, mineralischen Füllstoffen oder Verstärkungsfasern. Solche heterogenen Kunststoffsysteme können die werkstoffliche Verwertung gegenüber sortenreinen Kunststoffen erschweren und die Qualität des Rezyklats beeinträchtigen (Miller et al., 2014). PUR ist als Duroplast nicht schmelzbar und stellt daher eine besondere Herausforderung für die Kreislaufführung dar. Mechanisches Recycling von PUR beschränkt sich überwiegend auf die Zerkleinerung und Nutzung als Füllstoff. Eine werkstoffliche Rückgewinnung erfordert demgegenüber chemische Verfahren wie die Glykolyse, die für bestimmte PUR-Abfallströme bereits industriell eingesetzt wird. Die Anwendung auf komplexe Abfallströme aus Altfahrzeugen wird aufgrund von Materialverbunden, Verunreinigungen und einem hohen Aufbereitungsaufwand erschwert (Miller et al., 2014; Simón et al., 2018).

3 METHODIK

Aufbauend auf die Literaturrecherche werden mehrere Elektrofahrzeuge unterschiedlicher Hersteller vollständig demontiert. Dabei werden die verbauten Materialien, ihre stoffliche Zusammensetzung sowie die zugrunde liegenden Konstruktions- und Verbindungskonzepte systematisch erfasst. Die gewonnenen Daten werden mit den Erkenntnissen aus der Literatur verglichen, um bestehende Datengrundlagen zu überprüfen, zu plausibilisieren und gegebenenfalls zu ergänzen.
Ziel ist es, material- und designbedingte Unterschiede zwischen den Fahrzeugen herauszuarbeiten und den aktuellen Stand der Materialstruktur, Rückbaubarkeit und Kunststoffverwendung in Elektrofahrzeugen empirisch zu erfassen. Ergänzend wird ein Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor durchgeführt, um Unterschiede im Materialeinsatz, in der Materialvielfalt sowie im Verwertungspotenzial zu identifizieren. Ferner werden die Kunststoffkomponenten entlang dreier Verwertungspfade (Wiederverwendung, Aufbereitung und Recycling) bewertet, um geeignete Verwertungswege abzuleiten und Handlungsempfehlungen für eine möglichst hochwertige Kreislaufführung zu entwickeln. Dabei soll der Anteil energetischer Verwertung möglichst geringgehalten werden (vgl. Tab. 1). Für den Pfad der direkten Wiederverwendung (ReUse) werden Kriterien wie Rückbauzeit, zerstörungsfreie Demontierbarkeit, Verbindungstechnik, Bauteilzustand und Materialintegrität herangezogen. Für beschädigte oder gealterte Komponenten wird geprüft, inwieweit eine Aufbereitung durch Repair-, Refurbish- oder Remanufacture-Verfahren möglich ist. Für den Recyclingpfad werden sortenrein gewonnene Kunststoffanteile charakterisiert und geeigneten Recyclingverfahren zugeordnet.

Tab. 1: Vorläufiges Bewertungsschema geeigneter Verwertungswege von Kunststoffbauteilen

Verwertungsweg	Sinnvoll, wenn…	Bauteile / Maßnahmen
ReUse	das Bauteil keine strukturellen Schäden, Materialermüdungen oder relevante UV-Alterung aufweist, zerstörungsfrei demontiert werden kann und ein ausreichender Sekundärmarkt besteht. Sicherheitsrelevante Bauteile sind nur bei gesicherter technischer und rechtlicher Konformität geeignet.	Außenverkleidungen, Stoßfänger, Türverkleidungen
Aufbereitung	die Grundfunktion und Struktur erhalten sind, jedoch optische oder lokal begrenzte Schäden vorliegen. Die Aufbereitung muss wirtschaftlich günstiger sein als Ersatz oder Recycling.	Ausbesserung von Kratzern und Rissen an Stoßfängern, Neuversiegelung von Oberflächen, Aufarbeitung von Türverkleidungen und Armaturentafeln
Mechanisches oder chemisches Recycling	eine Wiederverwendung oder Aufbereitung nicht möglich bzw. wirtschaftlich nicht sinnvoll ist und das Bauteil möglichst sortenrein oder als prozessspezifisch definierte Kunststofffraktion demontiert werden kann.	Stoßfänger, Radhausschalen, Behälter, Verkleidungen

4 ERSTE SCHRITTE

Zur Schaffung einer ersten Datengrundlage wurde ein Renault Kangoo aus dem Jahr 2011 demontiert. Mit einem Fahrzeugalter von 15 Jahren repräsentiert das Fahrzeug ein typisches End-of-Life-Fahrzeug, das einem Verwertungsbetrieb in Deutschland zugeführt wird. Die Demontagestudie zeigte, dass der Kunststoffanteil rund 9 % der Fahrzeuggesamtmasse von 1.408 kg beträgt. Die auf der Bauteilkennzeichnungen basierende Auswertung der Kunststoffarten zeigt, dass insbesondere Polyolefine wie Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) einen erheblichen Anteil ausmachen. Zugleich entfielen 32,1 % der Kunststoffmasse auf Verbunde, wobei der Autositz allein 18,3 % der Gesamtkunststoffmasse ausmachte. Bei 25,8 % der Bauteile lag keine eindeutige Materialkennzeichnung vor, sodass weiterführende Analysen erforderlich sind, um diese Bauteile einzelnen Kunststofffraktionen zuordnen zu können (vgl. Tab. *2*).

Tab. 2: Übersicht der identifizierten Kunststoffarten (Renault Kangoo)

Material	**Anteil an der Gesamtkunststoffmasse**
ABS	0,41 %
ABS + PC	0,12 %
ASA + ABS	0,07 %
EPDM	0,08 %
PA 6 GK 20 GF 10	0,35 %
PA 6 mit GF-Anteil	0,63 %
PA 66	0,09 %
PA 66 SI	0,23 %
PA 66 MD 15	0,43 %
PA 66 mit GF-Anteil	0,13 %
PBT + ASA GF 30	0,05 %
PBT + PBT GF 15	0,10 %
PC + ABS	0,12 %
PE	8,34 %
PE + EPDM MD15	0,12 %
PE + EPDM TD 25	0,42 %
PE-HD	0,34 %
PE mit MD-Anteil	6,59 %
PE TD 20	1,12 %
PETP + EPDM	0,07 %
POM	0,97 %
PP	6,76 %
PP + EPDM	0,08 %
PP GF30 + EPDM	0,35 %
PP GFL 40 + PA 66	3,27 %
PP HC	0,24 %
PP MD 20	0,09 %
PP MD 20 + SEBS	0,80 %
PP mit GF-Anteil	2,79 %
PP mit TD-Anteil	0,97 %
PPE + PA 66	3,03 %
PS	0,46 %
PUR GF 25	0,96 %
UP CF 20	1,46 %
Verbunde (min. 3 unterschiedlichen Materialien)	32,12 %
Keine Kennzeichnung	25,84 %
Gesamt	**100,00 %**

Der hohe Anteil von Polyolefinen bestätigt den in der Fachliteratur beschriebenen Stellenwert dieser Kunststoffgruppe im Automobilbau. Erste Auswertungen des gerade demontierten Plug-in-Hybridfahrzeugs (PHEV), dem Chery T26, bekräftigen diese ersten Ergebnisse. Auch hier dominieren Kunststoffe auf Polypropylenbasis die Materialzusammensetzung. Von den bislang identifizierten und klassifizierten Bauteilen entfällt der größte Anteil auf PP-basierte Werkstoffe, wobei insbesondere schlagzähmodifizierte und mineralisch gefüllte PP-Typen häufig auftreten. Daneben findet sich HDPE als eigenständiger Werkstoff in zahlreichen Bauteilen. Technische Kunststoffe wie PC+ABS, PA66 und PA66 GF-20 kommen zwar in geringerer Bauteilanzahl vor, sind jedoch aufgrund ihrer spezifischen Materialeigenschaften und ihres Einsatzes in funktionsrelevanten Bereichen für die spätere Bewertung geeigneter Verwertungswege relevant.

5 AUSBLICK

Aufbauend auf den bisherigen Demontageergebnissen werden die laufenden Untersuchungen an weiteren Elektro- und Hybridfahrzeugen fortgeführt und die erfassten Materialdaten weiter validiert. Auf dieser Grundlage wird die bauteilspezifische Bewertung der drei Verwertungspfade ReUse, Aufbereitung und werkstoffliches Recycling weiterentwickelt. Ziel ist es, die aktuell aufgestellten Kriterien zur Bestimmung geeigneter Verwertungswege durch geeignete Unterkriterien weiterzuentwickeln und deren Anwendung anhand ausgewählter Kunststoffbauteile zu überprüfen. Die Ergebnisse sollen langfristig dazu beitragen, Handlungsempfehlungen für eine recyclinggerechte Fahrzeugkonstruktion, eine angepasste Demontagetiefe und eine hochwertigere Kreislaufführung von Kunststoffkomponenten aus Elektrofahrzeugen abzuleiten.

LITERATURVERZEICHNIS

Bachmann, T., & Sautter, M. (2014). Leichtbau – technologische Herausforderungen und Lösungen für die Automobiltechnik von morgen. VDI Wissensforum GmbH. Kunststoffe im Automobilbau. S. 13-20. Düsseldorf, ISBN: 978-3-18-234333-2: VDI Verlag GmbH.

Buchmeiser, M. R. (2014). Hochleistungsfasern und -polymere für den automotiven Leichtbau - Möglichkeiten und Herausforderungen. VDI Wissensforum GmbH. Kunststoffe im Automobilbau. S. 21-30. Düsseldorf, ISBN: 978-3-18-234333-2: VDI Verlag GmbH.

Bundesregierung Deutschland. (2023). Klimaschutzprogramm 2023 der Bundesregierung. 04.10.2023. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.). Berlin. Abgerufen am 19. 06 2026 von https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/klimaschutz/20231004-klimaschutzprogramm-der-bundesregierung.html?utm_.com

Bundesregierung Deutschland. (2025). *Transformation gemeinsam gerecht gestalten - Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Weiterentwicklung.* Kabinettsbeschluss vom 29.01.2025. Berlin. Abgerufen am 22. 06 2026 von https://www.bundesumweltministerium.de/themen/nachhaltigkeit/strategie-und-umsetzung/nachhaltigkeitsstrategie

Directorate General for Mobility and Transport. (2026). Number of newly registered and total number of alternative fuelled (BEV, PHEV, H2, LPG, CNG, LNG) passenger cars (M1). Brüssel: European Commission. Abgerufen am 22. 06 2026 von https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27/vehicles-and-fleet

Europäische Kommission & Generaldirektion Umwelt. (2023). Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates über Anforderungen an die kreislauforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen. *COM(2023) 451 final, 2023/0284 (COD), 13.07.2023*. Brüssel.

Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union. (2024). Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte. *Verordnung (EU) 2024/1781, Erstveröffentlichung: 13.06.2024, Fassung: 28.06.2024, ABl. L 1781*. Brüssel.

Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union. (2025). Verordnung (EU) 2019/631 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO2-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge. *Verordnung (EU) 2019/631, Erstveröffentlichung: 17.04.2019, Fassung: 09.07.2025, ABl. L 1214, S. 1-55*. Brüssel.

Jody, B. J., Daniels, E. J., Duranceau, C. M., A., P. J., & S., S. J. (2010). *End-of-Life Vehicle Recycling: The State of the Art of Resource Recovery from Shredder Residue.* Argonne, Illinois (USA): Energy Systems Division, Argonne National Laboratory. doi:10.2172/1010492

Kraftfahrt Bundesamt. (2026). Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Kraftstoffarten im Verlauf der letzten 14 Monate. Flensburg: Bundesministeriums für Verkehr. Abgerufen am 22. 06 2026 von https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Umwelt/umwelt_node.html

Miller, L., Soulliere, K., Sawyer-Beaulieu, S., Tseng, S., & Tam, E. (2014). Challenges and Alternatives to Plastics Recycling in the Automotive Sector. *Materials*(7), S. 5883-5902. doi:10.3390/ma7085883

Ortego, A., Russo, S., Iglesias-Embil, M., Valero, A., & Magdalena, R. (2023). Exergy Assessment of Plastic Car Parts. *vehicles*(5), S. 1211-1226. doi:10.3390/vehicles5030067

PlasticsEurope AISBL. (2013). Automotive – The world moves with plastics. (P. AISBL, Hrsg.) Brüssel. Abgerufen am 22. 06 2026 von https://plasticseurope.org/knowledge-hub/automotive-the-world-moves-with-plastics-brochure/

Popp, D. (2026). New rules for a more sustainable EU automotive sector. 18.06.2026. Abgerufen am 21. 06 2026 von News - European Parliament: https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20260611IPR45210/new-rules-for-a-more-sustainable-eu-automotive-sector

Ragonnaud, G. (2026). Circularity requirements for vehicle design and management of end-of-life vehicles (REFIT). 22.05.2026. Abgerufen am 21. 06 2026 von Legislative Train Schedule - European Parliament: https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-revision-of-eu-rules-on-end-of-life-vehicles-and-type-approval-of-motor-vehicles

Simón, D., Borreguero, A. M., Lucas, A. d., & Rodríguez, J. F. (2018). Recycling of polyurethanes from laboratory to industry, a journey towards the sustainability. *Waste Management*(76), 147-171. doi:10.1016/j.wasman.2018.03.041

KONTAKT

M. Sc. Philipp Schetter
p.schetter@fh-muenster.de
0251 83-65176
IWARU – Arbeitsgruppe Ressourcen
FH Münster
https://www.fh-muenster.de/de/iwaru

Sensorik, Daten, Algorithmik: Vision-Pipelines für KI im Recycling

Alexander Eckert[1], Laurin Ginner[1], Nicole Brosch[1], Filip Hendrichovsky[1] & Rita Ebner[2]
1) AIT Austrian Institute of Technology, High-Performance Vision Systems, Wien, Österreich
2) AIT Austrian Institute of Technology, Center of Energy, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: KI-basierte Klassifizierung gewinnt im Sortier- und Recyclingbereich zunehmend an Bedeutung. Robuste Entscheidungen entstehen jedoch nicht allein durch die Wahl eines einzelnen Klassifikators, sondern durch eine projektspezifisch ausgelegte Bilddaten- und oft mehrstufige Auswertungspipeline. Je nach Materialstrom müssen Sensoren, Beleuchtung, Auflösung, Datenmengen, Annotationsstrategie und Auswerteansätze gemeinsam betrachtet werden. Der Beitrag zeigt diese Komplexität anhand dreier Beispiele: Im FFG-Projekt WattsOK werden gebrauchte Photovoltaikmodule multimodal inspiziert und für eine ReUse-/Recycle-Entscheidung bewertet. Im FFG-Projekt ReUseTex werden Aufnahme- und Annotationstechnologien für die KI-gestützte Sortierung gebrauchter Textilien entwickelt. Ein Sortierbeispiel für Münzen in einem Gemisch metallischer Kleinteile zeigt den Einsatz von Photometric Stereo. Die daraus gewonnen 2,5D-Oberflächeninformation dienen anschließend als zusätzliche Grundlage für die Klassifikation. Die Beispiele verdeutlichen, dass KI im Recycling als integrierter Teil eines Vision-Systems verstanden werden muss, das von der Sensorauswahl bis zur Einbindung in reale, echtzeitfähige Prozessumgebungen reicht.

1 EINLEITUNG: KI IM RECYCLING ALS PIPELINE-AUFGABE

Recyclingprozesse stehen vor steigenden Anforderungen: Materialströme werden größer und heterogener, Qualitätsanforderungen nehmen zu und Entscheidungen müssen schneller, reproduzierbarer und besser dokumentierbar werden. Gleichzeitig sind Objekte häufig verschmutzt, deformiert, überlagert oder schwer eindeutig zu klassifizieren. Notwendige manuelle Inspektion und Sortierung können zum Engpass werden.

KI-basierte Verfahren können potenzielle Lösungen für solche Prozesse sein, wenn es möglich ist, die entscheidenden objektdefinierenden Unterschiede mit Sensortechnik zu erfassen. Es ist also verkürzt, eine einzelne KI als alleinige Lösung zu betrachten. Entscheidend ist die gesamte Pipeline von der physikalischen Bild- und Sensordatenentstehung bis zur Entscheidungslogik. (Abb. 1) In Projektverbünden werden Bilddaten häufig an Versuchsanlagen oder realen Materialströmen erzeugt. Die Aufgabe der Bildverarbeitung besteht darin, aus diesen Rohdaten reproduzierbare, annotierbare und algorithmisch nutzbare Datensätze für Training, Bewertung und Klassifikation abzuleiten. AIT High-Performance Vision Systems (HVS) bringt hier insbesondere Expertise in Kamera- und Beleuchtungsauslegung, Aufnahmesoftware, Bildverarbeitung und KI-Echtzeit-Klassifikation ein (Eckert, High Performance Vision Systems im Recyclingbereich, 2026).

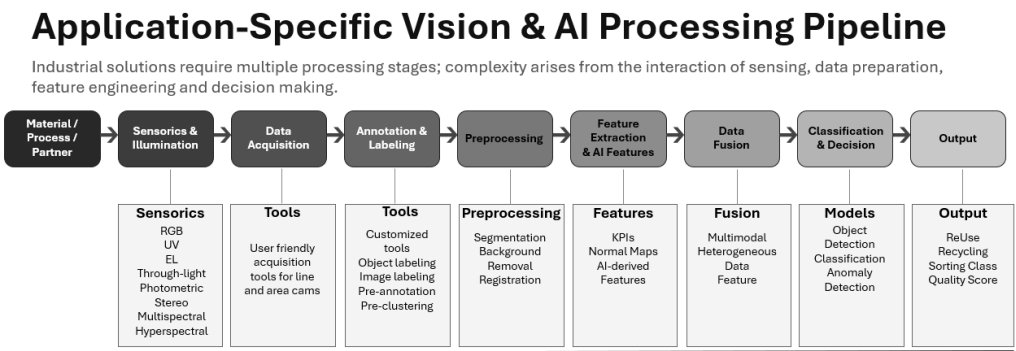


Abb. 1: Schematische Darstellung einer anwendungsspezifischen Vision- und KI-Pipeline im Bereich Recycling. Die einzelnen Verarbeitungsschritte reichen von Sensorik und Beleuchtung über Datenaufnahme, Annotation, Vorverarbeitung und Merkmalsextraktion bis zu Datenfusion, Klassifikation und Ausgabe. In der unteren Reihe sind konkrete Beispiele aus den vorgestellten Recyclingprojekten aufgelistet.

2 KOMPLEXE VISION-PIPELINES FÜR RECYCLINGANWENDUNGEN

Eine Vision-Pipeline beginnt mit der Analyse von Material, Prozessumgebung und Zielentscheidung. Daraus werden Anforderungen an Auflösung, Sichtfeld, Beleuchtung, spektrale Information, Taktzeit, Schnittstellen und Robustheit abgeleitet. Je nach Anwendung sind unterschiedliche Sensoren, Beleuchtungswinkel oder Aufnahmegeometrien notwendig. Auch die Datenmengen unterscheiden sich stark: Manche Aufgaben lassen sich mit wenigen hundert gezielt erzeugten Aufnahmen untersuchen, andere benötigen tausende oder zehntausende annotierte Beispiele. Entscheidend ist, die Datenerzeugung so zu planen, dass sie zur späteren Auswertung passt.

Ein zentraler Baustein ist die Annotation. Objektklassen, Defektklassen, Qualitätslabels oder ReUse-/Recycle-Entscheidungen müssen konsistent definiert und effizient erfasst werden. Standardwerkzeuge reichen dabei nicht immer aus; häufig sind anwendungsspezifische Annotationstools nötig, weil Defekte projektspezifisch sind, mehrere Label-Ebenen benötigt werden oder große Datenmengen mit vertretbarem Aufwand annotiert werden müssen. Annotation bestimmt damit die spätere Leistungsfähigkeit, Interpretierbarkeit und Belastbarkeit der KI.

Auf algorithmischer Ebene können Pipelines sehr unterschiedlich aufgebaut sein. Typische Schritte sind Kalibrierung, Objekterkennung, Segmentierung, Freistellen, Hintergrundentfernung, Registrierung, Cropping und Normalisierung. Darauf aufbauend werden manuell definierte Merkmale, sogenannte Key Performance Indicators (KPIs), berechnet oder KI-Pipelines für Detektion, Klassifikation, Anomalieerkennung und automatische Merkmalsextraktion eingesetzt. Oft ist Datenfusion entscheidend, etwa die Kombination verschiedener Beleuchtungsrichtungen, optischer Modalitäten oder nichtbildbasierter Messwerte.

3 FALLBEISPIEL WATTSOK: MULTIMODALE INSPEKTION GEBRAUCHTER PV-MODULE

Das FFG-Projekt WattsOK adressiert die automatisierte ReUse-/Recycle-Entscheidung für gebrauchte Photovoltaikmodule. Viele ausrangierte Module gelangen direkt in das stoffliche Recycling, obwohl sie häufig noch 80-90 % ihrer ursprünglichen Leistung erreichen können und damit prinzipiell für eine Wiederverwendung geeignet wären. Es fehlt jedoch ein effizienter und skalierbarer Prüf- und Entscheidungsprozess.

Die Prozessidee kombiniert optische Inspektion, elektrische Messungen, Produktinformationen und eine PV-Inspektionsdatenbank. Die Daten umfassen unter anderem Front- und Rückseitenaufnahmen, Elektrolumineszenz, UV-Fluoreszenz, Durchlichtbilder, elektrische Messungen und initiale Produktspezifikationen (Ebner, et al., KI & Robotik für die Wiederverwendung gebrauchter PV-Module, 2026).

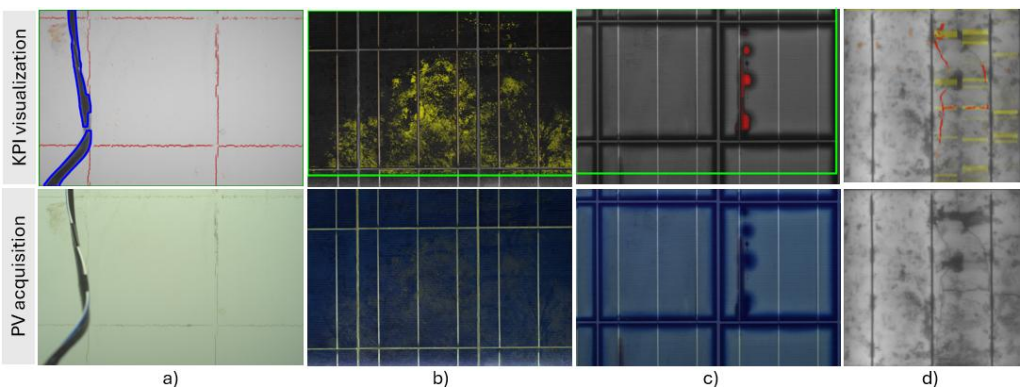


Abb. 2: Beispielergebnisse der KPIs (oben) und entsprechende PV-Aufnahme-Eingaben (unten). a) Rückseite mit erkannten Rissen und unterbrochenem Kabel. b) Vorderseitenaufnahme mit korrodierten Zellen. c) UV-Aufnahme mit sichtbaren „Schneckenspuren“. d) Segmentierte EL-Zellaufnahme mit Unterbrechungen und dunkleren horizontalen Streifen.

Die optische Inspektion in WattsOK zeigt, wie stark Sensorik, Beleuchtung, Datenvorverarbeitung und Algorithmik ineinandergreifen. Aus multimodalen Bilddaten werden nach Vorverarbeitung und Segmentierung defektbezogene KPIs extrahiert. In der aktuellen Klassifikationspipeline werden 83 KPIs pro Bildakquisition beschrieben: 30 für die Frontseite inklusive UV und Durchlicht, 26 für die Rückseite und 27 für die Elektrolumineszenzantwort (Brosch & Ginner, 2026). Diese KPIs beschreiben unter anderem Backsheet-Risse, Brandstellen, Delamination, Korrosion, Snail Tracks oder EL-Defekte durch Pixelanteile, Objektanzahlen, Scores, Intensitäts- und Farbwerte sowie Confidence-Werte (s. Abb. 2).

Methodisch eignet sich WattsOK, um unterschiedliche Auswerteansätze innerhalb einer Pipeline zu vergleichen: maßgeschneiderte KPIs liefern nachvollziehbare, auf Expertenwissen basierende Zwischenresultate, während KI-basierte Merkmale allgemeine Bildinformation automatisch aus den Bilddaten ableiten. Erste Experimente auf einem Entwicklungsdatensatz mit 26 polykristallinen Modulen und 6.610 gelabelten Bildern zeigen Klassifikationsgenauigkeiten über 95 %; einzelne Varianten erreichen auf diesem Entwicklungsdatensatz 99,47 % bzw. 100 % (Ebner, et al., AI & Robotics for the Reuse of Used PV Modules, 2026). Diese Werte sind als Machbarkeitsnachweis zu verstehen; für die industrielle Übertragbarkeit sind größere und diversere Datensätze erforderlich.

4 FALLBEISPIEL REUSETEX: AUFNAHME UND ANNOTATION FÜR TEXTILE SORTIERUNG

Während PV-Module technische, weitgehend starre Objekte darstellen, zeigt ReUseTex die Herausforderungen deformierbarer, biegeschlaffer und stark heterogener Konsumgüter. Ziel des Projekts ist die Sortierung gebrauchter Textilien in ReUse- und Recyclingpfade anhand von Qualität, Kleidungsart, Material und Zustand. Form-, Farb- und Materialvielfalt, Faltenwurf, variable Lage und schwer sichtbare Defekte machen die manuelle Sortierung zu einem Engpass für textile Kreislaufwirtschaft (Eckert, ReUseTex - interne Projektpräsentation, 2026).

In ReUseTex liegt der AIT-HVS-Beitrag vor allem in der bildgebenden und datenbezogenen Pipeline: statisches und Inline-Bildaufnahmesetup, Auswahl und Bewertung von Kamera-, Objektiv- und Beleuchtungskombinationen sowie ein anwendungsspezifisches Aufnahme- und Annotationstool. Die physische Materialbereitstellung und Prozessintegration erfolgt im Projektverbund mit Projektpartnern. Entscheidend für die KI-Entwicklung ist, dass daraus reproduzierbare, gut gelabelte und für Modelle nutzbare Bilddaten entstehen (s. Abb. 3).

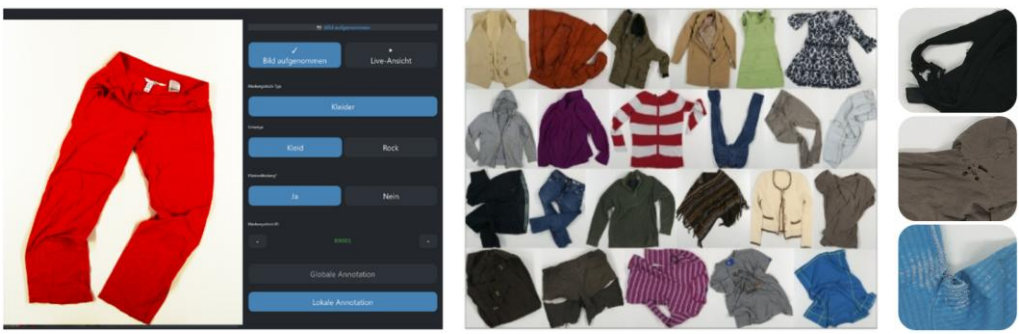


Abb. 3: ReUseTex-Beispiel für Aufnahme und Annotation gebrauchter Textilien. Links: Acquisition- und Annotationstool. Mitte: Beispiele aufgenommener Textilien. Rechts: Beispiele annotierter Textildefekte.

Das Beispiel unterstreicht die Bedeutung von Datenmenge, Annotationsqualität und Softwaretools. Bis zum aktuellen Zeitpunkt wurden ca. 4.000 Kleidungsstücke und etwa 20.000 Annotationen erstellt. Neben Kleidungs- und Defektklassen werden auch Markenlabels erfasst; gleichzeitig treten natürliche Klassenungleichgewichte, seltene Defekte, kleine Defektregionen und eine große Variation der Bildkomplexität auf (Kirillova & Possegger, 2026). Die Aufnahme- und Annotationsstrategie zeigt, dass KI im Recycling bereits vor dem eigentlichen Modelltraining beginnt.

5 SORTIERBEISPIEL: MÜNZEN, METALLISCHE KLEINTEILE UND PHOTOMETRIC STEREO

Als drittes Beispiel dient eine gemeinsam mit einem Industriepartner untersuchte Sortieraufgabe für metallische Kleinteile. Ziel ist die Rückgewinnung von Münzen aus einer Restfraktion. Bei metallischen Objekten können Farbe und Form allein für eine robuste Klassifikation unzureichend sein, insbesondere wenn Oberflächen verschmutzt, reflektierend oder geometrisch ähnlich sind. Daher wurde ergänzend die Einbeziehung von Photometric-Stereo-Daten untersucht. Dazu wurden Oberflächenrelief und 2,5D-Normaleninformation nutzbar gemacht (Eckert & Ginner, Münzsortierung in der Recyclingindustrie mittels Photometric Stereo, 2025).

Die Pipeline umfasst Bildaufnahme, Bildvorverarbeitung mit Hintergrundentfernung, Photometric-Stereo-Verarbeitung, Nachverarbeitung und Klassifikation (s. Abb. 4). Neben einem 2D-Albedobild entstehen Gradienten- bzw. Normalenbilder als zusätzliche Merkmalsquelle. Die Photometric-Stereo-Variante erreichte mit ca. 400 Trainingsbeispielen einen F1-Wert von 97,50 %; zwei

Lichtdirektionen enthielten bereits ausreichend Information für diese Klassifikationsaufgabe. Der Einsatz von vier Lichtrichtungen führte in diesem Datensatz entgegen der ursprünglichen Erwartung zu keiner weiteren Verbesserung. Das Beispiel zeigt, dass selbst für eine binäre Klassifikationsaufgabe mehrere Aufnahme- und Auswertevarianten sinnvoll untersucht und verglichen werden können.

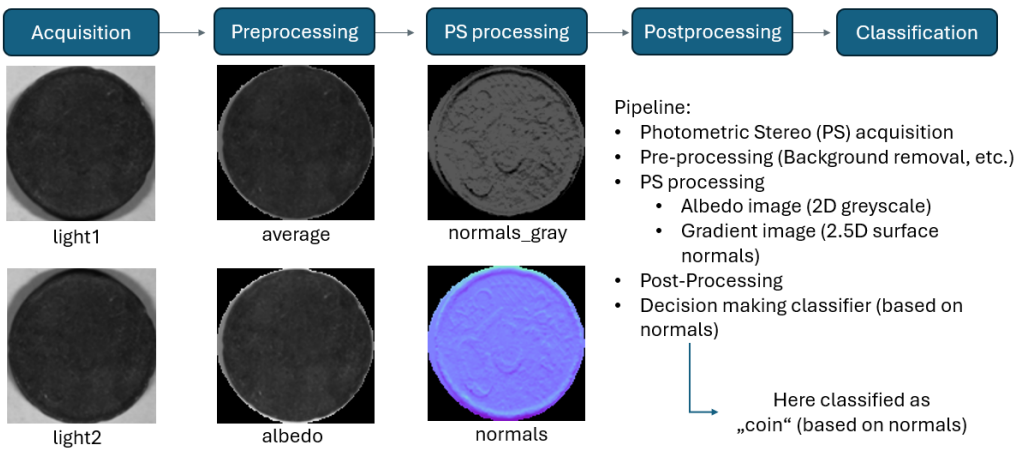


Abb. 4: Prozess-Pipeline für die Sortierung metallischer Kleinteile mittels Photometric Stereo. Aus unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen werden Albedo- und Normalenbilder berechnet und für die Klassifikation genutzt.

6 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die hier dargestellten Beispiele unterscheiden sich deutlich: PV-Module sind großflächige technische Produkte, Textilien sind deformierbare Konsumgüter, metallische Kleinteile erfordern oft zusätzliche Oberflächeninformation. Gemeinsam ist allen Beispielen jedoch, dass die Leistungsfähigkeit der KI nicht isoliert aus dem Modell entsteht. Entscheidend ist das Zusammenspiel aus Aufnahmedesign, Datenqualität, Annotation, Vorverarbeitung, Merkmalsextraktion, Datenfusion und Klassifikation. Die Pipeline muss deshalb an Materialstrom, Anlage, Datensituation und Zielentscheidung angepasst werden.

Für industrielle Recyclinganwendungen ergeben sich mehrere Lessons Learned: Hardware und Algorithmik sollten gemeinsam entwickelt werden, da Beleuchtung und Geometrie bestimmen, welche Information in den Bilddaten verfügbar ist und später klassifiziert werden kann. Die physische Erzeugung großer Datenmengen ist eine eigene verfahrenstechnische und logistische Aufgabe. Annotation ist ein technischer Kernbaustein, weil Annotationsdefinitionen und Klassenverteilungen die Modellgrenzen vorgeben. Erklärbare KPIs bleiben trotz leistungsfähiger KI-Modelle wichtig, wenn ReUse-/Recycle-Entscheidungen nachvollziehbar sein sollen. Schließlich müssen alle Komponenten in reale Prozesse integrierbar sein, etwa hinsichtlich Taktzeit, Robustheit, Schnittstellen und Wartbarkeit.

Die Beispiele zeigen damit weniger eine universelle Standardlösung als eine anwendungsspezifische Komplexität entlang der gesamten Vision-Pipeline. In Projektverbünden liegt der material- und anlagentechnische Zugang zu großen Datenmengen häufig bei Prozess- und Projektpartnern. AIT HVS kann insbesondere dort beitragen, wo aus real erzeugten Daten robuste, reproduzierbare und auswertbare Bilddatenpipelines entstehen müssen: bei Sensor- und Beleuchtungsauswahl, Aufnahmetools, anwendungsspezifischer Annotation, klassischer und KI-basierter Bildverarbeitung, Merkmalsextraktion, Datenfusion, Klassifikation und taskspezifischer Algorithmik.

Diese Arbeit und die dargestellten Ergebnisse wurde zum Teil über die FFG-Forschungsprojekte WattsOK? und ReUseTex ermöglicht. Wir danken der Binder+Co AG für die Erlaubnis, ausgewählte Ergebnisse des Sortierprojekts zu präsentieren.

LITERATURVERZEICHNIS

Brosch, N., & Ginner, L. (2026). *WattsOK? - Interne Präsentation.* Wien, Österreich: AIT.

Ebner, R., Kubicek, B., Brosch, N., Ginner, L., Prueller, S., Schauppenlehner, S., . . . Bouvier-Schwarz, T. (2026). *AI & Robotics for the Reuse of Used PV Modules.* Wien, Österreich.

Ebner, R., Kubicek, B., Brosch, N., Ginner, L., Ramachandran, G., Hendrichovsky, F., . . . Bouvier-Schwarz, T. (2026). *KI & Robotik für die Wiederverwendung gebrauchter PV-Module.* Bad Staffelstein, Deutschland: PV-Symposium 2026.

Eckert, A. (2026). *High Performance Vision Systems im Recyclingbereich.* Wien, Österreich.

Eckert, A. (2026). *ReUseTex - interne Projektpräsentation.* Wien, Österreich: AIT.

Eckert, A., & Ginner, L. (2025). *Münzsortierung in der Recyclingindustrie mittels Photometric Stereo.* Graz, Österreich: AIT.

Kirillova, N., & Possegger, H. (2026). *Visual Garment Defect Detection - Projektmeeting.* Graz, Österreich: TU Graz.

KONTAKT

Alexander Eckert
alexander.eckert@ait.ac.at
T +43 50550-3187 | M +43 664 78050898
Scientist
High-Performance Vision Systems
Center for Vision, Automation & Control
AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Giefinggasse 4 | 1210 Vienna | Austria
www.ait.ac.at

Digitaler Zwilling für modulare Sortieranlagen: Partikelbasierte Optimierung für die Verwertung von Elektro(nik)-Altgeräten

Malte Vogelgesang[1], Alice do Carmo Precci Lopes[2,3], Emanuel Ionescu[4] & Liselotte Schebek[5]

[1)] Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS, Digitalisierung der Ressourcen, Alzenau, Deutschland

[2)] Hochschule Darmstadt, Fachgebiet Digitalisierung in der Recyclingtechnologie, Darmstadt, Deutschland

[3)] European University of Technology (EUt+), The European Sustainability Science Laboratory (ESSLab+), Darmstadt, Deutschland

[4)] Technische Universität Wien, Institut für Chemische Technologien und Analytik, Wien, Österreich

[5)] Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR, Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft, Darmstadt, Deutschland

KURZFASSUNG: Die zunehmende Heterogenität von Elektro(nik)-Altgeräten (EAG) erfordert flexibel anpassbare Sortierprozesse, deren Komplexität konventionelle Optimierungsansätze übersteigt. Diese Arbeit stellt einen partikelbasierten digitalen Zwilling einer modularen EAG-Sortieranlage im Pilotmaßstab vor. Mittels statistischer Versuchsplanung wurden Machine-Learning-Modelle trainiert, die das Austragsverhalten einzelner Partikel in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften und der Maschineneinstellungen für sechs Sortiereinheiten vorhersagen. Kombiniert in einer Fließschemasimulation mit entropiebasierter Optimierung identifiziert der digitale Zwilling automatisiert optimierte Prozessketten und Einstellungen für gegebene Inputströme. Die experimentelle Validierung mit einer unbekannten Probe bestätigt, dass der digitale Zwilling effektive Konfigurationen erkennt, bei einer Abweichung der Massenanteile von 1,6 Prozentpunkten im Median. Im nächsten Schritt wird der Ansatz auf Schredderleichtfraktionen für das chemische Recycling übertragen.

1 EINLEITUNG

Elektro(nik)-Altgeräte (EAG) stellen aufgrund ihrer heterogenen Zusammensetzungen und wechselnder Produktdesigns hohe Anforderungen an die mechanische Aufbereitung. Modulare Sortieranlagen (Wolf, Colledani, Gershwin, & Gutowski, 2013) ermöglichen eine flexible Anpassung an spezifische Inputströme, doch ihre Komplexität übersteigt konventionelle Optimierungsansätze. Digitale Zwillinge können hier ansetzen, um Prozessabläufe virtuell zu simulieren und zu optimieren.

Der Austrag von EAG-Partikeln hängt stark von der Wechselwirkung zwischen Maschineneinstellungen und Partikeleigenschaften ab, die je nach Quelle und Zerkleinerung hochvariabel sind. Bestehende Modellierungsansätze weisen in der Berücksichtigung dieser Einflüsse Lücken auf: Transferkoeffizienten arbeiten mit festen Kennwerten ohne Bezug zu Partikeleigenschaften oder Einstellungen. DEM-CFD-Simulationen (Bauer, et al., 2023) sind zu rechenintensiv für anlagenweite Optimierung. Machine-Learning-Ansätze auf Stoffstromebene (Kroell, et al., 2024) bilden weder individuelles Partikelverhalten noch explizite Maschineneinstellungen ab.

Ziel dieser Arbeit, die im Rahmen des Vorhabens Circonomy-Hub CCT ARCHEM (gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi)) entstand und als Preprint unter (Vogelgesang, Lopes, Ionescu, & Schebek, 2026) veröffentlicht wurde, ist die Entwicklung und Validierung eines partikelbasierten digitalen Zwillings einer modularen EAG-Sortieranlage im Pilotmaßstab. Der digitale Zwilling kombiniert Machine-Learning-Modelle einzelner Sortieraggregate mit einer Fließschemasimulation und entropiebasierter Optimierung (Shannon, 1948), um für gegebene Inputströme automatisiert optimierte Sortierkaskaden und Maschineneinstellungen zu identifizieren.

2 METHODIK

Die entwickelte Methodik folgt drei Hauptschritten (Abb. 1): (1) Entwicklung von Machine-Learning-Modellen auf Partikelebene für individuelle Sortiereinheiten aus DoE-basierten Sortierversuchen, (2) Integration der Modelle in eine modulare Fließschemasimulation mit entropiebasierter Optimierung von Prozessketten und Maschineneinstellungen, sowie (3) Validierung des digitalen Zwillings durch Umsetzung optimierter Konfigurationen an einer bisher unbekannten Probe auf der Pilotanlage. Das physische und digitale System sind über eine sensorbasierte Stoffstromcharakterisierung verbunden, die auf Partikelebene Materialklasse, Geometrie, Farbe und Masse erfasst und den bidirektionalen Datenaustausch zwischen Sortieranlage und digitalem Zwilling ermöglicht (Vogelgesang, et al., 2025).

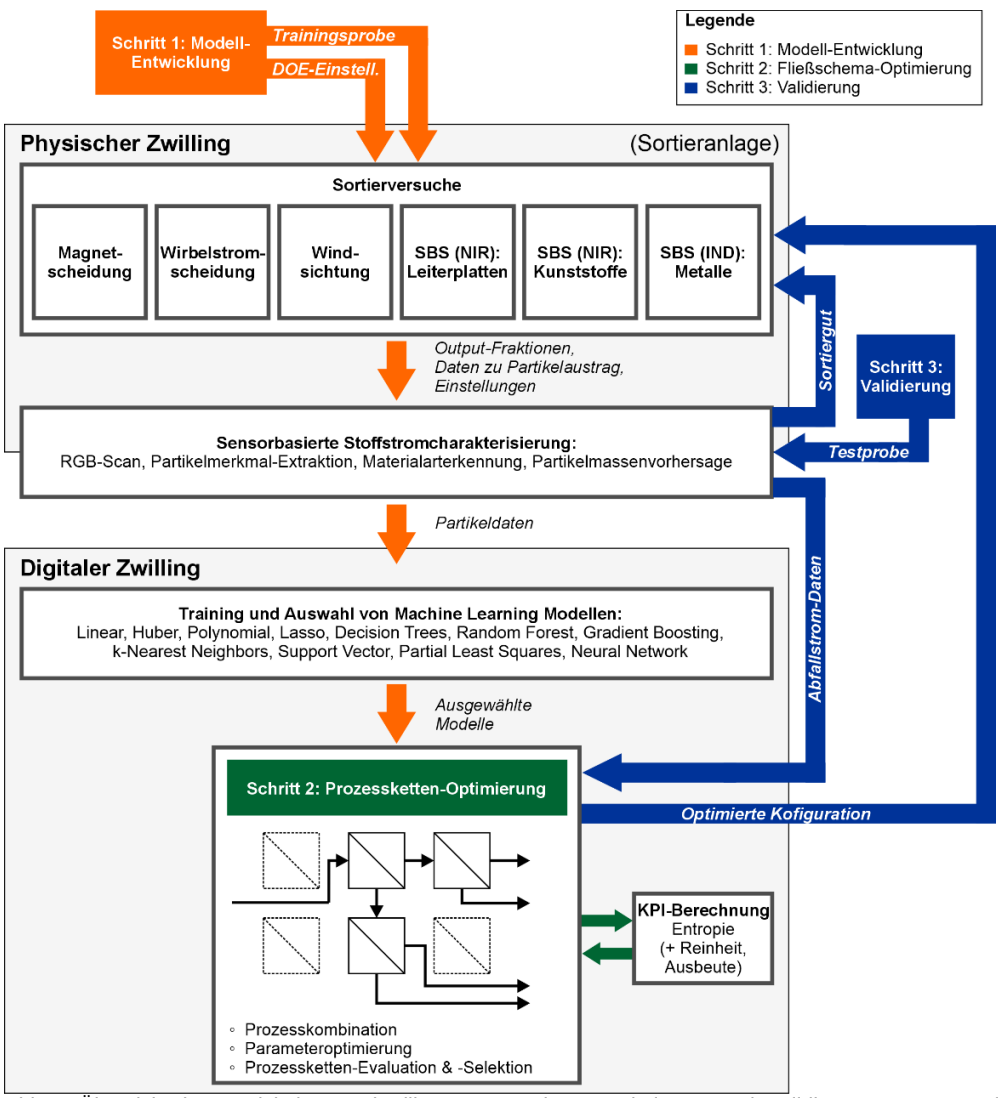


Abb. 1: Übersicht der entwickelten Methodik zur Prozesskettenoptimierung und -validierung. DOE = Design of Experiments; IND = Induktivsensor; KPI = Key Performance Indicator; NIR = Nahinfrarotsensor; SBS = Sensorbasierte Sortierung (übersetzt von (Vogelgesang, Lopes, Ionescu, & Schebek, 2026)).

2.1 Modellentwicklung

Die modulare Pilotanlage am Fraunhofer IWKS (Alzenau) umfasst einen Magnettrommelscheider (MS), einen Wirbelstromscheider (WS), einen Zickzack-Windsichter (WiS) und eine sensorbasierte Sortiermaschine (SBS), die in drei Modi betrieben wird: induktive Metalldetektion (SBS Metall), NIR-basierte Leiterplattensortierung (SBS LP) und NIR-basierte Kunststoffsortierung (SBS KS). Daraus resultieren sechs modellierte Sortiereinheiten (Abb. 2). Alle Aggregate sind einzeln betreibbar, beliebig kombinierbar und jeder Sortierschritt erzeugt zwei Fraktionen „Eject“ und „Pass“.

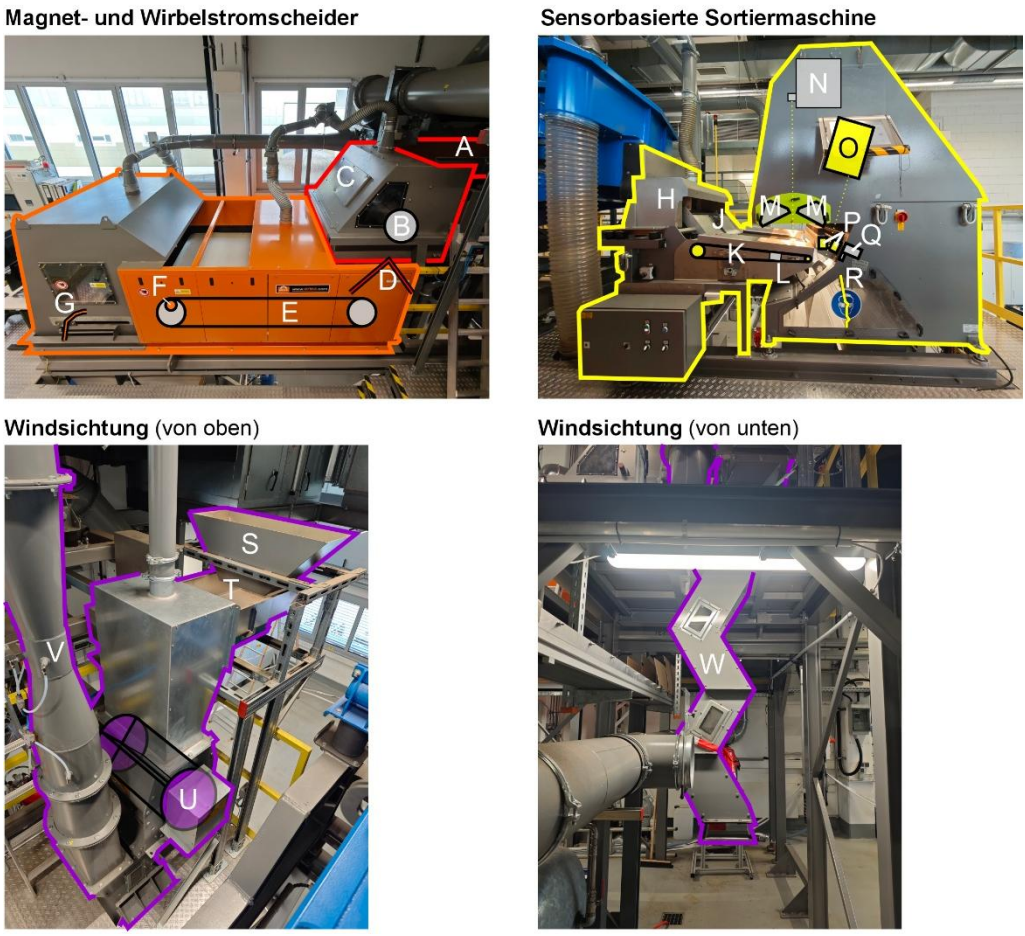


Abb. 2: Untersuchte Sortieraggregate. Komponenten: A. Vibrationsförderer, B. Magnettrommel, C. Wartungsklappe, D. Trennscheitel, E. Förderband, F. Magnetrotor, G. Trennscheitel. H. Vibrationsförderer, J. Rutsche, K. Förderband, L. Induktivsensor, M. Halogenbeleuchtung für NIR-Sensor, N. NIR-Sensor, O. RGB-Zeilenkameras, P. LED-Beleuchtung, Q. Druckluftaustrag, R. Trennscheitel. S. Trichter, T. Vibrationsförderer, U. Zellradschleuse, V. Austrag der Leichtfraktion mit Venturidüse, W. Zickzack-Schacht mit Austrag für Schwerfraktion. (verändert von (Vogelgesang, Lopes, Ionescu, & Schebek, 2026)).

Als Versuchsmaterial diente geschredderter Elektroschrott der Korngröße 12,5 mm - 50 mm in vier Materialklassen: Eisenmetalle, Nichteisenmetalle, Leiterplatten und Kunststoffe (Abb. 3). Schwer detektierbare Partikel (schwarze Kunststoffe, lackierte Metalle) wurden entfernt, um die Qualität der automatisierten Auswertung sicherzustellen. Für die Modellentwicklung wurde eine

Trainingsprobe (8,0 kg) und für die Validierung eine separate Testprobe (2,0 kg) zusammengestellt, deren Zusammensetzung typischen EAG-Strömen entspricht (Vogelgesang, et al., 2025).

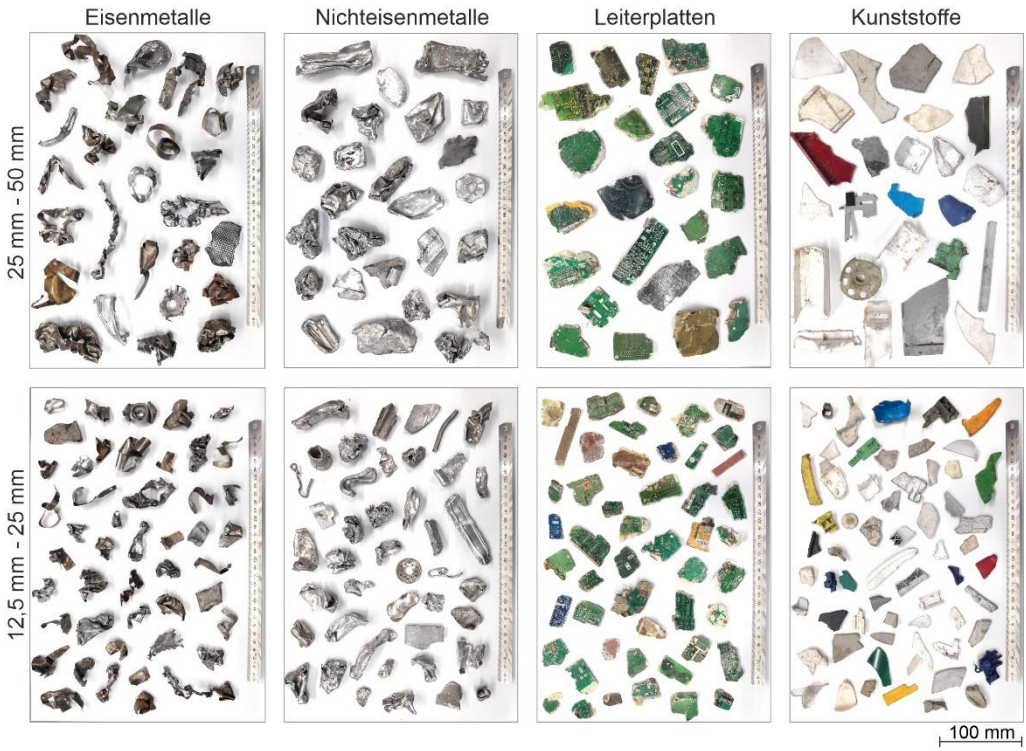


Abb. 3: Exemplarische zufällige Auswahl von Partikeln der untersuchten Materialfraktionen und Partikelgrößenbereiche (übersetzt und Orientierung verändert von (Vogelgesang, et al., 2025)).

Mittels statistischer Versuchsplanung (DoE) wurden je Sortiereinheit 6 - 30 Versuche durchgeführt, in denen die Maschineneinstellungen systematisch variiert wurden. Nach jedem Versuch wurden beide Output-Fraktionen mittels RGB auf dem SBS-Aggregat gescannt und KI-basiert auf Partikelebene charakterisiert (Vogelgesang, et al., 2025). Die resultierenden Partikeldaten wurden mit dem jeweiligen Austragsstatus und den Maschineneinstellungen zu individuellen Datensätzen je Sortiereinheit kombiniert.

Für jede Sortiereinheit wurden Regressionsmodelle trainiert, die für jedes Partikel eine Austragswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit seiner Eigenschaften (Materialart, 53 Geometrie- und 13 Farbdeskriptoren, vorhergesagte Masse) und der Maschineneinstellungen vorhersagen. Hierfür wurden verschiedene Modellfamilien untersucht und anhand eines klassenbalancierten, massegewichteten mittleren absoluten Fehlers ($MAE_{CB,MW}$) auf Partikelebene sowie des mittleren Fehlers der Austragsmassenanteile ($MAE_{ej,share}$) auf Versuchsebene bewertet. Aufgrund ihrer Robustheit, guten Gesamtperformance und vertretbaren Rechenzeiten wurden Random-Forest-Modelle ausgewählt.

2.2 Fließschemasimulation und Optimierung

Die trainierten Random-Forest-Modelle wurden dann in einer partikelbasierten Fließschemasimulation kombiniert. Darin wird der Partikeldatensatz eines charakterisierten Inputstroms

schrittweise durch Sortiereinheiten geleitet: Das jeweilige Modell prognostiziert für jedes Partikel eine Austragswahrscheinlichkeit, anhand derer seine Masse anteilig auf Eject- und Pass-Strom aufgeteilt wird. Durch Verkettung mehrerer Schritte entsteht ein Baum aus Ausgangsströmen.

Als Optimierungsziel dient ein auf der Shannon-Entropie (Shannon, 1948) basierender Score ($Score_H$), der die Materialtrennung über alle Ausgangsströme quantifiziert (Gl. 1). Ein $Score_H$ von 0 entspricht vollständiger Trennung, ein $Score_H$ von 1 vollständiger Durchmischung.

$$Score_H = \sum_{s=1}^{S} w_s \, H_s^{\text{norm}} = \sum_{s=1}^{S} \left(\frac{M_s}{M_{\text{total}}}\right) \left(\frac{-\sum_{c=1}^{K} p_{s,c} \, \log_2(p_{s,c})}{\log_2(K)}\right) \quad (1)$$

Dabei ist S die Anzahl der Ausgangsströme, K die Anzahl der Materialklassen, M_s die Masse in Strom s und $p_{s,c}$ der Massenanteil der Klasse c in Strom s.

Für einen gegebenen Inputstrom werden systematisch alle Prozessketten bis zu drei Schritten generiert (1158 Sequenzen bei sechs Sortiereinheiten). Pro Schritt werden die Maschineneinstellungen mittels Differential-Evolution-Algorithmus hinsichtlich des lokalen $Score_H$ optimiert. Abschließend werden die Sequenzen anhand des Gesamt-$Score_H$ eingestuft.

2.3 Validierung

Zur Validierung wurde die dem digitalen Zwilling bisher unbekannte Testprobe wie zuvor die sortierte Trainingsprobe automatisiert charakterisiert und ihr Partikeldatensatz in die Fließschema-Optimierung eingespeist. Aus der Liste optimierter Sequenzen wurden drei ausgewählt, die alle untersuchten Technologien mindestens einmal abdecken und verschiedene vorhergesagte Entropieniveaus repräsentieren. Diese Sequenzen wurden mit den optimierten Maschineneinstellungen auf der Pilotanlage prozessiert und die resultierenden Fraktionen manuell sowie automatisiert analysiert. Die gemessenen Zusammensetzungen, Reinheiten und Ausbeuten wurden den Vorhersagen des digitalen Zwillings gegenübergestellt. Anschließend wurden die Daten der identisch prozessierten Trainingsprobe genutzt, um die Modelle zu aktualisieren, was einen vollständigen Zyklus des bidirektionalen Datenaustauschs demonstriert.

3 ERGEBNISSE

Die trainierten Random-Forest-Modelle zeigten für alle sechs Sortiereinheiten geringe Fehler sowohl auf Partikel- als auch auf Versuchsebene ($MAE_{CB,MW}$ = 0,04 - 0,17; $MAE_{ej,share}$ = 0,00 - 0,01). Die Magnetscheidung zeigt geringe Parametersensitivität bei gleichbleibend hoher Trennleistung, der Wirbelstromscheider reagiert vorwiegend auf Trennscheitelposition und -winkel, und die Windsichtung weist ein stark nichtlineares Verhalten beim Volumenstrom auf.

Die Fließschemasimulation identifizierte Kombinationen aus Magnetscheidung, Wirbelstromscheidung und Nahinfrarot-basierter Leiterplattensortierung als beste Prozessketten. Sequenzen mit Windsichtung erreichten eine wesentlich weniger scharfe Trennung der Materialien.

Zur Validierung wurden drei optimierte Prozessketten mit der unbekannten Testprobe auf der Pilotanlage prozessiert. Der digitale Zwilling prognostizierte in allen drei Fällen konservativ, d. h. die experimentell erreichte Separation übertraf die Vorhersage (z.B. Sequenz 1: $Score_{H,sim}$ = 0,213 vs. $Score_{H,exp}$ = 0,117). Die absoluten Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Massenanteilen je Material und Fraktion betrugen über alle drei Sequenzen hinweg im Median 1,6 Prozentpunkte und im Mittel 3,3 Prozentpunkte. Die größten Abweichungen traten bei der Windsichtung auf, wo das Random-Forest-Modell zwischen spärlich beprobten Einstellungen schlecht interpoliert. Die in der Validierung verwendeten Einstellungen wurden anschließend

ebenfalls mit der Trainingsprobe durchgeführt und die Daten für ein Update der Modelle verwendet, was die Vorhersagegenauigkeit auch für die nicht im Training verwendete Testprobe weiter verbesserte. Dies demonstriert die Fähigkeit des digitalen Zwillings zum Weiterlernen und zugleich die wesentliche Eigenschaft des bidirektionalen Datenaustauschs zwischen physischem und digitalem Zwilling.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die dargestellte Arbeit demonstriert, dass ein partikelbasierter digitaler Zwilling die Auslegung und Optimierung mehrstufiger EAG-Sortierkaskaden wirksam unterstützen kann. Der neuartige Ansatz aus Machine-Learning-Modellen auf Partikelebene mit expliziter Integration von Maschineneinstellungen und entropiebasierter Fließschemaoptimierung wurde erstmals für die Abfallsortierung demonstriert und validiert. Der digitale Zwilling identifiziert effektive Prozesskonfigurationen, um perspektivisch als Entscheidungsgrundlage für die Anlagensteuerung eingesetzt zu werden.

Die größten Abweichungen in der Vorhersage waren auf nicht ausreichend beprobte, nichtlineare Parameterbereiche und systematische Fehler in der automatisierten Partikelcharakterisierung zurückzuführen. Insgesamt bietet eine Verbesserung der Trainingsdatenqualität und -dichte beim gezeigten Stand des digitalen Zwillings ein größeres Potenzial für die Erhöhung der Genauigkeit als eine Erhöhung der Modellkomplexität.

Im nächsten Schritt wird der digitale Zwilling auf Schredderleichtfraktionen (SLF) aus der kombinierten EAG- und Altfahrzeugverwertung übertragen. Ziel ist die Bereitstellung einer für das chemische Recycling optimierten Kunststofffraktion, in der Heteroatom-haltige Störstoffe (Cl aus PVC, N aus PA/ABS, O aus PET/POM) abgetrennt werden, um die Qualität der erzeugten Pyrolyseöle zu verbessern. Hierfür wird das Prozessportfolio um eine Röntgenfluoreszenz-basierte sowie eine KI-gestützte RGB-basierte Sortierung erweitert. Die modulare Architektur des digitalen Zwillings ermöglicht dabei das Hinzufügen neuer Sortiereinheiten ohne vollständiges Neutraining des Gesamtsystems.

LITERATURVERZEICHNIS

Bauer, A., Maier, G., Reith-Braun, M., Kruggel-Emden, H., Pfaff, F., Gruna, R., . . . Längle, T. (2023). Benchmarking a DEM-CFD Model of an Optical Belt Sorter by Experimental Comparison. *Chemie Ingenieur Technik*. doi:10.1002/cite.202200124

Kroell, N., Maghmoumi, A., Dietl, T., Chen, X., Küppers, B., Scherling, T., . . . Greiff, K. (2024). Towards digital twins of waste sorting plants: Developing data-driven process models of industrial-scale sensor-based sorting units by combining machine learning with near-infrared-based process monitoring. *Resources, Conservation and Recycling*. doi:10.1016/j.resconrec.2023.107257

Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*. doi:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

Vogelgesang, M., Kaczmarek, V., Lopes, A. d., Li, C., Ionescu, E., & Schebek, L. (2025). Automated material flow characterization of WEEE in sorting plants using deep learning and regression models on RGB data. *Waste management*. doi:10.1016/j.wasman.2025.114904

Vogelgesang, M., Lopes, A., Ionescu, E., & Schebek, L. (2026). Digital Twin for Modular Sorting Plants: Machine Learning-based Particle-level Flowsheet Simulation for WEEE. *SSRN (preprint)*. doi:10.2139/ssrn.6750910

Wolf, M. I., Colledani, M., Gershwin, S. B., & Gutowski, T. G. (2013). A Network Flow Model for the Performance Evaluation and Design of Material Separation Systems For Recycling. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. doi:10.1109/TASE.2012.2203594

Objektbasierte Sortierung von Alttextilien nach Produktkategorien mittels KI-gestützter Modelle im Technikumsmaßstab

Hannah Weber[1], Gerald Koinig[1], Verena Schmid[1], Felix Scheidl[1], Thomas Fink[2] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] REDWAVE, Kompetenzcenter der BT-Systems GmbH, Eggersdorf bei Graz, Österreich

KURZFASSUNG: In Anbetracht steigender Textilabfallmengen sowie der EU-weiten Einführung der getrennten Sammlung von Alttextilien stoßen bestehende Sortier- und Verwertungswege zunehmend an ihre Kapazitätsgrenzen. Die derzeit überwiegend eingesetzte manuelle Sortierung ist personal-, kosten- und zeitintensiv, für die Verarbeitung großer Alttextilmengen nur eingeschränkt skalierbar und angesichts des geringen wirtschaftlichen Werts von Alttextilien häufig nicht wirtschaftlich. In diesem Zusammenhang untersucht der vorliegende Beitrag den Einsatz KI-gestützter Objekterkennungsmodelle zur automatisierten Klassifizierung von Alttextilien in definierte Produktkategorien. Hierfür wurde auf Basis eines Post-Consumer-Altkleidermixes aus österreichischen Sammelsystemen ein repräsentativer Bilddatensatz von Erwachsenenbekleidung erstellt. Auf Grundlage dieses Datensatzes wurden ein Single-Stage- sowie ein transformerbasiertes Objekterkennungsmodell trainiert und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit verglichen. Die leistungsfähigsten Sortiermodelle wurden anschließend im Technikumsmaßstab validiert und hinsichtlich ihrer Eignung für den praktischen Einsatz bewertet.

1 EINLEITUNG

Aufgrund ihrer vielfältigen Eigenschaften sind Textilien ein essenzieller Bestandteil des täglichen Lebens. Sie finden nicht nur als Bekleidung oder Schutzausrüstung Anwendung, sondern kommen auch im Möbel- und Bauwesen sowie in zahlreichen technischen und medizinischen Bereichen zum Einsatz (Tischberger-Aldrian et al. 2024). Die globale Produktion von Textilfasern hat sich seit dem Jahr 2000 mehr als verdoppelt und stieg von 58 Mio. t auf 132 Mio. t im Jahr 2024 (Textile Exchange 2025; Centobelli et al. 2022). Parallel zum Anstieg der Faserproduktion erhöhte sich der jährliche Pro-Kopf-Konsum von Textilien von 17 kg im Jahr 2019 auf 19 kg im Jahr 2022 (Europäisches Parlament 2025). Der steigende Konsum sowie der Trend zu Fast Fashion, der durch niedrige Preise, Massenproduktion und kurze Produktlebenszyklen gekennzeichnet ist, führen zu erheblichen sozialen und ökologischen Herausforderungen (Sahimaa et al. 2023). Die globale Menge des jährlich anfallenden Textilabfalls beträgt derzeit etwa 92 Mio. t und wird Prognosen zufolge bis 2050 auf über 150 Mio. t ansteigen (Shamsuzzaman et al. 2025). Innerhalb der Europäischen Union fallen jährlich rund 5 Mio. t Altkleider und Schuhe an. Dies entspricht einem Pro-Kopf-Abfallaufkommen von etwa 12 kg pro Jahr (Europäische Kommission 2023). Darüber hinaus ist die Modeindustrie für 8–10 % der globalen CO_2-Emissionen verantwortlich, wobei dieser Anteil ohne wirksame Gegenmaßnahmen bis 2050 auf 26 % ansteigen könnte (Niinimäki et al. 2020; Hinkka et al. 2023; Appolloni et al. 2023). Weltweit werden rund 75 % der anfallenden Textilabfälle deponiert, etwa 25 % wiederverwendet, während weniger als 1 % zu neuer Bekleidung recycelt wird (Juanga-Labayen et al. 2022).

Angesichts der steigenden Abfallmengen stoßen bestehende Sammel-, Sortier- und Verwertungssysteme zunehmend an ihre Kapazitätsgrenzen (Feldbaumer et al., 2023). Die derzeit vorherrschende manuelle Sortierung ist für die Verarbeitung großer Materialmengen nur eingeschränkt skalierbar und erfordert einen hohen personellen, finanziellen sowie zeitlichen Aufwand. Darüber hinaus erweist sie sich in Anbetracht des geringen wirtschaftlichen Werts vieler Alttextilien häufig als unwirtschaftlich. Des Weiteren sind Beschäftigte häufig körperlich belastenden

Arbeitsbedingungen und potenziellen gesundheitlichen Risiken ausgesetzt (Poulsen et al. 1995; Halvorsen et al. 2025; Tischberger-Aldrian et al. 2024).

Neben der manuellen Sortierung zählt die Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) zu den etablierten Verfahren der materialbasierten Sortierung von Alttextilien. Insbesondere die Kombination mit hyperspektraler Bildgebung und Deep Learning ermöglicht die gemeinsame Analyse spektraler und räumlicher Informationen und erhöht die Genauigkeit der Identifikation und Klassifikation unterschiedlicher Fasertypen. Die zuverlässige Materialerkennung wird jedoch durch die hohe Heterogenität textiler Abfallströme erschwert. Komplexe Fasermischungen, textile Ausrüstungen und Beschichtungen, Farbstoffe, Kontaminationen, Feuchtigkeit sowie weitere Post-Consumer-Einflüsse führen zu einer erhöhten Variabilität der spektralen Signaturen und erschweren dadurch die Identifikation der Materialzusammensetzung. Zudem erschweren dunkle, insbesondere schwarze, sowie dünne und mehrschichtige Textilien die Identifikation der Zusammensetzung. Darüber hinaus stoßen NIRS-Systeme bei der Erfassung produktbezogener Merkmale, wie Produkttyp, Zustand und Design, an ihre Grenzen (Cura et al. 2021; Du et al. 2022; Riba et al. 2020; Gorla et al. 2026; Becker et al. 2024; Peterson und Kurouski 2023).

Die Entwicklung automatisierter, sensorgestützter Sortieranlagen, die der hohen Komplexität textiler Abfallströme gerecht werden, ist daher von großer Bedeutung. Neben einem hohen Durchsatz müssen automatisierte Sortiersysteme Stoffströme mit hoher Reinheit und gleichbleibender Qualität gewährleisten. Die Anforderungen an diese Stoffströme unterscheiden sich jedoch je nach anschließendem Verwertungsweg. Für das Recycling stehen insbesondere materialbezogene Eigenschaften wie die chemische Zusammensetzung, Farbmerkmale sowie der Anteil an Störstoffen (z. B. Elastan oder Accessoires etc.) im Vordergrund. Für die Wiederverwendung sind hingegen der Zustand sowie marken- oder produktspezifische Merkmale entscheidend.

Kamerabasierte Systeme in Kombination mit Künstlicher Intelligenz (KI) bieten eine vielversprechende und kosteneffiziente Möglichkeit zur automatisierten Sortierung von Alttextilien für anforderungsspezifische Sortierstrategien im Recycling und in der Wiederverwendung. Im Gegensatz zu materialbasierten Sensorsystemen ermöglichen sie die Erfassung produktbezogener Merkmale (z. B. Produktkategorie, Zustand, Marke) und können somit zusätzliche Informationen für den Sortierprozess bereitstellen. Computer Vision kann somit als objektbasierte, komplementäre Technologie zu materialbasierten Sensorsystemen wie der NIRS eingesetzt werden, um eine produktspezifische Vorsortierung zu ermöglichen. Darüber hinaus kann eine solche Vorsortierung zu Stoffströmen führen, die hinsichtlich ihrer Materialzusammensetzung homogener sind. Beispielsweise weisen Jeans typischerweise einen hohen Baumwollanteil auf, während Sportbekleidung häufig aus synthetischen Fasern, beispielsweise Polyester-Elastan-Mischungen, besteht. Gleichzeitig können komplexere Produkttypen wie Jacken oder Schuhe aufgrund ihrer Mehrschichtstrukturen sowie zusätzlicher Materialien und Komponenten (z. B. Leder, Metallteile, Accessoires etc.) frühzeitig separiert und geeigneten Recyclingrouten zugeführt werden.

Basierend auf diesen Überlegungen widmet sich der vorliegende Beitrag der Entwicklung und Evaluierung KI-gestützter Objekterkennungsmodelle für die automatisierte Sortierung von Post-Consumer-Textilien in definierte Produktkategorien. Hierfür wurde ein Erwachsenenbekleidungsdatensatz auf Basis eines repräsentativen Altkleidermixes aus österreichischen Sammelsystemen erstellt und annotiert. Anschließend wurden die beiden Objekterkennungsarchitekturen YOLO11n und RT-DETR-L trainiert und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit sowohl anhand Offline-Evaluierungsmetriken als auch im Rahmen einer experimentellen Inline-Validierung an einem Sortierstand im Technikumsmaßstab untersucht.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Probenmaterial, Datengenerierung und Annotation

Obwohl im Textilbereich zahlreiche Fashion Datensätze verfügbar sind, existieren nur wenige Datensätze, die abfalltypische Merkmale sowie realitätsnahe Förderbandszenarien berücksichtigen. Für die Entwicklung robuster Sortierprozesse ist deren Berücksichtigung jedoch unabdingbar. Als Probenmaterial dienten rund 2,5 t Alttextilien aus der getrennten Sammlung österreichischer Sammelsysteme. Das Probenmaterial wurde keiner Vorbehandlung unterzogen, um einen repräsentativen Altkleidermix abzubilden. Anschließend wurde das Probenmaterial in Erwachsenen- und Kinderbekleidung unterteilt und getrennt kategorisiert, um eine systematische Erfassung aller Kategorien sowie zwei unabhängige Datensätze sicherzustellen. Da der vorliegende Beitrag ausschließlich den Datensatz der Erwachsenenbekleidung zum Training des Sortiermodells verwendet, wird auf den Datensatz der Kinderbekleidung nicht näher eingegangen. Der Datensatz der Erwachsenenbekleidung umfasst 35 Produktkategorien aus unterschiedlichen Bekleidungsgruppen, darunter Oberteile (z. B. Pullover, Hemden, Blusen, Jacken etc.), Unterteile (z. B. Jeans, Stoffhosen, Sporthosen, Röcke etc.), weitere Textilklassen (z. B. Kleider, Jumpsuits, Heimtextilien etc.) sowie Accessoires wie Taschen, Rucksäcke, Schals, Gürtel und Schuhe (Abb. *1*). Die Datenerfassung erfolgte im Digital Waste Research Lab der Montanuniversität Leoben mithilfe eines von (Koinig et al. 2026) entwickelten Sensorstands, bestehend aus einem Förderband und einer industriellen RGB-Kamera. Um realitätsnahe Bedingungen einer industriellen Sortieranlage zu imitieren, wurden die Textilien in geordneter, gefalteter, verknäuelter sowie überlappender Anordnung auf das Förderband aufgegeben. Der generierte Datensatz umfasst 65.329 Aufnahmen und bildete die Grundlage für das Training des KI-basierten Sortiermodells.

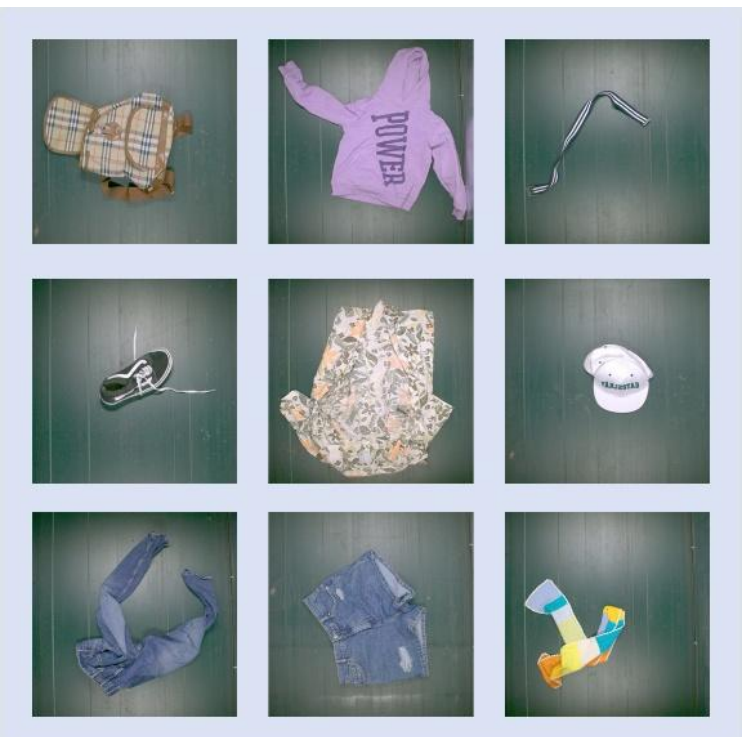


Abb. 1: Beispielhafte Produktkategorien des Erwachsenenbekleidungsdatensatzes mit unterschiedlichen Textilanordnungen auf dem Förderband.

Anschließend wurde der Datensatz mithilfe eines semi-automatischen Annotationstools AVAW CVAT (Version 1.0.0), das von Koinig et al. 2024 am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft entwickelt wurde, annotiert. Das Tool ermöglicht sowohl die Verwendung untrainierter als auch vortrainierter Objekterkennungsmodelle. Durch iterative Trainingszyklen und die manuelle Korrektur der Bounding Boxes konnte die Genauigkeit der Annotationen kontinuierlich verbessert und der ansonsten sehr zeitaufwendige Labelling Prozess deutlich beschleunigt werden. Dadurch können zukünftige Textildatensätze wesentlich effizienter annotiert sowie der manuelle Aufwand deutlich reduziert werden.

2.2 Modelltraining

Zur Untersuchung der Eignung unterschiedlicher Objekterkennungsarchitekturen wurden das CNN-basierte Modell YOLO11n sowie die transformerbasierte RT-DETR-L Architektur herangezogen (Jocher et al., 2026; Zhao et al., 2023). Zunächst wurde ein YOLO11n Basismodell trainiert. Anschließend umfasste die Modellentwicklung die Optimierung ausgewählter Hyperparameter sowie eine Bereinigung des Datensatzes und einen Ausgleich der Klassenverteilung, um den Auswirkungen der Klassenimbalance infolge der Heterogenität des Probenmaterials entgegenzuwirken. Das Training erfolgte auf einem AMD Ryzen 9 9950X mit einer NVIDIA RTX 5090 GPU unter Verwendung eines Datensplits von 70 % Training, 20 % Validierung und 10 % Test. Anschließend wurde die Leistungsfähigkeit der Modelle anhand eines unabhängigen Testdatensatzes mittels Offline Evaluierungsmetriken bewertet. Die beiden leistungsstärksten Modelle wurden anschließend für die Validierung im Technikumsmaßstab herangezogen.

3 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Offline Evaluierung zeigen, dass die Datenaufbereitung einen größeren Einfluss auf die Modellleistung hatte als die alleinige Optimierung der Hyperparameter. Die Bereinigung des Datensatzes, insbesondere die Entfernung unvollständig erfasster Textilien infolge der Datenakquise auf dem bewegten Förderband, führte zunächst zu einer deutlichen Verringerung der Modelleistung. Dies kann auf die reduzierte Anzahl an Trainingsdaten sowie die dadurch verstärkte Klassenimbalance zurückgeführt werden. Die anschließende Anpassung der Klassenverteilung und die Reduzierung der Klassenimbalance führten hingegen zu einer deutlichen Verbesserung der Modellperformance. Letztendlich erzielte das auf Standardparametern trainierte transformerbasierte Basismodell die höchste Offline Performance und wurde gemeinsam mit dem leistungsstärksten YOLO11n Modell für die Inline Validierung ausgewählt. Die Inline Evaluierung im Technikumsmaßstab mit einem NVIDIA Jetson Orin 64 GB bestätigte die Ergebnisse der Offline Evaluierung. Das transformerbasierte RT-DETR-L Modell erzielte gegenüber YOLO11n in den meisten Produktkategorien höhere Ausbringungsraten. Darüber hinaus erwies es sich unter realitätsnahen Sortierbedingungen als robuster.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ergebnisse bestätigen die höhere Eignung der transformerbasierten Architektur für die automatisierte Sortierung von Alttextilien. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass insbesondere eindeutig unterscheidbare Produktkategorien mit hohen Ausbringungsraten automatisiert separiert werden können. Somit zeigt Computer Vision großes Potenzial als komplementäre Sortiertechnologie zur produktspezifischen Vorsortierung von Alttextilien.

DANKSAGUNG

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des CD-Labors „Design und Bewertung einer effizienten, recyclingbasierten Kreislaufwirtschaft“. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das österreichische Bundesministerium für Wirtschaft, Energie und Tourismus, die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Weiters bedanken wir uns sehr herzlich für die finanzielle und inhaltliche Unterstützung durch unsere Unternehmenspartner, in alphabetischer Reihenfolge: Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoff Recycling Austria AG, Linz Service GmbH, OMV Downstream GmbH, and Wien Energie GmbH.

LITERATURVERZEICHNIS

Appolloni, Andrea; Centi, Gabriele; Yang, Nan (2023): Promoting carbon circularity for a sustainable and resilience fashion industry. In: *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 39, S. 100719. DOI: 10.1016/j.cogsc.2022.100719.

Becker, Amrei; Datko, Annika; Kroell, Nils; Küppers, Bastian; Greiff, Kathrin; Gries, Thomas (2024): Near-infrared-based sortability of polyester-containing textile waste. In: *Resources, Conservation and Recycling* 206, S. 107577. DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107577.

Centobelli, Piera; Abbate, Stefano; Nadeem, Simon Peter; Garza-Reyes, Jose Arturo (2022): Slowing the fast fashion industry: An all-round perspective. In: *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 38, S. 100684. DOI: 10.1016/j.cogsc.2022.100684.

Cura, Kirsti; Rintala, Niko; Kamppuri, Taina; Saarimäki, Eetta; Heikkilä, Pirjo (2021): Textile Recognition and Sorting for Recycling at an Automated Line Using Near Infrared Spectroscopy. In: *Recycling* 6 (1), S. 11. DOI: 10.3390/recycling6010011.

Du, Wenqian; Zheng, Jiahui; Li, Wenxia; Liu, Zhengdong; Wang, Huaping; Han, Xi (2022): Efficient Recognition and Automatic Sorting Technology of Waste Textiles Based on Online Near infrared Spectroscopy and Convolutional Neural Network. In: *Resources, Conservation and Recycling* 180, S. 106157. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106157.

Europäische Kommission (2023): Sustainable and Circular Textiles by 2030. Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter https://trungtamwto.vn/file/23494/factsheet--sustainable-and-circular-textiles-by-2030.pdf, zuletzt aktualisiert am 20.07.2026.

Europäisches Parlament (2025): „Fast Fashion“: EU-Gesetze für einen nachhaltigeren Textilkonsum. Hg. v. Europäisches Parlament. Online verfügbar unter https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20201208STO93327/fast-fashion-eu-gesetze-fur-einen-nachhaltigeren-textilkonsum, zuletzt geprüft am 20.07.2026.

Feldbaumer, M.; Granzer-Sudra, K.; Ganglberger, E. (2023): Sekundärrohstoffe für die österreichische Textilindustrie. Kurzstudie mit Handlungsempfehlungen für die österreichische FTI-Politik. Hg. v. Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik (ÖGUT). Wien. Online verfügbar unter https://www.oegut.at/downloads/pdf/sekundaerrohstoffe-textilindustrie/schriftenreihe-2023-04-textilindustrie.pdf, zuletzt aktualisiert am 20.07.2026.

Gorla, Giulia; Nielsen, Frederik; Montague, Patrick Bowen; Kösegi, Nicole; Amigo, José Manuel (2026): Challenges and spectra interpretability in textile sorting: NIR hyperspectral images and chemometrics. In: *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy* 344 (Pt 1), S. 126665. DOI: 10.1016/j.saa.2025.126665.

Halvorsen, Torbjørn Seim; Tyapin, Ilya; Jha, Ajit (2025): Autonomous Textile Sorting Facility and Digital Twin Utilizing an AI-Reinforced Collaborative Robot. In: *Electronics* 14 (13), S. 2706. DOI: 10.3390/electronics14132706.

Hinkka, Ville; Aminoff, Anna; Palmgren, Rosa; Heikkilä, Pirjo; Harlin, Ali (2023): Investigating postponement and speculation approaches to the end-of-life textile supply chain. In: *Journal of Cleaner Production* 422, S. 138431. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138431.

Jocher, G., Qiu, J., Liu, M., Lyu, S., Akyon, F. C., & Kalfaoglu, M. E. (2026). *Ultralytics YOLO26: Unified Real-Time End-to-End Vision Models.* https://doi.org/10.48550/arXiv.2606.03748

Juanga-Labayen, Jeanger P.; Labayen, Ildefonso V.; Yuan, Qiuyan (2022): A Review on Textile Recycling Practices and Challenges. In: *Textiles* 2 (1), S. 174–188. DOI: 10.3390/textiles2010010.

Koinig, G.; Kuhn, N.; Fink, T.; Lorber, B.; Radmann, Y.; Martinelli, W. et al. (2026): Detection of copper-containing scrap in a post-shredder fraction with machine vision and artificial intelligence towards green-steel production. In: *Cleaner Engineering and Technology* 30, S. 101110. DOI: 10.1016/j.clet.2025.101110.

Koinig et al. (2024): AVAW CVAT (Version 1.0.0). Version Version 1.0.0. Online verfügbar unter https://github.com/AVAWLeoben/AVAW_CV-Waste, zuletzt geprüft am 27.07.2026.
Niinimäki, Kirsi; Peters, Greg; Dahlbo, Helena; Perry, Patsy; Rissanen, Timo; Gwilt, Alison (2020): The environmental price of fast fashion. In: *Nat Rev Earth Environ* 1 (4), S. 189–200. DOI: 10.1038/s43017-020-0039-9.
Peterson, Mackenzi; Kurouski, Dmitry (2023): Non-Destructive Identification of Dyes on Fabric Using Near-Infrared Raman Spectroscopy. In: *Molecules (Basel, Switzerland)* 28 (23). DOI: 10.3390/molecules28237864.
Poulsen, O. M.; Breum, N. O.; Ebbehøj, N.; Hansen, A. M.; Ivens, U. I.; van Lelieveld, D. et al. (1995): Sorting and recycling of domestic waste. Review of occupational health problems and their possible causes. In: *The Science of the total environment* 168 (1), S. 33–56. DOI: 10.1016/0048-9697(95)04521-2.
Riba, Jordi-Roger; Cantero, Rosa; Canals, Trini; Puig, Rita (2020): Circular economy of post-consumer textile waste: Classification through infrared spectroscopy. In: *Journal of Cleaner Production* 272, S. 123011. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123011.
Sahimaa, Olli; Miller, Elizabeth M.; Halme, Minna; Niinimäki, Kirsi; Tanner, Hannu; Mäkelä, Mikko et al. (2023): The only way to fix fast fashion is to end it. In: *Nat Rev Earth Environ* 4 (3), S. 137–138. DOI: 10.1038/s43017-023-00398-w.
Shamsuzzaman, Md.; Al. Mamun, Md. Abdullah; Hasan, H. M. Rakib Ul; Hassan, Ready; Zulkernine, Ayesha; Atik, Md. Atiqur Rahman; Islam, Mazed (2025): Fashion Circularity: Potential of Reusing and Recycling Remnant Fabric to Create Sustainable Products. In: *Sustainability* 17 (5), S. 2010. DOI: 10.3390/su17052010.
Textile Exchange (2025): Materials Market Report 2025. Global fibre production. Hg. v. Textile Exchange. Online verfügbar unter https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2025/, zuletzt aktualisiert am 20.07.2026.
Tischberger-Aldrian, Alexia; Stipanovic, Hana; Kuhn, Nikolai; Bäck, Tanja; Schwartz, Daniel; Koinig, Gerald (2024): Automatisierte Textilsortierung – Status quo, Herausforderungen und Perspektiven. In: *Österr Wasser- und Abfallw* 76 (1-2), S. 63–79. DOI: 10.1007/s00506-023-01004-5.
Zhao, Y., Lv, W., Xu, S., Wei, J., Wang, G., Dang, Q., Liu, Y., & Chen, J. (2023). *DETRs Beat YOLOs on Real-time Object Detection.* https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.08069

KONTAKT

Dipl.-Ing. Hannah Weber
E-Mail: hannah.weber@unileoben.ac.at
Tel.-Nr.: +43660 517 90 90
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben
Homepage: https://www.unileoben.ac.at/avaw/

KI-basiertes Röntgensortiersystem zur Detektion von Lithium-Ionen-Akkus im LVP-Abfallstrom – Aktuelle Erkenntnisse aus dem Testbetrieb

Johannes Leisner[1], Michael Kalb[1], Alexander Ennnen[1], Lara Jürgens[2] & Jochen Ebbbing[3]
[1)] Fraunhofer IIS, Entwicklungszentrum Röntgentechnik EZRT, Fürth, Deutschland
[2)] Lobbe Umweltservice GmbH & Co KG, Brilon, Deutschland
[3)] Lobbe Industrieservice GmbH & Co KG, Iserlohn, Deutschland

KURZFASSUNG: Lithium-Ionen-Batterien (LIB), die als Fehlwürfe in Siedlungsabfällen auftreten, stellen ein erhebliches Brandrisiko für die Abfall- und Recyclingwirtschaft dar (Nigl, 2020); Chacana-Olivares, 2025). Besonders betroffen sind Sortieranlagen für Leichtverpackungsabfälle (LVP), in denen LIB durch mechanische Beanspruchung beschädigt werden können. In der Folge wird die in den Akkumulatoren gespeicherte Energie innerhalb kurzer Zeit in Form von Wärme freigesetzt, wodurch LIB als potenzielle Zündquelle für Brände wirken. Vor diesem Hintergrund entwickelten im Forschungsprojekt K3I-Cycling ((GI), 2026) das Fraunhofer IIS und die Firma Lobbe ein Röntgensortiersystem, das LIB sowie Elektroaltgeräte mit verbauten LIB im LVP-Materialstrom mittels KI-gestützter Objekterkennung detektiert und gezielt aus dem Stoffstrom entfernt. Seit Juni 2025 befindet sich das System am Lobbe-Standort Iserlohn im Testbetrieb. Während der Testphase wurden kontinuierlich Röntgenbilddaten sowie die zugehörigen Sortierergebnisse erfasst. Die erzeugten Bilddaten wurden teilautomatisiert annotiert und für das Training des KI-Modells verwendet. Durch die kontinuierliche Optimierung des Detektionsmodells konnte im Testbetrieb eine Ausschleusungsquote von 92 % der eingebrachten LIB aus dem LVP-Materialstrom erreicht werden. Ein weiteres wesentliches Bewertungskriterium war die Minimierung des Anteils falsch-positiv ausgeschleuster Objekte. Hier konnte ein Anteil von 0,36 Massenprozent (Ma-%), bezogen auf den Anlageninput, erzielt werden.

1 PROTOTYP-XRT-SORTIERSYSTEMS ZUR DETEKTION UND AUSBRINGUNG VON LIB

1.1 Technische Auslegung des XRT-Sortiersystems

Das entwickelte System zur Detektion und Aussortierung von LIB basiert auf der sensorbasierten Sortierung (SBS) (Xiaozheng Chen, 2024) unter Verwendung eines Röntgentransmissionssensors (XRT). Gegenüber optischen Sensorsystemen bietet XRT den entscheidenden Vorteil, den Materialstrom zu durchdringen. Dadurch können auch überlagerte Objekte sowie Batterien im Inneren von Elektrogeräten detektiert werden, sodass keine vollständige Vereinzelung des Materials erforderlich ist. Bei der SBS wird der Materialstrom über ein Förderband durch den Sensorbereich transportiert und mittels Bildanalyse erfasst. Ein Rechnersystem identifiziert und klassifiziert relevante Objekte und übermittelt deren Position an ein nachgeschaltetes Ventilmodul. Dieses besteht aus quer zur Förderrichtung angeordneten Druckluftdüsen, die gezielt angesteuert werden, um erkannte LIB durch einen Druckluftimpuls aus dem Materialstrom auszuschleusen.

Konventionelle SBS-Anwendungen setzen in der Regel eine Monolage des Materials, eine definierte Korngröße sowie eine weitgehend konstante Materialzusammensetzung voraus. Diese Voraussetzungen sind bei Leichtverpackungsabfällen jedoch nicht gegeben, da das Sortiersystem zum Schutz der nachgeschalteten Sortieranlage unmittelbar nach dem Sacköffner oder Vorzerkleinerer installiert wird. Ziel ist die frühzeitige Entfernung von LIB, um das Brandrisiko entlang der gesamten Prozesskette zu minimieren. Hierfür muss das System heterogene Materialströme mit hoher Bandbelegung und Durchsätzen von bis zu 20 t/h verarbeiten können.

Aus diesen Anforderungen ergaben sich die wesentlichen Auslegungsparameter des Systems: eine Fördergeschwindigkeit von 2,5 m/s, eine aktive Sortierbreite von 1.500 mm, eine Durchlasshöhe von > 600 mm, eine Röntgenröhrenspannung von 160 kV, eine Sensorauflösung von 0,4 mm, ein Ventilraster von 12,5 mm sowie ein Gesamtgewicht von etwa 12,5 t.

1.2 Entwicklung und Evaluierung eines KI-basierten XRT-Objektdetektionsmodells

Für die Detektion von LIB wurde ein Objektdetektionsmodell entwickelt, das ausschließlich auf XRT basiert. Im Gegensatz zu konventionellen Ansätzen, die RGB-Bilddaten verwenden, ermöglicht dies die Detektion sowohl frei liegender LIB als auch von in Elektroaltgeräten verbauten Batterien. Als Detektionsarchitektur wurde YOLOv11 eingesetzt, da dieses Netzwerk eine hohe Detektionsgeschwindigkeit und Erkennungsgenauigkeit bietet (Khanam, 2025).

Zur Erstellung des Trainingsdatensatzes wurden unter praxisnahen Bedingungen mit dem entwickelten XRT-System insgesamt etwa 1,1 TB an XRT-Daten aufgenommen. Das Ausgangsmaterial umfasste rund zehn Gitterboxen mit Elektroaltgeräten sowie etwa 40 m³ LVP-abfälle. Die Annotation der Elektroaltgeräte erfolgte mithilfe eines teilautomatisierten Verfahrens auf Basis von Einzelaufnahmen, während die LVP-Daten aufgrund der heterogenen Materialzusammensetzung vollständig manuell annotiert wurden. Zur Erhöhung der Variabilität des Datensatzes wurde zusätzlich eine physikalisch konsistente Datenerweiterung durch die Kombination von LVP- und Elektroaltgeräteaufnahmen durchgeführt.

Der finale Datensatz umfasste 31.945 Röntgenbilder mit einer Auflösung von 1.920 × 800 Pixeln und insgesamt 24.579 annotierten Instanzen. Davon wurden 25.557 Bilder für das Training und 6.388 Bilder für die Validierung verwendet. Das Training des Modells erfolgte mit dem Ultralytics-Framework, einer Batchgröße von 16 sowie aktiviertem Early Stopping. Das leistungsfähigste Modell wurde nach 648 Epochen erreicht und für die weitere Evaluierung verwendet.

Die Evaluierung auf dem Validierungsdatensatz ergab eine hohe Detektionsleistung. Von insgesamt 4.908 annotierten Objekten wurden 4.867 korrekt erkannt, 41 Objekte nicht detektiert und 221 Falschdetektionen erzeugt. Daraus ergeben sich eine Precision von 95,66 %, ein Recall von 99,16 % sowie ein F1-Score von 97,38 %. Die Ergebnisse zeigen die hohe Leistungsfähigkeit des entwickelten XRT-basierten Objektdetektionsmodells für die zuverlässige Erkennung von LIB und batterieführenden Elektroaltgeräten in heterogenen Leichtverpackungsabfällen.

2 VALIDIERUNG DES SYSTEMS UNTER PRAXISBEDINGUNGEN

2.1 Aufbau der Versuchsanlage und Durchführung der Praxiserprobung

Im Juni 2025 wurde das Röntgensortiersystem an den Lobbe-Standort Iserlohn überführt, als eigenständige Einheit aufgebaut und in die Versuchsumgebung integriert. Die Erprobung erfolgte anschließend durch die Aufgabe von Materialströmen aus der bestehenden LVP-Sortieranlage, um die Leistungsfähigkeit des Systems unter praxisnahen Bedingungen zu bewerten.



1 → Materialaufgabe
2 → Austrag LVP – Zielfraktion
3 → Austrag Störstoffe und Beifang

Abb. 1: Versuchsaufbau

2.2 Evaluierung der Detektions- und Ausschleusungsleistung

Ziel des Testbetriebs war die Bestimmung des Aufkommens von LIB im LVP-Stoffstrom, die Ermittlung der Detektions- und Ausschleusungsleistung sowie die Quantifizierung des Anteils an LVP-Material, der systembedingt gemeinsam mit den detektierten Störstoffen ausgetragen wird.

Hierzu führten das Fraunhofer IIS und Lobbe im Sommer und Herbst 2025 im Rahmen einer ersten Testphase mehrere Versuche unter praxisnahen Betriebsbedingungen durch. Die ausgewählten LVP-Chargen aus der Sortieranlage wurden zunächst mittels Sacköffner aufbereitet, um die enthaltenen Verpackungen und Materialbestandteile freizulegen. Anschließend erfolgte die Aufgabe des Materials auf das Röntgensortiersystem. Das Volumen der einzelnen Versuchschargen betrug jeweils etwa 6 m³, entsprechend einer Masse von circa 1 t.

In dieser ersten Testphase wurden zwölf LVP-Chargen mit einer definierten Anzahl typischer, farblich markierter Elektroaltgeräte und LIB angereichert und anschließend verarbeitet. Die vom System detektierten und ausgeschleusten Objekte wurden separat aufgefangen und anschließend manuell analysiert. Zusätzlich wurde die Menge des gemeinsam mit den Störstoffen ausgetragenen LVP-Materials erfasst. Dieser Anteil ist insbesondere auf Materialüberdeckungen und die daraus resultierenden Unsicherheiten bei der Ausbringung zurückzuführen. Auf Basis der wiedergefundenen markierten Prüfobjekte wurden die Detektions- und Ausschleusungsquote des Systems bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Bereits in der ersten Testphase konnte eine Ausschleusungsquote von 92 % erreicht werden. Gleichzeitig lag der Anteil falsch-positiv ausgeschleuster Objekte mit 1,46 Ma.-% jedoch noch auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Als falsch-positive Objekte wurden alle ausgeschleusten Objekte definiert, die weder eine LIB noch ein Elektroaltgerät mit verbauter LIB enthielten. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde das Detektionsmodell weiterentwickelt. Der Schwerpunkt der Optimierung lag auf der verbesserten Unterscheidung zwischen Elektroaltgeräten mit und ohne integrierte LIB

sowie zwischen LIB und herkömmlichen Haushaltsbatterien. Ziel dieser Anpassung war die Reduzierung des Anteils falsch-positiver Detektionen und Ausschleusungen.

Nach Implementierung des angepassten KI-Modells wurde im März 2026 eine zweite Testphase durchgeführt. Der Versuchsablauf entsprach grundsätzlich dem Vorgehen der ersten Testphase, wobei zehn anstelle von zwölf Durchläufen untersucht wurden. Durch die Optimierung des KI-Modells konnte der Anteil falsch-positiv ausgeschleuster Objekte von 1,46 Ma.-% auf 0,36 Ma.-% reduziert werden. Die Ausschleusungsquote der Prüfobjekte blieb dabei auf einem vergleichbaren Niveau.

Als weiteres Ergebnis der Testphasen wurde der Massenanteil von LIB sowie Elektroaltgeräten mit verbauten LIB im LVP-Materialstrom bestimmt. Mit 0,30 Ma.-% in der ersten Testphase und 0,24 Ma.-% in der zweiten Testphase stellen diese Werte eine Stichprobe des tatsächlich enthaltenen LIB-Anteils im LVP-Strom dar. Aufgrund des begrenzten Stichprobenumfangs können die Ergebnisse nur eingeschränkt zur Quantifizierung des tatsächlichen LIB-Aufkommens in LVP-Materialströmen herangezogen werden. Sie liefern jedoch einen Hinweis auf die relevante Größenordnung des Vorkommens von LIB und batterieführenden Objekten in LVP-Abfällen.

Tab. 1: Gegenüberstellung der Ergebnisse der beiden Testphasen.

	Testphase 1	**Testphase 2**
Anteil LIB in LVP [Ma.-%]	0,3	0,24
Detektions- und Ausschleusungsquote [%]	90	92
Falsch-Positive Objekte (Beifang) [Ma.-%]	1,46	0.36
LIB pro t LVP [Stk.]	25	19

3 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungen zeigen, dass LVP-Materialströme mit 0,30 bzw. 0,24 Ma.-% einen relevanten Anteil an LIB und batterieführenden Elektroaltgeräten enthalten, von denen ein erhebliches Brandrisiko ausgeht. Zur Detektion und Ausschleusung dieser Störstoffe wurde ein XRT-basiertes Sortiersystem mit KI-gestützter Objekterkennung entwickelt. Das YOLOv11-basierte Modell erreichte eine Precision von 95,66 %, einen Recall von 99,16 % und einen F1-Score von 97,38 %. Die Praxiserprobung bestätigte eine Ausschleusungsquote von bis zu 92 %, während der Anteil falsch-positiver Ausschleusungen durch die KI-Optimierung von 1,46 auf 0,36 Ma.-% reduziert werden konnte. Die Ergebnisse bestätigen die Eignung des Systems zur zuverlässigen Entfernung von LIB aus LVP-Strömen und zur Reduzierung des Brandrisikos in Sortieranlagen.

LITERATURVERZEICHNIS

(GI), G. f. (2026). *K3I-Cycling*. Von K3I-Cycling: https://ki-hub-kunststoffverpackungen.de/ abgerufen

Chacana-Olivares, J. P. (2025). Lithium-ion battery recycling: a perspective on key challenges and opportunities. *npj Mater. Sustain*, S. 38.

Khanam, R. a. (2025). Yolov11: An Overview of the Key Architectural Enhancements. *Journal of Computer and Communications, Vol.13 No.3*.

Nigl T., Pomberger R. (2020). *Brandrisiko durch Lithium-Ionen-Batterie: Sind unsere Anlagen noch versicherbar?* Recycling und Sekundärrohstoffe. Bd. 13: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 482-494.

Xiaozheng Chen, N. K. (2024). Sensor-based sorting. In E. W. Christina Meskers, *Handbook of Recycling - Second Edition* (S. 145-159). Elsevier Inc.

Kick it, pick it: KI-gestützte Batterieausschleusung aus gemischten Siedlungsabfällen mit Kickereinheit und Robotik

Nina Nowak[1], Michael Autischer[2] & Thomas Nigl[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] SAMsoric GmbH, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Mit ihrer konstant wachsenden Präsenz im österreichischen Haushalt gehören leistungsstarke Batterien zu unserem Alltag. Wird die Batterie nach der Nutzung unsachgemäß entsorgt, kann aus einem praktischen Alltagsgegenstand rasch eine potenzielle Gefahr entstehen. Oft ist den Nutzern nicht bewusst, welche negativen Auswirkungen eine falsch entsorgte Batterie haben kann, da die Brandgefahr oft erst bei Beschädigungen oder durch einen Kurzschluss eintritt. Um das Wertschöpfungspotenzial der Batterie und der jeweiligen Abfallfraktion effizient nutzen zu können muss der Fehlwurf aus dem Abfall aussortiert werden. Im Rahmen des Projekts BaKIRoS (Batterie-Detektion und Ausschleusung mit künstlicher Intelligenz, Robotik und Sensorfusion) werden künstliche Intelligenz-Modelle und innovative Sensorik dazu verwendet, Batterie in gemischten Siedlungsabfällen zu erkennen und anschließend auszusortieren. Zum Ausschleusen der detektierten Batterien soll eine "Kicker"- Auswurfeinheit implementiert werden. Weiters wird das Potenzial von Robotern zur Aussortierung erforscht. Für die Detektion in Projekt BaKIRoS werden vorhandene KI-Modelle aus dem Projekt DeB-AT erweitert und an die fortan wachsende Diversität von Batterietypen angepasst.

1 EINLEITUNG

Innerhalb der letzten zehn Jahre ist die Anzahl sowie die Diversität von Batterien in Siedlungsabfällen bzw. in der Restmüllfraktion stark angestiegen. Damit verbunden ist auch die zunehmende Häufigkeit der Brandereignisse in Abfallaufbereitungs- und Recyclinganlagen (Grath et al. 2024). Diese Brandereignisse stellen nicht nur eine Gefahr für die Mitarbeiter und Bevölkerung dar, sondern auch für die Umwelt. Dvorak et al. 2026 zeigen anhand von aktuellen Sortierkampagnen, dass die Anzahl der Batterien in gemischten Siedlungsabfällen einen Wert von rund 70 Batterien pro Sammelfahr-zeug erreicht hat. Während der Verband österreichischer Entsorgungsbetriebe im August 2025 noch von drei Millionen Lithiumbatterien (LiB) im Restmüll spricht zeigen Dvorak et al. 2026, dass es sich inzwischen um rund 17 Millionen LiB im Restmüll handelt. Dieser starke Anstieg ist unter anderem auf die steigende Popularität von Ein- und Mehrweg-E-Zigaretten (E-Vapes) zurückzuführen (VOEB 2025). Trends bei batteriebetriebenen Geräten wie die E-Zigarette verdeutlichen somit, weshalb die Bilddatenbank für Batteriedetektion fortgehend einer Aktualisierung und Erweiterung bedarf.

2 ERWEITERUNG DES DATENSATZES

2.1 Aktuelle Datenbank

Aus dem Projekt DeB-AT (Detektion und Ausschleusung von Batterien aus gemischten Abfällen mittels Sensorik und künstlicher Intelligenz) konnten bereits über 15.000 Bildaufnahmen von 28 Batterieklassen erstellt werden (Grath et al. 2026). Basierend auf diesen Bildaufnahmen wurde eine Daten-bank mit Batterie- und Abfallaufnahmen sowie künstlich beimpfte Aufnahmen erstellt. Bei der Datenaufbereitung konnte die Perspektive durch Rotation und Spiegelung erweitert werden mit dem Ziel, die Robustheit des Trainingsmodells zu erhöhen (Grath et al. 2024; Grath et al. 2026). Trotz dieser Erweiterung stößt das Modell bei der Detektion von Batterien im frei-fallenden

Abfallstrom an seine Grenzen. Um diese Herausforderung zu überwinden, wird im Projekt BaKIRoS die Datenbank um Aufnahmen im freien Fall erweitert.

2.2 Bilddatengenerierung im freien Fall

Anhand eines Versuchsaufbaus im Digital Waste Research Lab (DWRL), in St. Michael in der Steiermark, schematisch dargestellt in Abb. 1, werden Auf-nahmen von frei fallenden Batterien mittels zwei gegenüberliegenden Flächenkameras der Firma Basler erstellt. Dabei werden die Batterien über ein langsam laufendes Steigförderband (Nr. 2 in Abb. 1) mit einer maximalen Geschwindigkeit von 1 m/s in den Fallturm befördert. Bei der Abwurfkante auf einer Höhe von ca. 3 m blickt eine Thermalkamera des Projektpartners SAMsoric (Nr. 3 in Abb. 1) auf die beförderten Batterien. Anhand dieser Thermalkamera kann im Falle einer Wärmeentwicklung rechtzeitig gehandelt werden. Das Alarmsystem umfasst eine Warnleuchte sowie eine kabel-lose Verbindung zum Unternehmen. Bei einer detektierten Temperatur ab 60 °C leuchtet entweder ein orangenes Licht (Warnung) oder ein rotes Licht (Alarm, ab 90 °C) auf. Nach einem freien Fall von mindestens 1,5 m werden die Partikel von den beiden Kameras erfasst. Am Boden des Fallturms ist ein gepolsterter Auffangbereich geplant, sodass es zu keiner mechanischen Beanspruchung der Batterien kommt. Nach Beendung des Versuchs werden die Batterien aus dem Auffangbereich von einer Person entfernt.

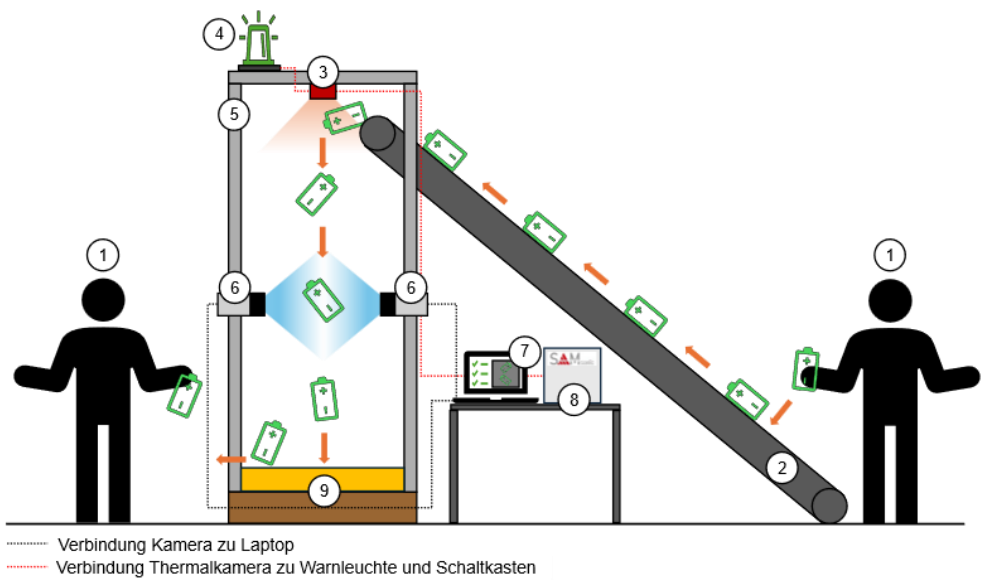


Abb. 1: Vorläufiger Versuchsaufbau für die Bildaufnahme von Batterien im freien Fall, 1: Person zur Aufgabe und Entnahme, 2: Steigförderband, 3: Thermalkamera von SAMsoric, 4: Warnleuchte der Thermalkamera, 5: Gerüst des Fallturms, 6: Flächenkamera von Basler, 7: Laptop mit Software, 8: Schaltkasten der Thermalkamera, 9: Auffangbereich

Ziel ist, in einem möglichst sicheren Arbeitsumfeld so effizient wie möglich eine große Bandbreite an diversen Batterien im freien Fall aufzunehmen. Zum Zeitpunkt der Einreichung steht außerdem offen, ob eine weitere Thermalkamera über dem Steigband von Vorteil wäre. Basierend auf den Erkenntnissen aus DeB-AT wird der Fallturm eingehaust und die Fallstrecke künstlich beleuchtet. Nach der Validierung der ersten Aufnahmen wird der Mehrwert verschiedener Hintergründe und diverser Beleuchtungsszenarien eruiert. Bei dem Hintergrund wird speziell darauf

geachtet, das Modell auf realitätsgetreue Bedingungen (Abfall, Verunreinigung, Staub etc.) zu trainieren, um die Robustheit zu stärken (Inácio et al. 2026).

2.3 Anwendung von künstlicher Intelligenz

Die Anwendung von künstlicher Intelligenz in der Abfallwirtschaft ist längst kein futuristisches Konzept mehr, wie es beispielsweise das Vorprojekt DeB-AT (2023-2025) und Weber et al. 2026 gezeigt haben. Für die Objekterkennung in BaKIRoS ist ein einstufiger deep learning-Algorithmus mit you-only-look-once-Methode (YOLO-Methode) geplant. Im Gegensatz zu anderen Methoden geschehen bei YOLO-Methoden Detektion und Klassifikation in einem Schritt. Vorteile des Algorithmus sind dabei eine hohe Effizienz ohne Verlust der Genauigkeit (Sapkota & Karkee 2025). Seit dem Markteintritt vor zehn Jahren hat sich die YOLO-Gruppe weiterentwickelt bis hin zu YOLO26, welches im Jahr 2025 erschienen ist und die Fokuspunkte Objekterkennung, sofortige Segmentierung und verbesserte Objektlokalisierung (oriented bounding boxes, OBB) vereint (Sapkota & Karkee 2025). In Projekt BaKIRoS sind eine Erweiterung der leistungsstarken Hardware sowie eine andere Herangehensweise an die Segmentierung und Annotierung geplant, da statt der open-source Anwendung CVAT (computer vision annotation tool) das lehrstuhleigene Programm CV-AVAW verwendet wird (Koinig & Lorber 2026, siehe u. a. Koinig et al. 2024). Es sollen verschiedene Detektionsalgorithmen (z. B. YOLO, Faster R-CNN, SAM) zur Identifikation von Batterien implementiert werden. Während Faster R-CNN (Faster region-based convolutional neural network), Nachfolger von Fast R-CNN, zwar langsamer agiert als der einstufige YOLO-Algorithmus zeichnet er sich durch eine höhere Detektions-genauigkeit aus (Acaro Chacón et al. 2025). Methoden aus der SAM-Kategorie (segment anything model) werden für die benutzerspezifisches, prompt-gesteuerte Segmentierung von Bildmaterial verwendet, wodurch Detektionsmodelle wie YOLO verbessert werden können (Acaro Chacón et al. 2025). Die Modelle werden auf annotierten Datensätzen trainiert. Zur Bewertung der geeigneten Detektionsmodelle werden Leistungskennzahlen wie die mittlere durchschnittliche Präzession (mAP) herangezogen. Mithilfe modellabhängiger Hyperparameter, beispielsweise Gewichtung oder Lernrate, liegt der Schwerpunkt anschließend auf der gezielten Algorithmusoptimierung. Unterstützt wird die Anwendung von künstlicher Intelligenz vom Lehrstuhl für Cyber-Physical-Systems (CPS) der Montanuniversität Leoben. Simultan zu den Aufnahmen im DWRL werden am CPS-Lehrstuhl ebenfalls Bilddaten im CPS-Technikum generiert und gegebenenfalls künstlich erweitert.

3 AUSSCHLEUSUNG MIT KICKEREINHEIT

Als Ausschleuseeinheit ist eine "Finger"- oder "Kicker"-Auswurfeinheit zum Ausschleusen der Batterien nach Detektion von Interesse. Stand der Technik ist hier das händische Aussortieren oder ein Magnetabscheider, wobei dabei die Detektion und Ausschleusung in einem Arbeitsschritt erfolgen (Windisch-Kern et al. 2021, Kroell et al. 2022). In der Abfallwirtschaft hat sich außerdem die Druckluftdüsenleiste zum "Ausschießen" von Partikel in Kombination mit Nahinfrarot (NIR)-Sensoren oder Farbzeilenkameras durchgesetzt (Gundupalli et al. 2016). "Kicker"-Auswurfeinheiten sind etablierte Ausschleusungsmechanismen im Landwirtschafts- und Lebensmittelbereich und werden beispielsweise für das Sortieren von Gemüse verwendet (TOMRA Food 2025). In Abb. 2 ist die Anwendung der TOMRA Sentinel II Sortiermaschine mit „Kicker“-Ausschleuseeinheit (Pfeile) in einer Kartoffelproduktion in Italien dargestellt (Colombo 2020; TOMRA Food 2025). Mit den etwaigen Anpassungen zeigt das Sortierprinzip großes Potenzial für die Batterieausschleusung.

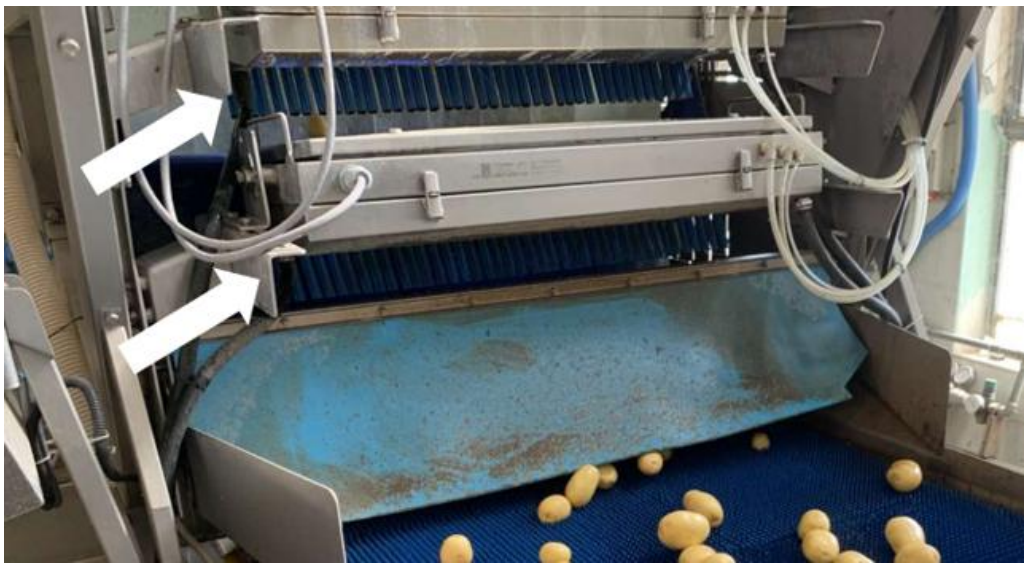


Abb. 2: Anwendung der TOMRA Food Sentinel II Sortiermaschine mit „Kicker“-Ausschleuseeinheit (Pfeile) für die Aussortierung von Kartoffel (Colombo 2020, erweitert)

Ein aktuelles Forschungsthema zur Batteriedetektion und -ausschleusung ist die Röntgentechnologie (Lobbe Holding GmbH & Co KG 2025; Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen 2026). Die Strahlungsquelle ist dabei auf ein Förderband mit diversen Abfällen gerichtet, während der Detektor die Aufnahmen erfasst und an ein KI-gestütztes Analysezentrum weiterleitet. Vorteile bei dem Einsatz von Röntgenstrahlung ist die schnelle Online-Analyse des Abfallstroms sowie eine höhere Eindringtiefe, was eine größere Bandbelegung ermöglicht (WeSort.AI GmbH 2026). Die Ausschleusung via „Kicker“-Auswurfeinheit bietet gegenüber der Röntgentechnologie eine Möglichkeit für einfacheres Retrofitting. Die praktische Anwendung im Technikumsmaßstab soll Erkenntnisse über das Potenzial für eine Integration in Anlagen der Abfallwirtschaft abbilden. Grundsätzlich haben sich zwei Positionen der Auswurfeinheit bei der Sortierung auf Förderbändern etabliert (siehe Abb. 3). In Position A befindet sich die Auswurfeinheit unterhalb der Abwurfkante und befördert Partikel, ähnlich wie eine Düsenleiste, stirnseitig vom Förderband in einen separaten Behälter oder auf ein separates Förder-band. Bei Position B liegt die Auswurfeinheit gegenüber der Abwurfkante. Die aussortierten Partikel werden dann unterhalb des Förderbands entweder gesammelt oder abtransportiert.

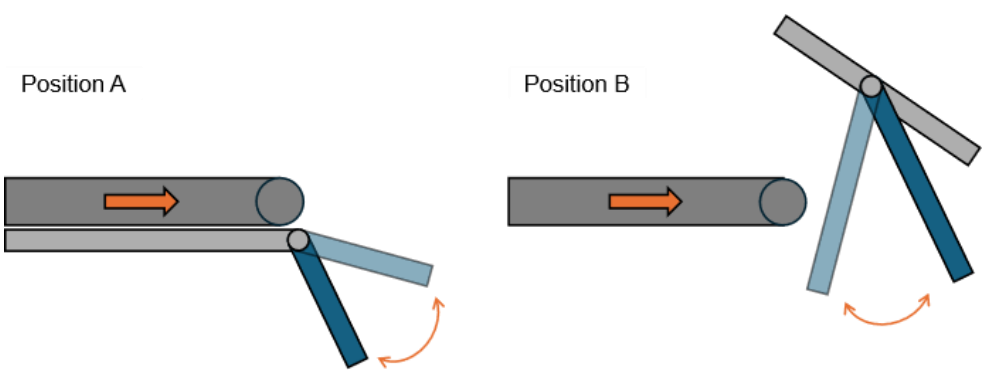


Abb. 3: Darstellung der häufigsten Positionen einer "Kicker"-Auswurfeinheit, unterhalb der Abwurfkante (Position A) oder gegenüberliegend der Abwurfkante (Position B)

Um die Vereinzelung im freien Fall nutzen zu können wird die „Kicker“-Einheit für einen freifallenden Abfallstrom konzipiert. In Kombination mit dem in Abschnitt 2.1 erwähnten Fallturm ist eine Implementierung der Ausschleuseeinheit wie in Abb. 4 dargestellt geplant. Hier gilt es, Fragestellungen wie Komponentenauslegung und Reaktionszeiten zu beantworten, um einen einsatzbereiten Demonstrator zu entwickeln.

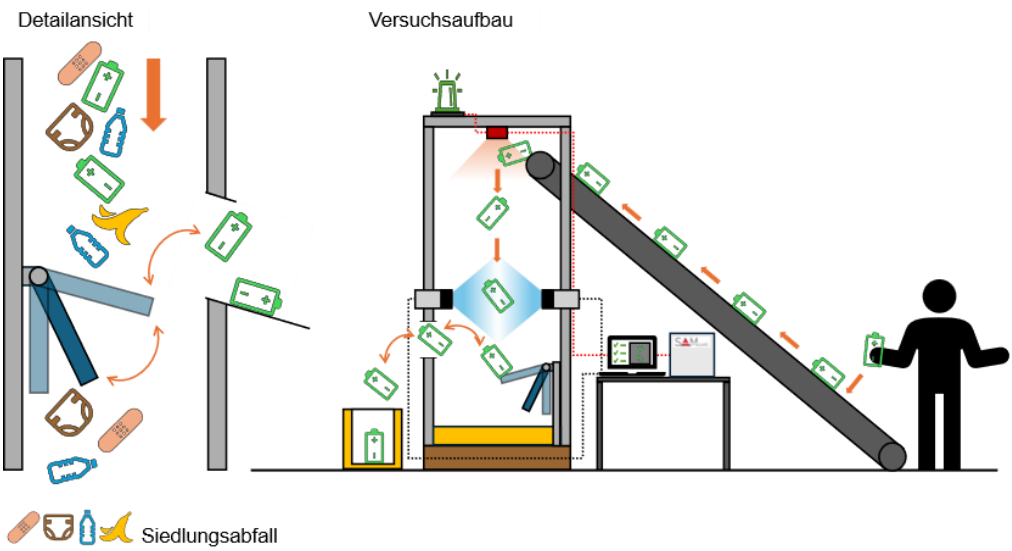


Abb. 4: Schematische Darstellung der Aussortierung von Batterien aus gemischten Siedlungsabfall nach der Vereinzelung im freien Fall, links: Detailansicht des Funktionsprinzips, rechts: Implementierung im Versuchsaufbau

4 AUSSCHLEUSUNG MIT ROBOTIK

4.1 Anwendungsbereich Abfallwirtschaft

In Bezug auf die Ausschleusung soll weiters ein neuer Weg in Richtung robotergestützte Sortierung eingeschlagen werden. Mit der fortschreitenden In-novation im Bereich Robotik öffnet sich hier ein Anwendungsbereich in der Batterieausschleusung. Handsortieren am Förderband ist eine körperliche Belastung, abgesehen von der im Abfallbereich allgegenwärtigen Staubbelastung. Betriebe beschäftigt bei der Handsortierung der Personalmangel sowie die fortan strenger werdenden Arbeitsschutzbestimmungen. Der Ein-satz von sensor- und KI-gestützten Roboter würde somit nicht nur die Reaktionszeiten bei der Sortierung verkürzen, sondern auch Arbeitskräfte entlasten. In der robotergestützten Sortierung kann zwischen zwei Herangehens-weisen unterschieden werden: Pick-and-Toss oder auch Pick-and-Throw (PnT) und Pick-and-Place (PnP) (Raptopoulos et al. 2020). Bei der PnT-Methode wird das angesteuerte Objekt von dem Greifer erfasst und in Richtung des Zielorts geworfen. Dies erfordert eine genaue Koordinateneingabe sowie eine schnelle Reaktionszeit (Turcato et al. 2025). Bei der PnP-Methode wird das erfasste Objekt vom Roboterarm präzise an einem Zielort abgesetzt (Shanthi & Hermans 2024). Beide Vorgehen finden Anwendung in der Abfallwirtschaft abhängig von den angesteuerten Objekten, allerdings zeichnet sich die Pick-and-Toss-Methode durch das schnellere Handeln aus (Raptopoulos et al. 2020). Pick-and-Place findet dafür Anwendung in Prozessen, wo der Arbeitsbereich räumlich begrenzt ist oder eine genaue Platzierung für weiterführende Schritte relevant ist (Shanthi & Hermans 2024).

4.2 Umsetzung für Batterieausschleusung

In Zusammenarbeit mit dem Cyber-Physical-Systems-Lehrstuhl ist grundlegende Forschung zur Implementierung, Geschwindigkeit und maximale Belastung einer Robotikeinheit geplant. Die Batterieausschleusung aus dem frei fallenden Abfallstrom kann beispielsweise durch die Nutzung der Vereinzelung und eines „Paddel"-Roboterarms umgesetzt werden (siehe Abb. 5). Ziele im Rahmen des Projekts BaKIRoS ist, Grundlagenforschung in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Effizienz und Umsetzung zu betreiben.

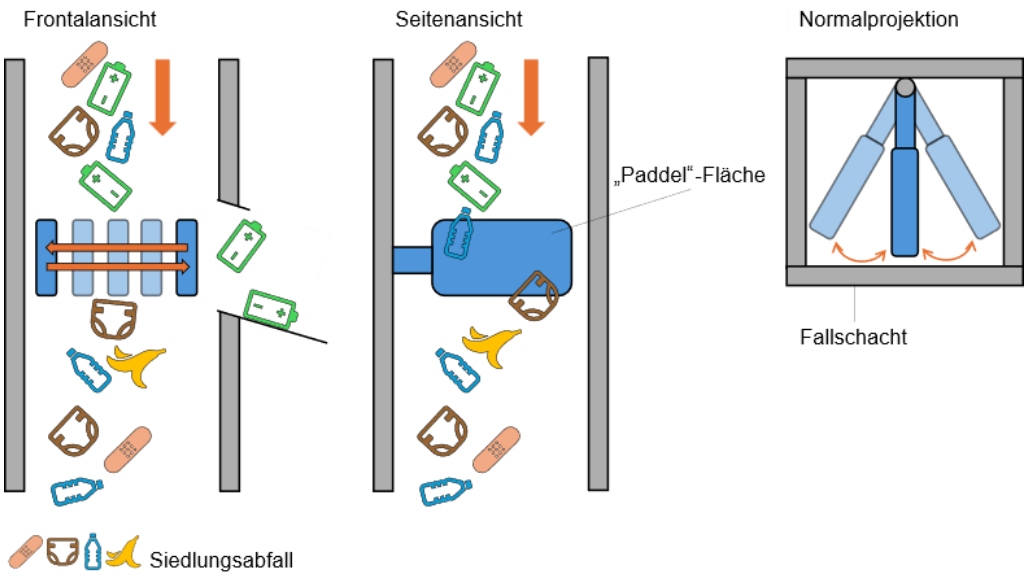


Abb. 5: Beispielhafte Implementierung eines „Paddel"-Roboterarms für die Ausschleusung von Batterien aus dem freifallenden Abfallstrom

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Montanuniversität Leoben forscht seit Jahren an Batterierecycling und -wertschöpfung, ausgehend vom Projekt LIBRES & LCA (2010-2014). Darauf aufbauend vertieften BAT-SAFE (2015-2019), AbER innovation (2019-2022) und zuletzt DeB-AT (2023–2025) die Themen Batteriedetektion, Ausschleusung aus gemischten Abfällen und Brandrisiko. Vor dem Hintergrund stark zunehmender Batterieanteile im Restmüll und steigender Brandereignisse adressiert das Folgeprojekt BaKIRoS (Batterie-Detektion und Ausschleusung mit künstlicher Intelligenz, Robotik und Sensorfusion) die KI-gestützte Er-kennung und Sortierung von Batterien. Projektpartner sind SAMsoric und der Lehrstuhl für Cyber-Physical-Systems. Bestehende Erfahrungen aus dem Feuerpräventionssystem fließen von Seiten des Projektpartners SAMsoric ein. Es wird die in DeB-AT aufgebaute Bilddatenbank um Aufnahmen frei fallender Batterien erweitert, um die Modellrobustheit im realen Abfallstrom zu erhöhen und den Anwendungsbereich auszuweiten. Dafür wird im Digital Waste Research Lab ein Fallturm mit zwei Flächenkameras und aktuell einer Thermalkamera betrieben, inklusive Einhausung, definierter Beleuchtung und gegebenenfalls variablen Hintergründen. Parallel erzeugt und augmentiert der CPS-Lehrstuhl zusätzliche Bilddaten im lehrstuhleigenen Technikum. Annotation und Segmentierung erfolgen mit dem Programm CV-AVAW. Für die Ausschleusung wird eine „Kicker"-Auswurfeinheit implementiert, die gegenüber der Röntgentechnik eine Möglichkeit für Retrofitting bietet. Ergänzend wird das Potenzial robotergestützter Sortierung untersucht, um Reaktionszeiten zu verkürzen und Personal körperlich zu entlasten. Ziel ist die praxisnahe Validierung von Detektions-, Ausschleus- und Robotiklösungen

bis zum Technikumsmaßstab. Die Ergebnisse sollen neue Anwendungen in der Abfallwirtschaft erschließen und das Wachstum der beteiligten Industriepartner unterstützen. Insgesamt sollen die Forschungsergebnisse die Sicherheit in Anlagen steigern, Brandrisiken minimieren und den Wertschöpfungskreislauf von Batterien in gemischten Siedlungsabfällen schließen.

FINANZIERUNG

Das Projekt BaKIRoS wird im Rahmen des kooperativen F&E-Calls zum Themenschwerpunkt Batterieforschung der steirischen Wirtschaftsfördergesellschaft (SFG) finanziert. Die Autoren bedanken sich bei der Fördergesellschaft und bei den Projektpartnern.

LITERATURVERZEICHNIS

Acaro Chacón, X. C., Lo Scudo, F., Cappuccino, G., & Dodaro, C. (2025, Mai 22). RecyBat24: a dataset for detecting lithium-ion batteries in electronic waste disposal. *Scientific data, 12*(1), 843. doi:10.1038/s41597-025-05211-5

Colombo, D. (2020, Juli 15). Ortofrutticola Parma continua a investire nella tecnologia Tomra Food. Italien: Tecniche Nuove S.p.A. Tratto il giorno Juli 7, 2026 da https://www.freshpointmagazine.it/featured/ortofrutticola-parma-tomra-food-selezionatrice-sentinel-patate/

Dvorak, E., Korn, M., & Nigl, T. (2026). *Interner Bericht - Battery Research On Market, Risk and Fire Statistic*. Tratto il giorno Juli 7, 2026

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen. (2026). *AIR: Antriebsbatterieninspektion mittels Röngten*. Tratto il giorno Juli 7, 2026 da https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/zfp/projekte/air.html

Grath, E., Morgenbesser, S., Autischer, M., Resch, H., & Nigl, T. (2026). *Ergebnisbericht - DeB-AT – Detektion und Ausschleusung von Batterien aus gemischten Abfällen mittels Sensorik und künstlicher Intelligenz.* Tratto il giorno Juli 7, 2026

Grath, E., Nigl, T., & Autischer, M. (2024). *Detektion und Ausschleusung von Batterien aus gemischten Abfällen mittels Sensorik und künstlicher Intelligenz.* 17. Recy & DepoTech-Konferenz Vorträge-Konferenzband, Leoben. Tratto il giorno Juli 7, 2026

Gundupalli, S. P., Hait, S., & Thakur, A. (2016, September 20). A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. *Waste management (New York, N.Y.)*, p. 56-74. doi:10.1016/j.wasman.2016.09.015

Inácio, S., Proença, H., & Neves, J. C. (2026). *SortWaste: A Densely Annotated Dataset for Object Detection in Industrial Waste Sorting*. doi:10.48550/arXiv.2601.02299

Koinig, G., & Lorber, B. (2026). *AVAW CV-Waste Bounding Box Tool*. (T. U. Leoben, A cura di) Tratto il giorno Juli 7, 2026 da https://github.com/AVAWLeoben/AVAW_CV-Waste

Koinig, G., Kuhn, N., Fink, T., Lorber, B., Radmann, Y., Martinelli, W., & Tischberger-Aldrian, A. (2024, Oktober 24). Deep learning approaches for classification of copper-containing metal scrap in recycling processes. *Waste management (New York, N.Y.)*, p. 520-530. doi:10.1016/j.wasman.2024.10.022

Kroell, N., Chen, X., Greiff, K., & Feil, A. (2022, Juni 24). Optical sensors and machine learning algorithms in sensor-based material flow characterization for mechanical recycling processes: A systematic literature review. *Waste management (New York, N.Y.)*, p. 259-290. doi:10.1016/j.wasman.2022.05.015

Lobbe Holding GmbH & Co KG. (2025). *Mehr Sicherheit in Recyclinganlagen: Frauenhofer IIS und Lobbe entwickeln innovative KI-Röngtensortierung*. Tratto il giorno Juli 7, 2026 da https://www.lobbe.de/mehr-sicherheit-in-recyclinganlagen/

Raptopoulos, F., Koskinopoulou, M., & Maniadakis, M. (2020). Robotic Pick-and-Toss Facilitates Urban Waste Sorting. *IEEE 16th International Conference 2020*, p. 1149-1154. doi:10.1109/CASE48305.2020.9216746

Sapkota, R., & Karkee, M. (2025). *Ultralytics YOLO Evolution: An Overview of YOLO26, YOLO11, YOLOv8 and YOLOv5 Object Detectors for Computer Vision and Pattern Recognition.* arXiv. doi:10.48550/arXiv.2510.09653

Shanthi, M. D., & Hermans, T. (2024). *Pick and Place Planning is Better than Pick Planning then Place Planning.* arXiv. doi:10.48550/arXiv.2401.16585

TOMRA Food. (2025, Juli 8). *Sentinel II optical sorter*. Tratto il giorno Juli 7, 2026 da https://www.tomra.com/-/media/project/tomra/tomra/solutions/food/machines/sentinel-ii/tomra-food-sentinel-ii-a4-en-lr.pdf

Turcato, N., Giacomuzzo, G., Terreran, M., Allegro, D., Carli, R., & Libera, A. D. (2025). *Data efficient Robotic Object Throwing with Model-Based Reinforcement Learning.* arXiv. doi:10.48550/arXiv.2502.05595

VOEB. (2025, August 4). *Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe.* Tratto il giorno Juli 7, 2026 da VOEB begrüßt Vorstoß zum Verbot von Einweg-E-Zigaretten: https://www.voeb.at/pressemeldungen/einweg-e-zigaretten-abfallwirtschaft-begruesst-verbot

Weber, H., Aberger, J., Koinig, G., Nigl, T., Sarc, R., & Tischberger-Aldrian, A. (2026). Künstliche Intelligenz in der Abfallwirtschaft – Ein Überblick aktueller Anwendungen und zukünftiger Trends. *Österr Wasser- und Abfallw (Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft), 78*(3-4), p. 200-209. doi:10.1007/s00506-026-01200-z

WeSort.AI GmbH. (2026). *X.Sort: Stoppt Brände und Schäden, bevor sie entstehen.* Tratto il giorno Juli 7, 2026 da https://www.wesort.ai/xsort

Windisch-Kern, S., Gerold, E., Nigl, T., Jandric, A., Altendorfer, M., Rutrecht, B., . . . Part, F. (2021, Dezember 6). Recycling chains for lithium-ion batteries: A critical examination of current challenges, opportunities and process dependencies. *Waste management (New York, N.Y.)*, p. 125-139. doi:10.1016/j.wasman.2021.11.038

KONTAKT

Nina Nowak B.Sc.
nina.nowak@unileoben.ac.at
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Arbeitsgruppe Future Waste und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben
www.unileoben.ac.at/avaw

Ohne Kontext wert- und sinnbefreit – Recyclingeffizienzkennzahlen im Batterierecycling zwischen Messung, Annahmen und Realität

Bettina Rutrecht[1] & Thomas Nigl[2]
[1)] K1-MET GmbH, Area Metallurgical Process Efficiency and Circularity, Leoben, Österreich
[2)] Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG**:** Seit 24.07.2025 regelt die Delegierte Verordnung (EU) 2025/606, wie die Recyclingeffizienz (r_{RE}) und die stoffliche Verwertungsquote (r_{RM}) von Altbatterien zu berechnen sind; erstes Berichtsjahr ist 2026. Beide Formeln sind schlichte Massenverhältnisse und wirken damit einfacher, als sie sind. Zwischen der gewogenen Tonne im Betrieb und der berichteten Prozentzahl liegen Systemgrenzen, Bilanzgrenzen auf Elementebene, Ausbringungsgrade des Downstreams und Herkunftszuordnungen einzelner Elemente – jede dieser Entscheidungen ist zulässig, keine ist neutral. Der Beitrag ordnet diese Verzerrungen und zeigt an einer Modellrechnung ihre Wirkung. Die zentrale Aussage: r_{RE} und r_{RM} sind Diagnosewerte, keine Leistungsnoten. Ohne die Deklaration ihrer Annahmen sind sie weder vergleichbar noch belastbar – und damit wert- und sinnbefreit.

1 AUSGANGSLAGE

Die Verordnung (EU) 2023/1542 verlangt für lithiumbasierte Batterien eine Recyclingeffizienz von 65 % bis 31.12.2025 und 70 % bis 31.12.2030 (Anhang XII Teil B) [1]. Zusätzlich sind erstmals stoffliche Verwertungsquoten je Element einzuhalten: bis 31.12.2027 90 % für Cobalt, Kupfer, Blei und Nickel und 50 % für Lithium, bis 31.12.2031 95 % bzw. 80 % (Teil C). Wie zu rechnen ist, regelt seit 24.07.2025 die Delegierte Verordnung (EU) 2025/606 [2]. Berichtspflichtig ist der „first recycler“ (erster Recyclingbetreiber), also der Betrieb, der das Recycling der Module und/oder Zellen beginnt; wer ausschließlich demontiert, ist es nicht, muss ihm aber die erforderlichen Daten liefern.

Die Zeit der Grundsatzdebatten ist damit vorbei, gerechnet wird jetzt. Umso wichtiger wird, was eine solche Zahl aussagt. In der Praxis dient sie als Anlagenkennzahl, Technologievergleich, Investitionsgrundlage und zunehmend als Nachhaltigkeitsbeleg. Ein hoher Wert wird als gute Anlage gelesen, ein niedriger als schlechte – das ist etwas einseitig betrachtet: Ein niedriger Wert kann auf Engpässe in der Vorbehandlung, auf unvermeidbare Verluste durch Oxidation und Verschlackung oder auf eine bewusst auf Zielmetalle ausgelegte Prozessführung hinweisen [3] – er kann aber auch auf einen Systemdefekt außerhalb der Anlage deuten: fehlende Absatzmärkte, niedrige Primärpreise oder Defizite im Design for Recycling. Recyclingeffizienz ist ein Diagnoseinstrument, weniger eine Leistungskennzahl.

2 ZWEI FORMELN, VIELE FREIHEITSGRADE

$$r_{RE} = \frac{\sum m_{output}}{m_{input}} * 100, \quad [mass\ \%] \tag{1}$$

$$r_{RM}(TM) = \frac{\sum m_{TM,output-point}}{m_{TM,input}} * 100, \quad [mass\ \%] \tag{2}$$

Beide Kennzahlen aus Formel (1) und (2) sind Massenverhältnisse: r_{RE} bezieht die anrechenbaren Outputfraktionen auf die eingesetzten Altbatterien, r_{RM} ein Zielmaterial (TM) am Berechnungspunkt auf dessen Masse in der Eingangsfraktion; Berechnungspunkt ist jener Schritt, an dem es Primärrohstoffe ersetzen kann. Die Sprengkraft liegt in den Definitionen dahinter. Drei Punkte sind besonders folgenreich [2]:

- m_{input} **umfasst mehr als die Zelle.** Dazu zählen ausdrücklich auch die demontierten Bauteile, das Gehäuse, betriebsnotwendige Kabel und externe Teile wie Leiterplatten. Das vergrößert den Nenner der r_{RE} erheblich – und mit ihm die Bedeutung dessen, was mit diesen Bauteilen passiert.
- **Schwarzmasse ist kein Output.** Die Schwarzmasse (black mass) gilt als Zwischenfraktion und ist nicht anrechenbar, weil die Metalle weiterverarbeitet werden müssen. Es zählt nur das, was nachgelagerte Prozesse als substitutionsfähigen Sekundärrohstoff ausbringen.
- **Der Bezugswert der r_{RM} ist enger gefasst.** Hier zählen nur die Mengen aus Anoden- und Kathodenaktivmaterial, Stromableitern und Elektrolytsalzen. Dasselbe Kupfer, das in der r_{RE} im Nenner steht, gehört in der r_{RM} nicht hinein, wenn es aus der Zellperipherie stammt.

Dazu kommt eine Wahlfreiheit auf Elementebene: Bis 31.12.2029 *dürfen* Sauerstoff, zellinterner Kohlenstoff, zellinternes Eisen, Phosphor, Chlor und Schwefel in m_{input} und m_{output} berücksichtigt werden – sie müssen es aber nicht. Ab 01.01.2030 *sind* zellinterner Kohlenstoff, zellinternes Eisen und Phosphor zwingend zu berücksichtigen, Sauerstoff, Chlor und Schwefel bleiben optional [2]. Zwei Anlagen mit identischer Technik können also regelkonform unterschiedliche Werte berichten.

3 WOHER DIE UNSCHÄRFE KOMMT

Massenbasierte Kennzahlen sind leicht zu rechnen und schwer zu interpretieren, weil sich zwei Fehlerarten überlagern: Verzerrungen der Daten und des Modells. Tab. 1 zeigt die inhärenten, immer wiederkehrenden Verzerrungen und ihre Wirkung auf die Recyclingeffizienz auf.

Tab. 1: Daten- und modellbedingte Verzerrungen und ihre Wirkung auf die berechnete Recyclingeffizienz

Ebene	Verzerrung	Wirkung auf die Kennzahl
Daten	Vollständigkeit der erfassten Ströme	fehlende Ströme führen meist zur Überschätzung
	Technologische, zeitliche und geografische Repräsentativität	Ausbringung systematisch verzerrt, Werte nicht übertragbar
	Messgüte von Probenahme und Analytik	Streuung wird als Genauigkeit ausgegeben
Modell	Lage der Systemgrenze	stärkster struktureller Einzeleffekt
	Auslegung der Kennzahldefinition	Ergebnisse nicht vergleichbar
	Allokation und Aggregation von Prozessen	verschiebt die Ausbringung, verbirgt Massenverluste
	Annahme des stationären Betriebs	Effizienz wird überschätzt

Diese Verzerrungen sind kein Zeichen mangelnder Sorgfalt, sondern der Normalfall: Altbatterien sind ein inhomogener Input, ein Betriebsjahr ist nicht stationär, und ohne Batteriepass ist die Eingangszusammensetzung unbekannt. Verpflichtend ist dieser erst für ab 18.02.2027 in Verkehr gebrachte Batterien, das heißt er erreicht die Betriebe erst an deren Lebensende – und für Gerätebatterien gilt er ohnehin nicht.

4 WIE STARK WIRKEN DIE ANNAHMEN?

Die folgende Modellrechnung mit gerundeten Annahmen macht die Größenordnung greifbar und ist nicht als Messergebnis zu verstehen. Lassen wir die Bezugsgröße, also m_{input} , ein 1.000 kg Batteriesystem sein. 300 kg werden bei der Demontage als Bauteile abgetrennt, 700 kg gehen als Module in die thermische Deaktivierung, wo rund 20 M-% der Modulmasse als Elektrolyt,

Lösungsmittel und Kunststoffe über das Abgas entweichen. Aus den restlichen 560 kg entstehen mechanisch etwa 448 kg Schwarzmasse, 95 kg Nichteisen- und 17 kg Eisenfraktion.

Anrechnung der Vorbehandlungsfraktionen. Werden die 300 kg demontierten Bauteile pauschal als vollständig recycelt geführt statt mit den realen Ausbringungen – bei Stahl und Aluminium hoch, bei Kabeln und Mischkunststoffen niedrig – unterscheiden sich die Ergebnisse bei einem gemischten Ausbringungsgrad von 80 % um ca. 6 Prozentpunkte.

Ausbringung des Downstreams. Die Schwarzmasse ist mit rund 45 M-% des Inputs der größte Einzelterm, darf aber selbst nicht angerechnet werden. Ob der Ausbringungsgrad der nachgelagerten Metallurgie ein auditierter Messwert, ein Vertragswert oder ein Literaturproxy ist, entscheidet damit über fast die Hälfte der Kennzahl: Zwischen 75 % und 85 % liegen 4,5 Prozentpunkte. Beide Stellschrauben zusammen aus Vorbehandlung und Downstream ergeben über 10 Prozentpunkte – doppelt so viel wie die Anhebung des Zielwerts Ende 2030.

Herkunftszuordnung bei r_{RM}. Kupfer und Nickel haben je zwei Quellen: das Zellinnere (Stromableiter, Aktivmaterial) und die Peripherie (Kabel, Stromschienen, Gehäuselegierungen). Eine Elementanalyse unterscheidet sie nicht. Für die Zuordnung dafür braucht es Siebung, Handsortierung, Mikroskopie, XRD oder LIBS. Wird peripheres Kupfer in den Bezugswert einbezogen, wächst der Nenner, nicht aber der Zähler: Bei einem peripheren Anteil von 40 % sinkt eine r_{RM}(Cu) von 90 % rechnerisch auf 54 %. Eine einzige Zuordnungsentscheidung bewegt die Kennzahl damit um mehr als 30 Prozentpunkte.

Repräsentativität der Probenahme. Die Rückrechnung der Eingangszusammensetzung steht und fällt mit der Probenanzahl, der Inkrementmasse und der Analysenstreuung. Einschlägige Standards wie EN 14899 und CEN/TR 15310-1 [4, 5] machen die Messunsicherheit des Mittelwerts quantifizierbar und diese gehört mitberichtet.

5 WAS EINE KENNZAHL MITLIEFERN MUSS

Beipackzettel statt nackter Zahl. Das ist keine Kritik an der Verordnung, sondern eine Anforderung an die Berichtspraxis: Zu jedem Wert gehören Systemgrenze, Bezugsjahr, Inputzusammensetzung, ausgeübte regelkonforme Annahmen und Entscheidungen, Herkunft der Downstream-Ausbringungsgrade und Unsicherheit der Analysendaten. Erst das macht aus einer Zahl eine Information.

Definitionen schärfen, dann vergleichen. Offen bleibt, in welchem Umfang demontierte Fraktionen ohne Nachweis der Ausbringung angerechnet werden dürfen und wie zellinterne von peripheren Elementquellen zu unterscheiden sind. Solange das offen bleibt, tragen Anlagenvergleiche nicht. Eine harmonisierte Berechnungsanleitung – national, europäisch oder als Branchenstandard – nützt zuerst den Betrieben selbst.

Prüffähigkeit von Anfang an mitdenken. Die Behörden werden in der Verordnung aufgerufen zu prüfen. Darunter fallen Vollständigkeit, Genauigkeit und Konsistenz. Prüfbar ist aber nur, was dokumentiert ist und dazu gehören auf jeden Fall Probenahmeplan, Wägeprotokolle, Analysemethoden und Annahmen.

6 SCHLUSSFOLGERUNG

Mit dem Berichtsjahr 2026 werden r_{RE} und r_{RM} zur harten Währung im Batterierecycling. Sie sind aber keine Messwerte, sondern Ergebnisse einer Rechnung, in die neben gewogenen Massen zulässige und unterschiedlich wirksame Annahmen eingehen – einzelne davon verschieben die Kennzahl bei r_{RM} um mehr als 30 Prozentpunkte. Eine Prozentzahl ohne ihren Kontext ist damit

kein Qualitätsnachweis, sondern eine Zahl ohne Aussage. Umgekehrt gilt: Transparent kommunizierte Annahmen sind selbst eine Form der Qualitätssicherung – wer offenlegt, wie gerechnet wurde, macht aus einer angreifbaren Zahl ein belastbares Argument. Eine detaillierte Methodik zur Rückrechnung und ein Rahmen für die Prüfung durch Dritte sind Gegenstand einer laufenden Publikation.

7 DANKSAGUNG

Das COMET Modul „FuLIBatteR“ wird im Rahmen von COMET, dem österreichischen Programm für Kompetenzzentren, gefördert. COMET wird von den österreichischen Bundesministerien BMIMI und BMWET sowie von den Bundesländern Oberösterreich und Steiermark finanziert.

LITERATUR

[1] Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, ABl. L 191, 28.07.2023, S. 1–117.
[2] Delegierte Verordnung (EU) 2025/606 der Kommission vom 21. März 2025 zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2023/1542 durch Festlegung der Methode zur Berechnung und Überprüfung der Quoten für die Recyclingeffizienz und die stoffliche Verwertung von Altbatterien sowie des Formats für die Dokumentation, ABl. L, 2025/606, 04.07.2025.
[3] Windisch-Kern, S. et al.: Recycling chains for lithium-ion batteries: A critical examination of current challenges, opportunities and process dependencies. Waste Management 138 (2022), S. 125–139.
[4] EN 14899:2005: Charakterisierung von Abfällen – Probenahme von Abfällen – Rahmen für die Erstellung und Anwendung eines Probenahmeplans.
[5] CEN/TR 15310-1:2006: Characterization of waste – Sampling of waste materials – Part 1: Guidance on selection and application of criteria for sampling under various conditions.

KONTAKT

DI Bettina Rutrecht
Bettina.rutrecht@k1-met.com
K1-MET GmbH, Area Metallurgical Process Efficiency and Circularity
www.k1-met.com

Optimierung der Separator Abtrennung im Lithium-Ionen-Batterie Recycling – überarbeiteter TUBAF-Prozess

Simon Franz Bendl[1], Alexandra Kaas[1], Thomas Mütze[2] & Urs Alexander Peuker[1]
[1)] TU Bergakademie Freiberg, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik, Freiberg, Deutschland
[2)] BASF Battery Materials and Recycling Schwarzheide GmbH, Schwarzheide, Deutschland

KURZFASSUNG: Zum Steigern der Ausbeute beim Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) läuft die Suche nach optimalen Prozessbedingungen aus ökonomischen Gründen wie auch aufgrund der EU-Vorgaben. Die vorliegende Arbeit schlägt eine optimierte Abtrennung der Separatorfolie vor. Hierbei wird die Effizienz der Siebung mit der konventionellen Zick-Zack-Sichtung verglichen. Die Siebung verbessert den Separationsprozess bei allen untersuchten Batterietypen. Dadurch werden höhere Rückgewinnungsraten bei zugleich saubererer Separatorfolie erzielt und die Verschleppung der Separatorfolie in andere Prozessströme verringert. Dies ermöglicht eine Steigerung der Recyclingquote für die sogenannte Schwarzmasse um 2,8 %-Punkte. Zudem kann im Vergleich zum ursprünglichen Verfahren ein Prozessschritt eingespart werden.

1 MOTIVATION

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) sind ein entscheidender Baustein der Energiewende. Batterien werden hierbei sowohl zum Speichern elektrischer Energie in stationären Systemen als auch in mobilen Anwendungen wie z.B. Laptops und auch Elektrofahrzeugen (EV) eingesetzt. Die Anzahl an EV steigt kontinuierlich an. 2024 war bereits jedes fünfte international verkaufte KFZ ein EV (Verband der Automobilindustrie (VDA), 2025). Mit diesem Anstieg steigt auch der Bedarf an LIB. LIB beinhalten insbesondere im Kathoden-Aktivmaterial (CAM) kritische Rohstoffe wie z.B. Lithium, Nickel und Cobalt.

Um diese kritischen Rohstoffe wiederzugewinnen hat die Europäische Union (EU) die Verordnung 2023/1542 über Batterien und Altbatterien erlassen (European Parliament and the Council, 2023). In dieser Verordnung werden Mindestanforderungen an das Recycling in Form von Mindestrecyclingquoten von bis zu 95 % für z.B. Nickel gestellt und Rezyklatquoten festgelegt. Des Weiteren existiert die Verordnung 2024/1252 (European Parliament and the Council, 2024) auch bekannt als Critical Raw Materials Act, die allgemein ein Recycling kritischer Rohstoffe festlegt. Aufgrund dieser rechtlichen Rahmenbedingungen als auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten oder auch für resiliente Lieferketten ist das Recycling von LIB geboten.

2 MATERIAL & METHODEN

Die Untersuchung erfolgt an Batteriezellen, die vor dem mechanischen Recycling für die Prozesssicherheit tiefenentladen (~0 V) werden (Kaas, 2025). In dieser Studie werden zwei unterschiedliche Entladestrategien betrachtet. Standardmäßig wird mit einem Widerstand (Osram Bilux 64193 12V 60/55W H4 U37R, Osram GmbH, München, Deutschland) für 24 Stunden entladen (PTC: positive temperature coefficient) (Kaas, Wilke, Vanderbuggen, & Peuker, 2023). Die zweite Methode ist die Entladung in Polumkehr (IPR: discharge into pole reversal).

Basis der Untersuchung ist weiterhin der Recyclingprozess nach Wuschke (2018), wobei die Grobzerkleinerung mittlerweile in einem Vakuum-Schredder System (HEUREKA-ZWEI, No-Canary GmbH, Salzgitter, Deutschland) erfolgt. Die Vakuumtechnik wird weiterhin dazu genutzt, bei langsamem Rühren (Umfangsgeschwindigkeit = 1 m/s) in 4 Stunden bei 40 °C und einem Absolutdruck von etwa 5 mbar Lösungsmittel zu entfernen. Anschließend folgt, wie in Abb. 1

dargestellt, die erste Siebung (EML 450, Haver & Boecker OHG; Oelde, Deutschland). Hierbei wird die sogenannte Schwarzmasse (engl. Black Mass (BM)) als Fraktion kleiner 1 mm gewonnen. Der Grobanteil dieser Siebung wird mittels Zick-Zack-Sichter (LZS 10/120X240 Jöst GmbH + Co. KG; Dülmen, Deutschland) weiter prozessiert, um das Zellgehäuse zu separieren. Hierbei wird eine Luftgeschwindigkeit von 5 m/s verwendet (Shengjie et al., 2024).

Sodann werden zwei Verfahrensvarianten untersucht. Im klassischen Prozess folgt eine erneute Sichtung bei 1 m/s (Shengjie et al., 2024), um ein Separatorkonzentrat zu erhalten sowie eine Schwerfraktion, die weiterverarbeitet wird. Abweichend dazu entfällt in der zweiten Verfahrensvariante die zweite Sichtung. Das gesamte Material, nicht nur die Schwerfraktion aus der zweiten Sichtung, wird in einer Turborotormühle (G-35S; Mahltechnik Görgens GmbH; Dormagen, Deutschland) entschichtet (Lyon, 2025).

Im letzten Prozessschritt wird in beiden Verfahrensvarianten erneut gesiebt, um das nun frei vorliegende Beschichtungsmaterial als Schwarzmasse 2 (BM2) zu gewinnen. Um Verunreinigungen der Schwarzmasse 2 aus Stromleiterfolien gering zu halten, wird bei der zweiten Siebung eine Siebmaschenweite von 0,5 mm gewählt. In der alternativen Prozessführung wird zusätzlich bei 4 mm der Separator abgetrennt. Die Fraktion zwischen 0,5 mm und 4 mm beinhaltet überwiegend Partikel der Stromleiterfolien (Al & Cu).

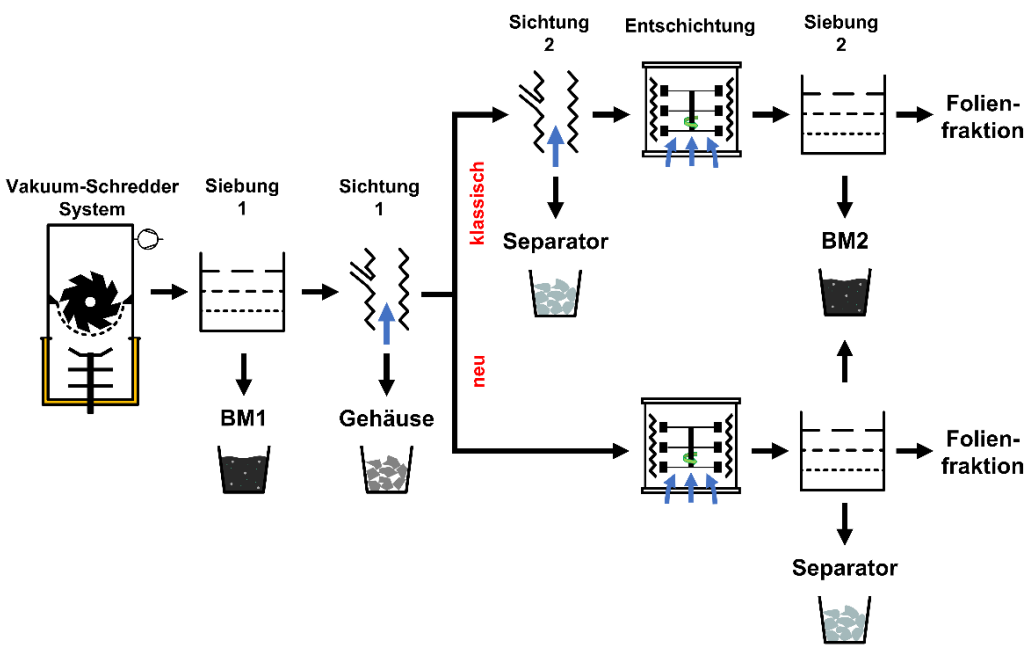


Abb. 1: neue und klassische Verfahrensvariante.

Die Untersuchungen dieser Studie werden anhand von zwei prismatischen Zelltypen (P6 & P7) durgeführt. Die Zelle P6 ist etwa 2 kg schwer mit NMC111 CAM und wird bei Wilke et al. (2023) detaillierter beschrieben. Die Zelle P7 ist etwa 1 kg schwer und beinhaltet eine NCA CAM-Chemie ($LiNi_{0,878}Co_{0,107}Al_{0,015}O_2$). Für die Untersuchungen werden ca. 12 kg Zellen als Batch zerkleinert und prozessiert. Nach der ersten Sichtung wird mittels Rotationsprobenteiler (30L 12Way Divider, Dickie & Stockler (Pty)Ltd; Johannesburg, Südafrika) der Batch in 6 Teilproben geteilt, um beide Prozesswege vergleichen zu können.

Die Separatorfraktionen werden im Bereich >1 mm mittels Handklaubung analysiert. Hierbei werden die Partikel manuell optisch nach der Materialart sortiert. Partikel kleiner 1 mm sind für die Handklaubung zu klein um händisch sortiert zu werden. Daher werden die Partikel kleiner 1 mm, vergleichbar zur BM1, als Schwarzmasse bezeichnet. Die Handklaubung ist ein sehr zeitintensives Verfahren und unterliegt personenbedingten Qualitätsschwankungen. Um den Aufwand zu reduzieren, werden Teilproben geklaubt. Hierbei wird eine Probe mittels Rotationsprobenteiler (30L 12Way Divider, Dickie & Stockler (Pty)Ltd; Johannesburg, Südafrika) reduziert und nur in Teilen analysiert.

Die Analyse der Schwarzmasse erfolgt nach Wilke (2025) mittels ICP-OES (iCAP 6300 Duo; Thermo Fisher Scientific Inc; Waltham, Vereinigte Staaten).

3 ERGEBNISSE & DISKUSSION

Abb. 2 präsentiert den Unterschied zwischen Sichtung und Siebung. In Abb. 2a ist der Anteil an sauberer Separatorfolie in dem Separatorkonzentrat $c_{Sep\text{-}frac}$ über dem Wertstoffausbringen des Separators $R_{c,Sep}$ dargestellt. Hierbei symbolisieren die Farben unterschiedliche Zellen und Entlademethoden, die Rauten symbolisieren den klassischen Prozess (Sichten + Sieben bei 0,5 mm), die Kreise die neue Prozessroute mittels Siebung (bei 4 und 0,5 mm).
Die Siebung erhöht im Vergleich zur Sichtung bei der P6 Zelle unabhängig von der Entlademethode sowohl das Wertstoffausbringen $R_{c,Sep}$ als auch den Anteil an sauberer Separatorfolie. Weiterhin werden Schwierigkeiten bei der Polumkehr deutlich. Wie bereits bei Kaas et al. (2023) und Flügel et al. (2021) beschrieben bilden sich durch die Polumkehr beim Entladen Kupferdentriten zwischen Anode und Kathode aus. Am Separator haftet dadurch Beschichtungsmatterial an. Im vorliegenden Fall wies die beschichtete Separatorfolie einen Kupferanteil von 27 % und einen CAM-Anteil von 38 % auf.
Die Zelle P7 weist keine erhöhte Reinheit der Separatorfraktion auf. Das Ausbringen der Separatorfolie in die Zielfraktion konnte dennoch um etwa 10 %p gesteigert werden. Somit erhöht die geänderte Prozessführung grundsätzlich die Rückgewinnungsrate an Separator und reduziert Verunreinigungen.

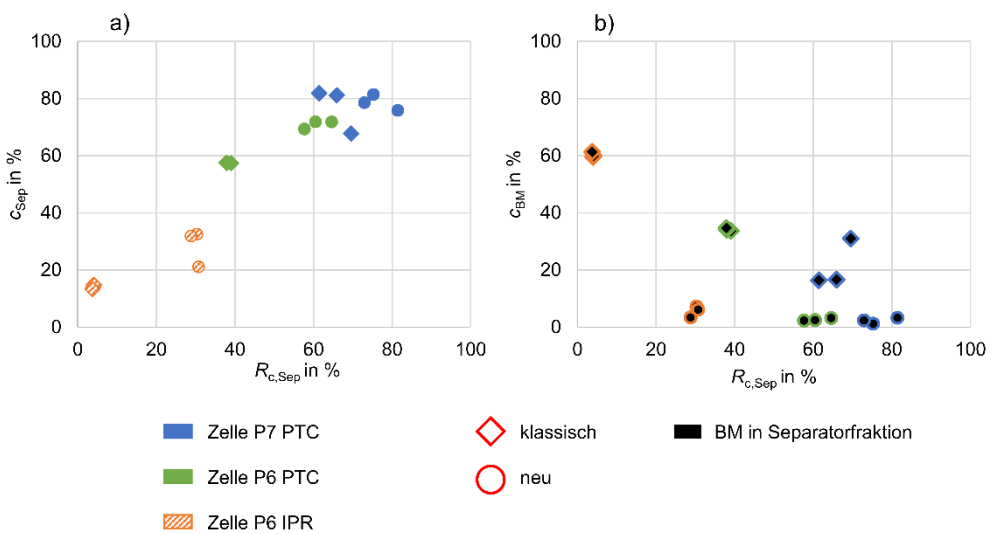


Abb. 2: Zusammensetzung der Separatorfraktion; Gehalt an a) Separatorfolie und b) Schwarzmasse (BM)) aufgetragen über dem Wertstoffausbringen des Separators der Separatorfraktion.

Abb. 2b hebt die Verunreinigungen der Separatorfraktion mit Schwarzmasse hervor. Die Schwarzmasse beinhaltet die Beschichtungsmaterialien der Batterieanoden und -kathoden und ist bzgl. der Anteile an Lithium, Nickel und Kobalt durch EU-Verordnungen reguliert. Die Verunreinigung von Nebenfraktionen wie der Seperatorfraktion mit Schwarzmasse muss daher möglichst gering sein. In Abb. 2b ist zu sehen, dass mittels Siebung im Vergleich zur Sichtung der Anteil an BM in der Separatorfraktion auf ein Zehntel reduziert wird.

Die Massebilanz in Abb. 3 zeigt, dass das Masseausbringen in die Fraktion BM2 mit der Prozessänderung in allen drei Vergleichen gesteigert werden kann, im Mittel um 2,8 %p. Gleichzeitig steigt das Masseausbringen in die Separatorfraktion im Mittel um 2 %p bei gleichzeitig weniger Verunreinigungen. Somit ist es gelungen, die Separatorfolie stärker in einem eigenen Abfallstrom aufzukonzentrieren, sodass sie die übrigen Abfallströme weniger stark verunreinigt.

Ein weiterer Vorteil der Siebung ist, dass der Masseverlust im Prozess insgesamt abnimmt. Dies lässt sich in erster Linie durch das Einsparen des zusätzlichen Prozessschritts, der zweiten Sichtung, erklären. Für einen Industriellen Betrieb des Recyclings sind die hier gezeigten Verluste meist irrelevant, da Stäube aus einer entsprechend dimensionierten Entstaubungsanlage zurückgewonnen werden (USA Patentnr. US2024/0274908 A1, 2024). In der Forschung wird im Gegensatz dazu mit kleinen Batches gearbeitet, sodass eine Rückgewinnung der Stäube aus einer Entstaubungsanlage für einzelne Versuche entsprechend erschwert ist. Auch hier hilft der geringere Masseverlust der neuen Prozessvariante.

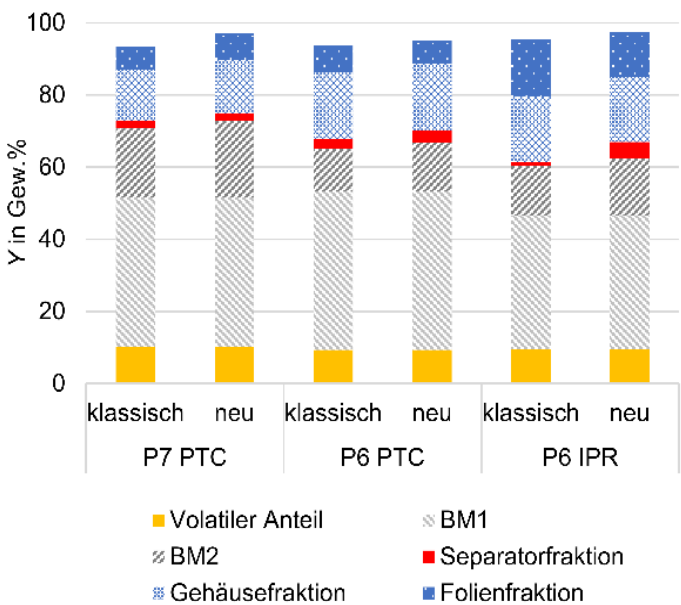


Abb. 3: Massenbilanz der zwei Prozessrouten für zwei unterschiedliche Zellen (P6 & P7) sowie unterschiedliche Entladestrategien.

4 ZUSAMMENFASSUNG

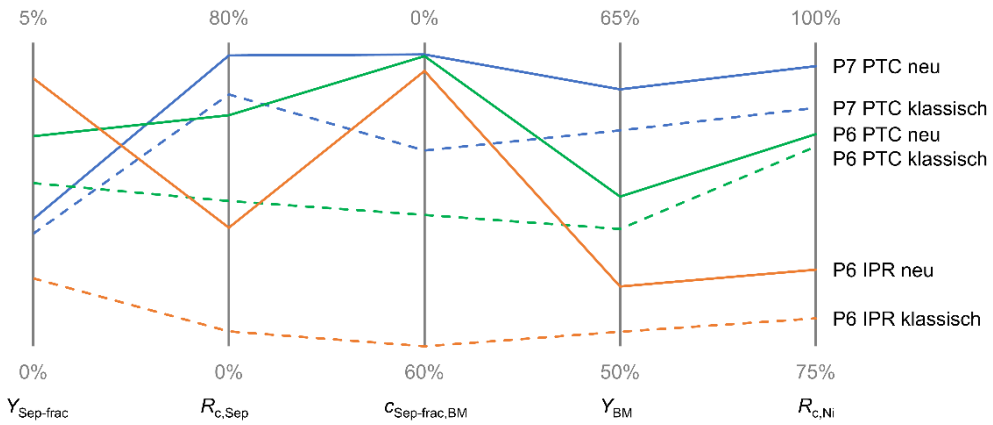


Abb. 4: Vergleich der beiden Prozessrouten „klassisch“ und „neu“ über die in dieser Studie relevantesten Kennzahlen (Y: Masseausbringen im Gesamtprozess (BM: Schwarzmasse; Sep: Separator); Rc: Wertstoffausbringen (Nickel in BM, Separator in Separatorfraktion); c Konzentration BM in Separatorfraktion)

Zusammenfassend wird in dieser Studie aufgezeigt, dass das Abtrennen des Separators statt mit Sichtung durch eine zweite Siebung (Siebschnitt 4 mm) das Prozessergebnis positiv beeinflusst. Als wichtigste Kennzahl ist hierbei die Steigerung der Recyclingquote für Ni um 2,8 %p zu nennen (Abb. 4). Diese Steigerung ist im Kontext einer, von der EU ab 2031 vorgeschriebenen, Recyclingquote von 95 %p als wichtiger Baustein zu betrachten. Durch die Prozessänderung entfällt ein Prozessschritt, sodass Investitions- und Betriebskosten eingespart werden und durch das höhere Masseausbringen der Schwarzmasse, die Wirtschaftlichkeit insgesamt steigt.

Der Separator wird stärker aufkonzentriert bei gleichzeitig reduzierter Verunreinigung. Dadurch steigt die Recyclingquote für den Separator $R_{c,Sep}$ an. Besonders hervorzuheben ist die 90 % geringere Verunreinigung der Separatorfraktion mit BM. Bzgl. der Entladestrategie kann der negative Einfluss durch die geänderte Prozessroute nicht ausgeglichen werden.

Auf Grundlage dieser Studie wird das Verfahren für weitere Untersuchungen an der TU Bergakademie Freiberg dauerhaft umgestellt. Ebenfalls wird für industrielle Anwendungen empfohlen, den Separator nicht mittels Sichtung, sondern in der zweiten Siebung abzutrennen. Weitere Forschung ist nötig bei der Analyse von Nebenfraktionen wie beispielsweise der Separatorfraktion. Das aktuelle angewendete Verfahren (Manuelles Klauben) ist für einen breiten Einsatz zu zeitintensiv und zu fehleranfällig. Die erzeugte Separatorfraktion beinhaltet immer noch Verunreinigungen und ist so nicht für einen direkten Wiedereinsatz geeignet. Folglich muss der Verwendungszweck dieser Fraktion noch geklärt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

European Parliament and the Council. (18. 08 2023). Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC. Abgerufen am 24. 10 2023 von https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj

European Parliament and the Council. (11. 04 2024). Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/17. Abgerufen am 23. 03 2026 von http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj

Flügel, M., Kasper, M., Pfeifer, C., Wohlfahrt-Mehrens, M., & Waldmann, T. (01. 02 2021). Cu Dissolution during Over-Discharge of Li-Ion Cells to 0 V: A Post-Mortem Study. Journal of The Electrochemical Society. doi:10.1149/1945-7111/abdc5f

Kaas, A. (2025). Innovations in Mechanical Recycling of automotive Lithium-Ion Batteries: A Focus on Discharge Depths and Material Classification. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.

Kaas, A., Wilke, C., Vanderbuggen, A., & Peuker, U. (12 2023). Influence of different discharge levels on the mechanical recycling efficiency of lithium-ion batteries. Waste Management. doi:10.1016/j.wasman.2023.08.042

Lee, H., & Lee, S. (2024). USA Patentnr. US2024/0274908 A1. Abgerufen am 13. 01 2026 von https://patents.google.com/patent/US20240274908A1/en?oq=US+2024%2f0274908+A1

Lyon, T. (2025). Optimierung der Mechanischen Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.

Shengjie, W., Feihan, W., & Zhiqiang, Z. (2024). Untersuchungen zur Eignung eines neuen Zickzack-Wind-Sichters für den Aufbereitungsprozess von Lithium-Ionen-Batterie. Projektarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.

Verband der Automobilindustrie (VDA). (2025). Abgerufen am 05. 01 2026 von https://www.vda.de/de/themen/elektromobilitaet/marktentwicklung-europa-international

Wilke, C. (2025). Influences of different pre-treatments, settings and cell types on the first process stage of a mechanical recycling process for automotive lithium-ion batteries. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.

Wilke, C., Kaas, A., & Peuker, U. (17. 11 2023). Influence of the Cell Type on the Physical Processes of the Mechanical Recycling of Automotive Lithium-Ion Batteries. Metals. doi:10.3390/met13111901

Wuschke, L. (2018). Mechanische Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batteriezellen. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.

KONTAKT

M. Sc. Simon Franz Bendl
simon-franz.bendl@mvtat.tu-freiberg.de
+49 3731 39-3885
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik
TU Bergakademie Freiberg
https://tu-freiberg.de/fakult4/mvtat

Einbindung biohydrometallurgischer Strategien in das hydrometallurgische Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

Reinhard Lerchbammer[1], Matthias Mandl[2], Luca Kolonovits[2] & Eva Gerold[1]
[1)] CD Laboratory for Advanced Recycling of Lithium-Ion Batteries, Chair of Non-ferrous Metallurgy, Montanuniversität Leoben 8700 Leoben, Austria
[2)] Montanuniversität Leoben, Chair of Non-ferrous Metallurgy, 8700 Leoben, Austria

KURZFASSUNG: Der rasch zunehmende Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität und stationären Energiespeichersystemen erhöht den Bedarf an effizienten und nachhaltigen Recyclingverfahren. Pyro- und hydrometallurgische Prozesse gelten derzeit als Stand der Technik für die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe aus End-of-Life-Lithium-Ionen-Baterien, sind jedoch vergleichsweise mit einem hohen Energie- und Chemikalienverbrauch sowie einer erheblichen Umweltbelastung verbunden. Daher sind alternative und ergänzende Prozesskonzepte erforderlich, um die Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz zukünftiger Recyclingrouten zu verbessern. Vor diesem Hintergrund stellt die Biohydrometallurgie einen vielversprechenden Ansatz zur Ergänzung konventioneller Recyclingverfahren dar. Durch die Nutzung mikrobieller Stoffwechselprozesse ermöglicht sie die selektive Mobilisierung von Metallen unter milden Prozessbedingungen. Zur Bewertung dieses Potenzials erfolgten am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie der Montanuniversität Leoben Bioleaching-Versuche mit *Acidithiobacillus thiooxidans* und *Gluconobacter oxydans*. Dabei wurden das direkte „One-Step-Bioleaching“ und das indirekte „Spent-Medium-Bioleaching“ systematisch hinsichtlich ihrer Eignung zur Metalllösung aus Lithium-Ionen-Batterie-Schwarzmasse untersucht. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass biohydrometallurgische Verfahren das Potenzial besitzen, hydrometallurgische Recyclingrouten gezielt zu ergänzen. Durch den systematischen Vergleich von „One-Step“- und „Spent-Medium-Bioleaching“ konnten die jeweiligen Vor- und Nachteile beider Prozesskonzepte aufgezeigt und ihre Eignung für unterschiedliche Anwendungsfälle bewertet werden. Daraus lassen sich konkrete Ansätze zur Prozessoptimierung sowie Empfehlungen für die Integration biohydrometallurgischer Verfahrensschritte in zukünftige Recyclingrouten ableiten.

1 EINLEITUNG

Die zunehmende Verbreitung von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität und stationären Energiespeicherung erhöht den Bedarf an kritischen Rohstoffen und macht deren effiziente Rückgewinnung zu einer zentralen Voraussetzung für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft. Entsprechend schreiben aktuelle gesetzliche Vorgaben steigende Recyclingquoten sowie den Einsatz von Rezyklaten in zukünftigen Batteriesystemen vor. [1]
Derzeit dominieren pyro- und hydrometallurgische Verfahren das industrielle Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Die Hydrometallurgie gilt aufgrund ihrer hohen und selektiven Rückgewinnungseffizienz für kritische Rohstoffe aus Batterieschwarzmasse als Stand der Technik. Gleichzeitig erfordern diese Prozesse mehrere aufeinanderfolgende Verfahrensschritte, die mit einem erhöhten Energie- und Chemikalienbedarf sowie entsprechenden Prozesskosten verbunden sind. Dies stellt insbesondere bei sinkenden Wertmetallgehalten in der Schwarzmasse eine wirtschaftliche Herausforderung dar. Vor diesem Hintergrund besteht ein wachsender Bedarf an komplementären Prozesskonzepten, die eine nachhaltigere und ressourceneffizientere Gestaltung zukünftiger Recyclingrouten ermöglichen. [2, 3]
Eine vielversprechende Ergänzung zu etablierten Recyclingverfahren stellt die Biohydrometallurgie dar. Sie nutzt die Stoffwechselaktivität von Mikroorganismen, um Metalle aus Primär- und Sekundärrohstoffen unter milden Prozessbedingungen zu mobilisieren und zurückzugewinnen. Die Biometallurgie ist bereits in verschiedenen primären Gewinnungsrouten für Metalle, wie beispielsweise bei Kupfer, etabliert und wird zunehmend für das Recycling von Lithium-Ionen-

Batterien untersucht. Im Vergleich zu konventionellen Verfahren bietet es Potenzial für einen geringeren Energie- und Chemikalienverbrauch bei geringeren Umweltauswirkungen. [4, 5]
Die mikrobielle Metalllösung beruht im Wesentlichen auf den Mechanismen der Acido-, Redoxo- und Komplexolyse. So oxidiert *Acidithiobacillus thiooxidans* elementaren Schwefel zu Sulfat und bewirkt gleichzeitig ein Senken des pH-Wertes, wodurch die Auflösung metallhaltiger Phasen begünstigt wird. *Acidithiobacillus ferrooxidans* oxidiert Fe^{2+} zu Fe^{3+}, das als starkes Oxidationsmittel die oxidative Auflösung metallhaltiger Verbindungen fördert. Heterotrophe Mikroorganismen produzieren hingegen organische Säuren, die durch Protonenangriff und Komplexbildung zur Metallmobilisierung beitragen. [6]
Für eine industrielle Umsetzung müssen jedoch insbesondere die Toxizität der Batteriematerialien gegenüber den Mikroorganismen, die vergleichsweise langsame Reaktionskinetik sowie Herausforderungen bei der technischen und wirtschaftlichen Prozessskalierung überwunden werden. [7]

1.1 Biometallurgisches Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

Zahlreiche Mikroorganismen sind in der Lage, schwerlösliche Metallverbindungen in lösliche und damit extrahierbare Formen zu überführen. Aufgrund ihres Potenzials zur ressourcenschonenden Rückgewinnung kritischer und strategischer Rohstoffe gewinnt die Biometallurgie zunehmend an Bedeutung als nachhaltige Ergänzung konventioneller Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien. [5]
Grundsätzlich werden zwei Bioleaching-Strategien unterschieden: direkte und indirekte Verfahren. Beim direkten Bioleaching werden Mikroorganismen entweder unmittelbar oder nach einer definierten Adaptions- bzw. Wachstumsphase mit dem Einsatzmaterial, beispielsweise Batterieschwarzmasse, in Kontakt gebracht. Die Metalllösung erfolgt dabei parallel zum mikrobiellen Wachstum aufgrund des Stoffwechsels der Mikroorganismen. Dieses Verfahren eignet sich insbesondere für Materialien mit geringer Toxizität und ermöglicht gleichzeitig eine Anpassung der Mikroorganismen an den jeweiligen Einsatzstoff. [8]
Beim indirekten Ansatz erfolgt die Kultivierung der Mikroorganismen räumlich getrennt vom Einsatzmaterial. Anschließend wird das zellfreie, metabolitenreiche Kulturmedium zum Lösen der Wertstoffe eingesetzt. Der Verzicht auf den direkten Kontakt zwischen Mikroorganismen und toxischen Batteriekomponenten reduziert hemmende Einflüsse auf die biologische Aktivität und erlaubt eine unabhängige Optimierung der biologischen und hydrometallurgischen Prozessschritte. [8]
Für die biohydrometallurgische Behandlung von Lithium-Ionen-Batterien werden hauptsächlich chemolithoautotrophe Bakterien sowie heterotrophe Pilze in der Forschung eingesetzt. Während Bakterien wie *Acidithiobacillen*, *Leptospirillen* und *Sulfobacillen* Metalle durch Schwefel- und Eisenoxidation mobilisieren, erfolgt die Metalllösung bei Pilzen wie *Aspergillus niger* oder *Penicillium*-Arten überwiegend über die Bildung organischer Säuren. Beide Ansätze weisen ein hohes Potenzial für die Rückgewinnung kritischer Metalle auf und bilden die Grundlage aktueller Forschungsarbeiten. [9]

1.2. Ziel

Ziel dieser Arbeit ist die Bewertung biohydrometallurgischer Verfahren für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Dazu werden *Gluconobacter oxydans* und *Acidithiobacillus thiooxidans* zur Laugung von $Li(Ni_xMn_yCo_z)O_2$/C-Schwarzmasse (NMC) und $LiFePO_4$-Kathodenmaterial (LFP) eingesetzt und direkte sowie indirekte Bioleaching-Strategien systematisch verglichen. Auf dieser Grundlage werden ihr Potenzial sowie Empfehlungen für die Integration biohydrometallurgischer Prozessschritte in hydrometallurgische Recyclingrouten abgeleitet.

2 METHODIK

2.1 Charakterisierung des Eingangsmaterials

Für die Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Batteriematerialien eingesetzt: pyrolysierte Schwarzmasse aus End-of-Life-Lithium-Ionen-Batterien sowie LFP-Kathodenmaterial. Die chemische Zusammensetzung der Materialien wurde mittels ICP-MS (Agilent 8800, Santa Clara, CA, USA) bestimmt und ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung von NMC-Schwarzmasse sowie LFP-Kathodenmaterial, bestimmt mittels ICP-MS

Element	**Li**	**Ni**	**Co**	**Mn**	**Cu**	**Al**	**Fe**	**PO_4**	**C**
Gew.-%	4.3	22.0	6.5	7.3	6.9	5.1	0.5	-	Bal.*
Gew.-%	10.6	-	-	-	-	-	33	56.4	

2.2 *Verwendete Stämme und Kultivierung*

Für die Biolaugungsexperimente wurden zwei unterschiedliche Mikroorganismenstämme in jeweils optimierten flüssigen Nährmedien kultiviert. Bei den Versuchen mit LFP-Kathodenmaterial wurde auf die Zugabe von $CaCO_3$ verzichtet, um eine Neutralisation der gebildeten Säuren zu vermeiden.

- *Acidithiobacillus thiooxidans* (DSM 504): NM 35 (3 $g \cdot dm^{-3}$ KH_2PO_4, 0.1 $g \cdot dm^{-3}$ NH_4Cl, 0.1 $g \cdot dm^{-3}$ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, 0.14 $g \cdot dm^{-3}$ $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, 10 $g \cdot dm^{-3}$ sulfur), 26° C
- *Gluconobacter oxydans* (DSM 3504): NM 105 (100 $g \cdot dm^{-3}$ Glucose, 10 $g \cdot dm^{-3}$ yeast extract, 20 $g \cdot dm^{-3}$ $CaCO_3$), 26 °C

2.3 *Biolaugungsexperimente*

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit biohydrometallurgischer Verfahren wurden ein direktes (One-Step) und ein indirektes (Spent-Medium) Bioleaching-Konzept untersucht. Sämtliche Experimente erfolgten in einem Schüttelinkubator bei 26 °C und 40 $U \cdot min^{-1}$ unter identischen Versuchsbedingungen. Die Kulturkolben wurden mit steriler Watte verschlossen und nicht belüftet. Die Hauptkulturen wurden jeweils mit 1 ml einer stationären Vorkultur inokuliert. Die verwendeten Laugungsparameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit wurden für jeden Versuchsansatz zwei unabhängige Versuchsreihen mit jeweils drei (NMC) bzw. fünf (LFP) Parallelansätzen durchgeführt.

Tab. 2: Bioleaching parameter setting

Parameter	**Unit**	**First step approach**	**Spent media approach**
Volumen	ml	50	50
S/L-Verhältnis	$g \cdot dm^{-3}$	10	10
Inkubationstemperatur	°C	26	26
Inkubationszeit	d	0	7
Laugungstemperatur	°C	26	26
Laugungsdauer	d	7	7

2.4 *Analytische Methoden*

Die quantitative Bestimmung der Metallkonzentrationen in den Filtraten erfolgte mittels Mikrowellenplasma-Atomemissionsspektrometrie (MP-AES). Nach Abschluss der Laugungsexperimente wurden die Feststoffe durch Filtration von der Flüssigphase getrennt. Die Berechnung der Auslaugungseffizienz der einzelnen Metalle erfolgte anschließend gemäß Gleichung (1).

$$\text{Laugungseffizienz (LE)} = \left(\frac{C_S \cdot V_S}{m_P \cdot M_P}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

C_S……...Metallkonzentration in Lösung ($mg \cdot dm^{-3}$)
V_S……Volumen der Lösung (dm^3)
m_P……..Massenanteil des Metalls im Ausgangsmaterial (Gew.-%)
M_P……..Masse an eingesetzter Schwarzmasse (mg)

Zusätzlich wurden sterile Kontrollansätze durchgeführt und ausgewertet, um Kreuzkontaminationen auszuschließen.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Biolaugungsversuche mit NMC/C-Schwarzmasse

Zur Bewertung der Laugungseffizienz wurden die Rückgewinnungsraten von Lithium, Nickel, Kobalt, Mangan, Kupfer und Aluminium für direkte und indirekte Bioleaching-Strategien mit *Gluconobacter oxydans* und *Acidithiobacillus thiooxidans* untersucht.
Mit *G. oxydans* erwies sich das indirekte Bioleaching dem direkten Verfahren deutlich überlegen. Während im direkten Ansatz Rückgewinnungsraten von 55,4 % für Li, 22,2 % für Co und 63,1 % für Mn erzielt wurden, stiegen diese im indirekten Verfahren auf 66,8 %, 80,9 % bzw. 94,8 %. Besonders ausgeprägt war die Verbesserung für Co und Ni, deren Auslaugungseffizienz um mehr als das Dreifache zunahm. Dies ist auf die räumliche Trennung von Metabolitenbildung und Laugung zurückzuführen, wodurch die Gluconsäureproduktion unbeeinflusst von toxischen Bestandteilen der Batterieschwarzmasse erfolgen kann. Die Metalllösung wird anschließend sowohl durch Acidolyse als auch durch Komplexbildung gefördert. Die geringen Kupferauslaugungsraten spiegeln hingegen die geringe Löslichkeit dieses Metalls in schwachen organischen Säuren wider. Insgesamt bietet das indirekte Bioleaching eine höhere Prozessstabilität, erfordert jedoch aufgrund zusätzlicher Kultivierungsschritte längere Prozesszeiten.
Im Gegensatz dazu zeigten die direkten und indirekten Bioleaching-Ansätze mit *A. thiooxidans* vergleichbare Auslaugungseffizienzen. Für Li wurden Rückgewinnungsraten von 28,1–34,0 % erzielt, während Ni unabhängig vom Verfahren lediglich etwa 6 % erreichte. Die höchsten Extraktionsraten wurden für Cu mit rund 35–36 % beobachtet. Für Co zeigte das indirekte Bioleaching mit 15,8 % einen leichten Vorteil gegenüber dem direkten Verfahren (12,0 %). Demgegenüber zeigt Mn im direkten Bioleaching mit 35,6 % deutlich höherer Laugungseffizienzen als im indirekten Vergleichsversuch. Dies deutet darauf hin, dass lebende *A. thiooxidans*-Zellen neben der säureinduzierten Metalllösung zusätzliche metabolisch bedingte Reduktionsprozesse an Manganoxiden fördern könnten. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tab.3: Laugungseffizienzen der direkten sowie indirekten Versuche mit *G. oxydans* und *At. thiooxidans* auf NMC-Schwarzmasse

Element	***Gluconobacter oxydans***				***Acidithiobacillus thiooxidans***			
	Direkt		Indirekt		Direkt		Indirekt	
	LE (%)	σ (%)	LE (%)	σ (%)	LE (%)	σ (%)	LE (%)	σ (%)
Li	55,38	3,84	66,84	4,91	34,01	0,16	31,02	0,03
Ni	10,11	2,32	54,47	4,45	6,31	0,72	6,23	0,27
Co	22,17	3,38	80,87	4,36	12,04	1,36	15,82	2,18
Mn	63,14	2,25	94,77	5,95	35,59	4,12	23,43	3,17
Cu	3,87	1,05	14,59	1,56	34,98	0,54	36,18	0,41
Al	26,52	6,45	40,91	2,77	5,25	0,20	7,67	1,32

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse das Potenzial beider Bioleaching-Systeme für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Während *Gluconobacter oxydans* insbesondere im indirekten Bioleaching hohe Metallrückgewinnungsraten erzielt, erreicht *Acidithiobacillus thiooxidans* Auslaugungseffizienzen, die mit einer Laugung unter Einsatz technischer Schwefelsäure vergleichbar sind [10].

3.2 *Biolaugungsversuche mit LFP*

Um die beiden betrachteten Szenarien ohne Verfälschungen durch das Verunreinigungsspektrum realer Schwarzmassen bewerten zu können, wird in dieser Arbeit gezielt LFP-Kathodenmaterial als Ausgangsmaterial eingesetzt. Für dessen hydrometallurgisches Recycling ist neben einer hohen Laugungsausbeute insbesondere die Selektivität der Metalllösung von entscheidender Bedeutung. Hierbei werden grundsätzlich zwei Strategien verfolgt: die selektive Extraktion von Lithium bei gleichzeitigem Verbleib des Eisens als schwerlösliches Eisenphosphat oder die vollständige Auflösung des Lithium-Eisenphosphats mit anschließender Trennung der gelösten Metalle. Aufgrund der vergleichsweise schwachen organischen Säuren, die von *Gluconobacter oxydans* gebildet werden, ist eine bevorzugte Lithiumlösung zu erwarten.
Die experimentellen Ergebnisse zeigen jedoch ein gegenteiliges Verhalten. Mit Lithiumausbeuten von lediglich 9,1 % bzw. 17,9 % und Laugungseffizienzen für Eisen von 42,5 % bzw. 67,4 % überwog in beiden Bioleaching-Ansätzen die Mobilisierung von Fe deutlich gegenüber Li. Eine selektive Lithiumextraktion konnte unter den gewählten Versuchsbedingungen folglich nicht erreicht werden, siehe Tabelle 4.

Tab. 4: Laugungseffizienzen der direkten sowie indirekten Versuche mit *G. oxydans* auf LFP-Kathodenmaterial

Element	***Gluconobacter oxydans***			
	Direkt		Indirekt	
	LE (%)	σ (%)	LE (%)	σ (%)
Li	9.18	0.52	17.88	0.17
Fe	42.53	3.42	67.37	4.02

Mögliche Ursachen liegen in den gewählten Prozessbedingungen sowie den Eigenschaften der gebildeten Gluconsäure. Diese bildet lösliche Komplexe sowohl mit Fe^{2+} als auch Fe^{3+} und begünstigt dadurch bevorzugt die Eisenlösung. Gleichzeitig ist Glucose, das Substrat von *G. oxydans*, ein Reduktionsmittel. Aufgrund der unvollständigen Oxidation zu Gluconsäure liegt das Redoxpotenzial der Lösung in jenem Bereich, in dem $LiFePO_4$ thermodynamisch stabil ist. Unter diesen Bedingungen wird die oxidative Auflösung des Kathodenmaterials gehemmt, sodass die Metallmobilisierung überwiegend durch Komplexierung mit Gluconat erfolgt. Die insgesamt geringen Lithiumausbeuten stützen diese Annahme.
Für eine praktische Anwendung im Recycling von LFP-Kathodenmaterial erscheint das untersuchte Verfahren mit den gewählten Parametern derzeit nur eingeschränkt geeignet, da weder eine selektive Lithiumextraktion noch eine ausreichend hohe Lithiumausbeute erzielt werden konnte. Zukünftige Arbeiten sollten sich auf die Optimierung der Prozessparameter, insbesondere der Kultivierungsbedingungen, sowie auf die Kombination des indirekten Bioleaching-Ansatzes mit geeigneten Oxidationsmitteln konzentrieren. Darüber hinaus stellt die Untersuchung alternativer Mikroorganismen oder mikrobieller Konsortien einen vielversprechenden Ansatz zur Verbesserung der Selektivität und Laugungseffizienz dar. Zusammenfassung und Ausblick
Die vorliegende Arbeit zeigt, dass biohydrometallurgische Verfahren ein vielversprechendes Potenzial für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien besitzen. Insbesondere indirekte Ansatz mit *G. oxydans* erzielte bei NMC-Schwarzmasse deutlich höhere Metallrückgewinnungsraten als der direkte Ansatz, während *At. thiooxidans* Auslaugungseffizienzen erreichte, die mit einer Laugung mittels technischer Schwefelsäure vergleichbar sind und dadurch ebenfalls als vielversprechend anzusehen sind. Für LFP-Kathodenmaterial konnten unter den gewählten

Versuchsbedingungen hingegen weder eine selektive Lithiumextraktion noch ausreichende Lithiumausbeuten erzielt werden. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Leistungsfähigkeit biometallurgischer Verfahren maßgeblich vom Batteriematerial, den eingesetzten Mikroorganismen und den Prozessbedingungen abhängt.
Die erzielten Ergebnisse bilden eine belastbare Grundlage für die Weiterentwicklung biohydrometallurgischer Verfahren im Batterierecycling. Aufbauend darauf sollten zukünftige Arbeiten die Prozessführung, das mikrobielle Wachstum und die Metabolitenproduktion gezielt optimieren. Die Integration solcher biometallurgischer Prozessschritte in bestehende Recyclingrouten bietet ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Selektivität zukünftiger Batterierecyclingprozesse.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG: L 191/1 (2023).
[2] Yang Q. et al.: Emerging Strategies for Sustainable Holistic Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries. Advanced Functional Materials, 36 (2026) online proceedings.
[3] An L. (Hg.): Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries. Springer International Publishing, Cham (2019).
[4] Mishra D. et al.: Bioleaching of metals from spent lithium ion secondary batteries using Acidithiobacillus ferrooxidans. Waste management (New York, N.Y.), 28 (2008), 333–338.
[5] Moazzam P. et al.: Lithium bioleaching: An emerging approach for the recovery of Li from spent lithium ion batteries. Chemosphere, 277 (2021), 130196.
[6] Schippers A. and S. Hedrich: Biohydrometallurgie zum Metallrecycling. Chemie Ingenieur Technik, 90 (2018), 1257.
[7] Lerchbammer R., E. Gerold and H. Antrekowitsch: High yield gluconic acid leaching and recovery of valuable metals from end-of-life lithium-ion batteries. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 12 (2025), 101271.
[8] Bahaloo-Horeh N., F. Vakilchap and S. M. Mousavi: Bio-hydrometallurgical Methods For Recycling Spent Lithium-Ion Batteries. In: An, L. (Hg.): Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries. Cham: Springer International Publishing, 161–197.
[9] Panda P. P. et al.: A Sustainable Process for the Extraction of Critical Metals from Spent Lithium-Ion Batteries Through Bioleaching: A Review. Transactions of the Indian Institute of Metals, 79 (2026) online proceedings.
[10] Mandl M. M., R. Lerchbammer and E. Gerold: Bioleaching of Lithium-Ion Battery Black Mass: A Comparative Study on Gluconobacter oxydans and Acidithiobacillus thiooxidans. Metals, 15 (2025), 1112.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Dr.mont. Reinhard Lerchbammer
reinhard.lerchbammer@unileoben.ac.at
CD-Labor für fortschrittliches Recycling von Lithium-Ionen-Batterien
Montanuniversität Leoben/Lehrstuhl f. Nichteisenmetallurgie

Chemical characterisation of black mass resulted from crushing lithium-ion-batteries – Interlaboratory comparison study of the characterisation of black mass

Cornelia Rutkowski[1] & Thomas Nigl[1]
[1)] Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Der schnelle Hochlauf der Elektromobilität erhöht den Druck auf effiziente und verlässliche Recyclingprozesse für Lithium-Ionen-Batterien. Die Europäische Batterieverordnung verschärft Vorgaben zu Recyclingeffizienz, Materialrückgewinnung und Datenqualität und macht damit belastbare Analytik unverzichtbar. Im Fokus des Beitrags steht die „Schwarzmasse“, deren komplexe Zusammensetzung die Vergleichbarkeit von Ergebnissen erschwert. In einer interdisziplinären Vergleichsstudie mit Universitäten und Industrie wurden gängige Verfahren (u. a. XRF, XRD, ICP-OES/MS, Chromatographie, Elementaranalyse) ohne eng gefasste Vorgaben angewendet. Die Ergebnisse zeigen deutliche Abweichungen zwischen Laboren und Methoden. Aufbauend auf statistischer Auswertung und Verfahrensvalidierung formulieren wir Empfehlungen zur Standardisierung, insbesondere für nasschemischen Aufschlüsse als Grundlage für die Berechnungen der Recyclingkennzahlen gemäß Europäische Batterieverordnung.

1 EINLEITUNG UND REGULATORISCHER RAHMEN

Der rasche Hochlauf der Elektromobilität und der Ausbau erneuerbarer Energien haben die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in den letzten Jahren stark erhöht. Parallel wächst die Menge an Altbatterien, die einer umwelt- und ressourcenschonenden Verwertung zuzuführen sind. Vor diesem Hintergrund schärft die Europäische Batterieverordnung (EBR 2023) die Anforderungen an Recyclingeffizienz, Materialrückgewinnung und Datenqualität. Bis Ende 2030 ist eine Recyclingeffizienz von mindestens 70 % der Masse des Batteriesystems gefordert, bis Ende 2031 sind für die Zielmaterialien Kobalt, Kupfer, Blei und Nickel jeweils 95 % und für Lithium 80 % Rückgewinnung zu erreichen. Die Verordnung verlangt zudem eine nachvollziehbare Datenerhebung zu Input- und Outputströmen, deren Qualität anhand der Kriterien Vollständigkeit, Genauigkeit und Konsistenz zu beurteilen und durch unabhängige Dritte zu verifizieren ist.

Zentral für die Erfüllung dieser Vorgaben ist die verlässliche Charakterisierung der sogenannten „Schwarzmasse“, eines komplexen Mischmaterials aus zerkleinerten Elektroden- und Zellkomponenten, das in der Regel den Ausgangspunkt der hydrometallurgischen Aufbereitung bildet. Die Schwarzmasse weist erhebliche Inhomogenitäten hinsichtlich Partikelgrößen, Phasen, Bindemittel- und Elektrolytresten auf. Diese Heterogenität erschwert eine repräsentative Probenahme ebenso wie eine präzise, matrixrobuste Quantifizierung von Haupt- und Spurenelementen. Gleichzeitig bestimmt die analytische Bestimmung der chemischen Zusammensetzung direkt die Berechnung der regulatorischen Kennzahlen. Methodische Verzerrungen bei Probenvorbereitung, Aufschluss und Messung schlagen somit unmittelbar auf rRE- und rRM-Ergebnisse durch.

Hinzu kommen prozessuale und informationelle Hürden. Die Vielfalt an Batteriearchitekturen, Fügetechniken und Materialkombinationen erschwert standardisierte Vorbehandlungs- und Demontageschritte. Fehlende oder proprietäre Informationen zur Zellchemie und zum Aufbau der Packs behindern eine zielgerichtete Trennung und führen zu schwer kontrollierbarer Heterogenität in den Inputströmen der Aufbereitung.

In der Praxis werden unterschiedliche analytische Pfade eingesetzt, darunter Röntgenfluoreszenz (XRF/pXRF) als schnelles Screening, Röntgendiffraktometrie (XRD) zur Phasenidentifikation sowie nasschemische Aufschlüsse mit nachfolgender optischer Emissionsspektrometrie (ICP-OES) oder Massenspektrometrie (ICP-MS) zur Quantifizierung der Elementgehalte. Während portable XRF-Systeme mit geringerem Geräteaufwand, niedrigen Kosten und hoher Messgeschwindigkeit punkten, bleiben sie ohne belastbare Standards, angesichts strahlenschutzrechtlicher Rahmenbedingungen und aufgrund unzureichender Präzision hinter den Nutzeranforderungen zurück. Demgegenüber erreichen nasschemische Aufschlüsse mit ICP-OES im Allgemeinen die geforderte Genauigkeit, setzen aber einheitliche, validierte Protokolle voraus, um laborübergreifende Vergleichbarkeit sicherzustellen.

Vor diesem Hintergrund verfolgt unsere Arbeit zwei Ziele: (1) Erstens, die analytische Praxis zur Charakterisierung der Schwarzmasse systematisch zu vergleichen, methodische Grenzen sichtbar zu machen und die Ursachen für Laborstreuungen aufzuarbeiten. (2) Zweitens, konkrete, Empfehlungen für standardisierte Analytik abzuleiten, die als Grundlage für die Berechnung der regulatorischen Kennzahlen dienen können.

2 METHODIK

Zur Identifizierung der Benutzeranforderungen an eine Analysemethode zur Charakterisierung von Schwarzmasse sendeten wir einen Fragekatalog an Universitäten und Industrien mit den Schwerpunkten die Quanti- und Qualifizierung der Hauptelemente und der Verunreinigungen, die benötigten Chemikalien und das Laborequipment, sowie die Praktikabilität und Umsetzbarkeit.

Zur Darstellung des derzeitigen Vorgehens der Analyse von Schwarzmasse wurde eine Vergleichsstudie mit Universitäten und Industriepartner abgehalten. Verglichen wurden insbesondere Probenvorbereitung, Aufschlussbedingungen und Messmethodik. Die Auswertung fokussierte Wiederhol- und Vergleichspräzision, systematische Abweichungen und methodische Anwendungsgrenzen.

Nach Ausschluss ungeeigneter Analysemethoden angewendet in der Vergleichsstudie wurden die verbliebenen Analysemethoden am akkreditierten Labor des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und -wirtschaft der Montanuniversität nachgestellt.

Anhand der erhaltenen Resultate der Benutzerumfrage wurden die Analysemethoden angewendet in der Vergleichsstudie durch eine Bewertungsskala beurteilt.

Um die Anwendbarkeit der Analysemethoden zu testen, kam es zur Analysierung weitere Schwarzmasse mit unterschiedlicher Zusammensetzung.

3 RESULTATE

Der Methodenvergleich zeigt hohe Abweichungen zwischen den Laboren, die primär auf methodische Unterschiede bei Probenvorbereitung und Aufschluss zurückzuführen sind. Innerhalb eines Labors lieferten nasschemische Aufschlüsse Ergebnisse mit geringer Streuung. XRF-gestützte Verfahren sind sensitiv gegenüber Matrix- und Korngrößeneffekten und bedürfen strenger Homogenisierung und Kalibrierung. ICP-OES/MS liefert robuste Quantifizierung, setzt aber einen vollständigen Aufschluss voraus. Unvollständige Aufschlüsse oder Filterverluste führen zu Untererfassung. XRD bietet Phaseninformation, ist jedoch bei komplexer Matrix semi-quantitativ.

Teilnehmende bevorzugen kostengünstige, schnelle Verfahren mit geringem Gerätebedarf, etwa portable Röntgenfluoreszenz (pXRF). pXRF erfüllt jedoch die Anforderungen nicht, da standardisierte Verfahren fehlen, strahlenschutzrechtliche Qualifikationen erforderlich sind und die geforderte Präzision nicht erreicht wird. Da Präzision für die Anwender oberste Priorität hat, ist ICP-OES die bevorzugte Methode zur Charakterisierung der Schwarzmasse.

Für den nasschemischen Aufschluss vor einer ICP-OES Analyse wurde aqua-regia in der Industrie als Top-Wahl genannt. Im Laborvergleich zeigen unterschiedliche analytische Ansätze große Abweichungen. Die Präzision zwischen Laboren wird maßgeblich durch methodische Unterschiede beeinflusst. Im Methodenvergleich zeigen nasschemische Aufschlüsse bei hausinterner Reproduktion geringe Abweichungen. Zusammengenommen stützen die Ergebnisse den Einsatz aqua-regia-basierter Aufschlüsse zur konsistenten Quantifizierung der Hauptelemente Cu, Fe, Ni und Li in allen untersuchten Schwarzmassen.

Aqua regia ist in der Umweltanalytik für Metalle in Boden, Abfall, Sedimenten und Ersatzbrennstoffen etabliert. Der nasschemische Aufschluss ermöglicht eine Analyse komplexer Stoffzusammensetzungen wie Schwarzmasse und unterstützt regulatorische und politische Leitplanken sowie die wirtschaftliche Skalierung. In der Batterierecyclingindustrie ist ICP-OES der aktuelle Stand der Technik zur Bestimmung von Metall- und Elementgehalten.

Unsere Ergebnisse unterstreichen den dringenden Bedarf an harmonisierten, standardisierten analytischen Verfahren, um verlässliche Recyclingeffizienzberechnungen und Regulatorik konforme Berichterstattung sicherzustellen.
Damit die für die EBR geforderte Recyclingeffizienzrate reproduzierbar und vergleichbar berechnet werden kann, muss ein verbindliches Verfahren festgelegt und rechtlich verankert werden.

Die enge Zusammenarbeit mit Industrie und Forschungseinrichtungen in Zentraleuropa bildet die Basis für eine europaweite Umsetzung. Ein einheitliches, evidenzbasiertes Analyseverfahren für Schwarzmasse eröffnet regulatorische und politische Orientierung und erleichtert die wirtschaftliche Skalierung im Kontext der neuen EU-Batterieverordnung.

3.1 Beitrag des Projekts „MoLIBity“

Das Projekt MoLIBity bewertet die Eignung analytischer Verfahren zur Charakterisierung von Schwarzmasseasse über Vergleichsstudien und eine methodische Validierung. Es liefert belastbare Bausteine für SOPs, Unsicherheitsbudgets und Datenketten, die direkt in die Berechnung der rRE und rRM einfließen können.

4 DANKSAGUNG

Das Forschungsprojekt MoLIBity ist gefördert durch die Forschungsförderungsgesellschaft mbH, FFG (FFG No. FO999899505). Die Autoren möchte die Möglichkeit nutzen sich bei der Fördergesellschaft und den Projektpartner zu bedanken, Saubermacher Dienstleistungs AG, BOKU University, Treibacher Industrie AG, Fraunhofer IKTS und Fraunhofer Austria.

LITERATURVERZEICHNIS

Kommission, E. (2019). Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschus der Regionen. Brüssel. Europäische Kommission.

Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries. Office Journal of the European Union, S. 117. European Union.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Dr.mont. Thomas Nigl
thomas.nigl@unileoben.ac.at
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben

Developing TEO – advanced waste incineration and residual management for the municipality of Ljubljana

Nora Fricko[1], Dominik Gappmaier[1], Bernhard Kronberger[1], Franz Peter Walder[1] & Gregor Golja[2]
[1)] CONENGA Group, Vienna, Austria
[2)] Energetika Ljubljana, Ljubljana, Slovenia

ABSTRACT: The development of the TEO waste-to-energy (WtE) facility in Ljubljana represents a key step toward the decarbonization of district heating and the modernization of waste management infrastructure in Slovenia. Designed as a substitute for coal-fired heat generation, the project integrates advanced fluidized bed combustion technology with state-of-the-art flue gas cleaning and energy recovery systems. Based on a multidisciplinary planning approach involving technical, economic, legal, and environmental stakeholders, the project emphasizes early-stage alignment and iterative validation of key design parameters to minimize interface risks and reduce lifecycle costs. The plant combines efficient CHP operation with comprehensive flue gas treatment to meet stringent emission standards. Optimized fuel preparation and integration with existing infrastructure further enhance system performance. Additional measures, such as sewage sludge integration and flue gas condensation, are evaluated to increase efficiency and resource recovery. Overall, the project demonstrates how structured project management and integrated engineering enable a flexible, efficient, and future-oriented WtE facility.

1 COMBINING PERSPECTIVES: DISCUSSIONS IN A MULTIDISCIPLINARY TEAM FOR BEST RESULTS

In March 2025, the CONENGA Group joined an international and multidisciplinary team of experts comprising civil and environmental engineers, engineers from the existing waste treatment facility of Ljubljana (RCERO), legal specialists, and the economically responsible managers of Energetika Ljubljana. CONENGA's role was to elaborate the waste incineration technological solution agreed upon by the project partners up to that point and to contribute additional insights on incineration technology, flue gas treatment and overall plant integration, thereby broadening the technological basis for decision-making. Intensive in-person meetings and structured stakeholder involvement created a collaborative environment in which technical, legal, economic, and environmental perspectives could be aligned, ensuring broad stakeholder support and ownership of the project outcomes. In February 2026, Energetika Ljubljana initiated the application process for the waste-incineration concession, marking a significant regulatory milestone. The preparatory work for the Environmental Impact Assessment (EIA) and the subsequent tendering process is ongoing, representing the next major steps toward project realization.

2 THINKING AHEAD: IDENTIFYING BEST PRACTICES FOR ENVIRONMENT AND SOCIETY IN THE ECONOMIC CONTEXT

The project is guided by a clear and ambitious objective – to establish a new benchmark for waste incineration facilities across Central and South-Eastern Europe. In line with this goal, the plant is designed to meet the highest environmental and technological standards, comparable to renowned European facilities such as Copenhagen's Amager Bakke and Vienna's Spittelau, both of which exemplify state-of-the-art, environmentally integrated infrastructure. In addition to these technological aspects, CONENGA believes that systems engineering is an important approach for state-of-the-art infrastructure projects. This means focusing not only on technological system design but also on the methodology, stakeholder engagement, and optimal project management.

By combining advanced engineering with strong sustainability principles, Ljubljana aims not only to modernize its energy and waste systems but also to position itself as a regional leader in climate-conscious urban development.

This is further reflected in the fact that a final decision regarding the plant's location is still pending. The site selection process involves carefully balancing competing optimization criteria. On the one hand, priority is given to minimizing transport distances to waste pre-treatment facilities and landfills, thereby reducing logistical effort, costs, and associated emissions. On the other hand, consideration is given to sites with well-developed existing infrastructure, particularly in terms of power and heat networks as well as administrative facilities, which can significantly improve operational efficiency and integration into the urban energy system. The final decision will therefore depend on achieving the most effective trade-off between logistical efficiency and infrastructure availability, ensuring both environmental and economic viability in the long term.

3 FLYING HIGH: MAINTAINING A TECHNOLOGICAL OVERVIEW TO REDUCE COSTS IN LATER STAGES

Technicians often tend to become deeply immersed in their specific field of expertise, focusing on detailed aspects at a very early stage rather than maintaining a broader, system-oriented perspective. As a result, interfaces between different engineering disciplines – e.g. those between the combustion system and the steam cycle - frequently pose substantial challenges in complex projects.

Misalignments in assumptions, design parameters, or communication across disciplines can lead to inefficiencies or technical conflicts if not properly managed. This is of particular concern given that the "Cost of Change Curve" developed by (Boehm, 1981) for software engineering is widely applicable to a broad range of engineering projects, demonstrating that the cost of implementing changes increases significantly or even exponentially as a project progresses. Consequently, errors or inconsistencies identified only at later stages can result in disproportionately high effort and expense.

These risks are mitigated through the involvement of a multidisciplinary team, ensuring that diverse perspectives are incorporated from the outset. Additionally, the project follows an iterative approach in which fundamental parameters - such as input mass flows, key process conditions, and emission limits - are repeatedly reviewed and validated. This structured and collaborative methodology helps to detect inconsistencies early, enhances cross-disciplinary alignment, and ultimately contributes to a more robust, efficient, and cost-effective system design.

4 DIGGING DEEPER: DETAILED KNOWLEDGE FOR COHERENT PLANT OPERATION FROM FUEL PREPARATION TO RESIDUAL MANAGEMENT

This section provides a detailed description of the plant and its operation; a technological overview is presented in Fig. 1.

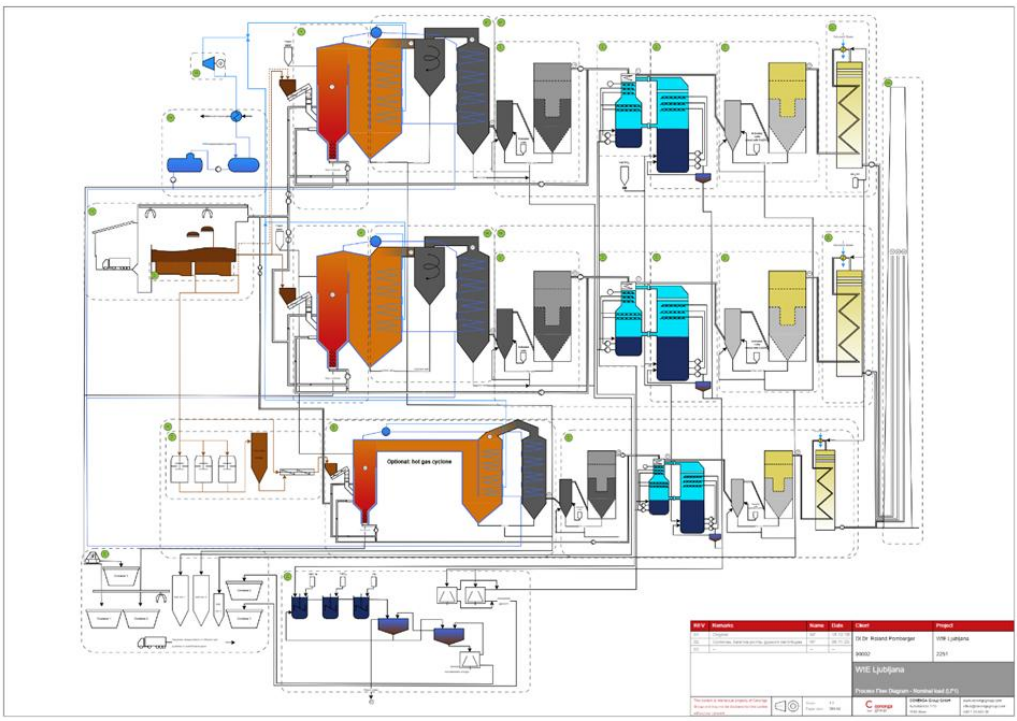


Fig. 1: Process diagram for TEO

4.1 Fuel preparation, fuel logistics

The existing RCERO facility is being comprehensively redesigned and modernized as part of the current project, with a particular focus on ensuring an optimized fuel input to the two incineration lines at TEO. This includes measures such as limiting particle size, reducing the share of incombustible materials, and removing scrap fractions to improve the overall fuel quality and combustion efficiency. As a result of this upgrading process, one key output is the production of RDF (Refuse-Derived Fuel), a term that already reflects the comparatively high calorific value of this processed waste stream.

In parallel, a second output fraction is digestate, which is generated from the fraction of incoming waste with a higher organic content through biological treatment processes.

Both resulting fractions - RDF and digestate - are subsequently transferred to the TEO facility and stored in a dedicated bunker system. The bunker is dimensioned to provide sufficient storage capacity for up to 28 days of continuous plant operation without requiring additional deliveries from RCERO, thereby ensuring a high level of operational flexibility and supply security.

To prevent emissions of dust and odors, the bunker and all associated fuel reception areas are maintained under negative pressure. The extracted air is not discharged directly to the

environment but instead is utilized as primary combustion air, thereby contributing to both emission control and process efficiency.

4.2 Combustion and steam cycle

Prior to incineration, the fuel is homogenized within the bunker and then metered into one of two parallel incineration lines. These lines are designed for a total throughput of approximately 130,000 tons per year, corresponding to a nominal thermal input of about 36.5 MW per line (73 MW in total). This configuration ensures stable plant operation, optimized energy recovery, and compliance with stringent environmental standards.

The waste incineration process is implemented using fluidized bed reactors, characterized by intensive mixing between the fuel and the bed material. Compared to conventional grate firing systems, fluidized bed combustion requires a homogeneous fuel with controlled particle size distribution, but offers advantages in terms of efficiency and emission performance. The uniform temperature distribution enables highly efficient combustion and reduces pollutant formation, particularly thermal NO_x, due to staged combustion conditions.

The thermal energy released in the combustion chamber is transferred to the water–steam cycle via the flue gas path. Initially, heat is transferred to membrane walls, leading to evaporation of pressurized feedwater from the steam drum. Downstream heat exchangers, including superheaters and an economizer, further raise steam temperature and preheat the feedwater. The resulting live steam, generated at approximately 64 bar and 420 °C, is routed to a back-pressure turbine, where it is expanded to generate electricity while maintaining a pressure level suitable for heat utilization.

The exhaust steam is subsequently used for district heating, forming an efficient combined heat and power (CHP) process. Low-pressure steam supplies internal consumers, while medium-pressure steam can be extracted for external use. As a back-pressure system, steam is primarily utilized thermally, with surplus steam occasionally condensed in air-cooled condensers to ensure operational flexibility.

The plant is optimized for heat-driven operation, with electricity generation as a secondary output. The condensate is recirculated via the economizer and feedwater pumps, closing the cycle. Under nominal conditions, the facility supplies approximately 47.2 MW of thermal energy and around 12.5 MW of electrical power, reflecting a high overall efficiency typical of modern CHP-based waste-to-energy plants.

4.3 Flue gas cleaning

Considering the historical development of waste incineration across Europe, it becomes evident that requirements for flue gas cleaning have increased significantly, driven by progressively stricter environmental regulations and a growing awareness of emission impacts. As a consequence, flue gas treatment now represents a major share of both plant footprint and capital expenditure, accounting for a substantial portion of the overall investment as well as spatial requirements within the facility. In the case of TEO Ljubljana, each incineration line is equipped with a comprehensive, multi-stage flue gas cleaning system designed to ensure compliance with the most stringent emission standards, setting a novel standard for best available technology (BAT).

Immediately downstream of the boiler's economizer section, a hot gas cyclone is installed, enabling the initial separation of coarse particulates at flue gas temperatures exceeding 400 °C. At this elevated temperature level, the risk of de-novo formation of dioxins and similar compounds is effectively minimized. Furthermore, heavy metals remain in the gaseous phase under these

conditions and have not yet condensed onto particulate matter, allowing the resulting cyclone ash - commonly referred to as coarse ash - to be classified as non-hazardous. Following this initial dedusting step, the flue gas is routed to a first baghouse filter, where activated coke is injected as an adsorbent for volatile heavy metals and products of incomplete combustion. Due to the accumulation of these hazardous substances, the resulting filter residues are classified as hazardous waste. To ensure safe operation and to mitigate the risk of self-ignition of the activated coke, a controlled portion of the ash–coke mixture is continuously recirculated within the system.

Subsequent to the dry treatment stage, the flue gas undergoes wet chemical cleaning in a two-stage scrubber system. In the first stage, the gas is cooled and hydrogen chloride (HCl) is removed through counter-current absorption with water. In the second stage, sulfur dioxide (SO_2) is eliminated, typically by precipitation as gypsum, which is then removed from the process. The resulting wastewater streams from both scrubbers are treated in a dedicated on-site wastewater treatment system, where they undergo precipitation, solid-liquid separation, and neutralization prior to discharge. To further reduce trace pollutants, a second baghouse filter is installed downstream of the scrubbers, again utilizing activated coke to capture any remaining volatile contaminants.

As a final step in the flue gas cleaning chain, nitrogen oxides (NO_x) are reduced in a Selective Catalytic Reduction (SCR) unit. While staged combustion within the furnace already contributes to lowering thermal NO_x formation, nitrogen bound within the fuel inevitably still leads to additional NO_x emissions that must be treated downstream. In the SCR system, the flue gas is reheated to the optimal operating temperature of the catalyst, typically using saturated high-pressure steam. An ammonia solution is then injected as a reducing agent, enabling the catalytic conversion of NO_x into harmless nitrogen and water vapor before the cleaned gas is released via the stack. As a result of this comprehensive treatment sequence, emissions from the TEO facility are expected to remain well within, and in many cases below, the applicable Best Available Techniques (Neuwahl et al., 2019) emission levels for all relevant pollutants.

4.4 Waste water treatment and solid residuals

In parallel to air pollution control, extensive measures are implemented to minimize emissions to water. An in-house wastewater treatment plant is incorporated into the overall design, ensuring that all process water streams—particularly those originating from the scrubbers—are treated through sedimentation, chemical precipitation, and subsequent sludge dewatering, typically by centrifugation. Following treatment, the water quality is well below the requirements for indirect discharge into the public sewer system, also BAT standard.

A further advantage of the incineration process is the significant reduction in waste volume. The residual materials, including coarse ash and stabilized residues from wastewater treatment, are largely inert and no longer prone to emitting climate-relevant gases such as methane or nitrous oxide when landfilled. Only a relatively small fraction of the residues, primarily fine or filter ash, is classified as hazardous due to its elevated heavy metal content. This fraction requires prior stabilization, typically through immobilization with cement, before final disposal. To ensure safe handling and logistical flexibility, the TEO facility provides adequate on-site storage capacity for all residual streams in dedicated containers and silos, prior to their transfer for further treatment or final disposal.

5 GOING BEYOND: EXPLORING OPTIONAL IMPROVEMENTS

As indicated in Fig. 1, the integration of a dedicated, smaller incineration line for sewage sludge is being considered as part of the overall plant concept. Taking developments in regulatory requirements for phosphorus recovery into account, as well as the current state of technological

readiness, a centralized treatment and recovery facility serving a significant portion of Slovenia appears both appropriate and advantageous. Although the direct contribution of sewage sludge incineration to the plant's overall energy output remains relatively limited - primarily due to the high energy demand associated with complete sludge drying - the integration of this process within the waste-to-energy (WtE) facility provides several important operational synergies. For instance, the concept allows for the temporary co-incineration of sewage sludge in the main waste lines during maintenance periods, thereby enhancing operational flexibility. Furthermore, the planned arrangement of sludge storage beneath the main bunker building ensures that exhaust air from sludge handling can be routed through the existing bunker ventilation system, eliminating the need for additional dedicated air treatment infrastructure.

In addition to process integration, further efficiency improvements can be achieved through the implementation of flue gas condensation. This technology enables a significant increase in heat recovery from the flue gas stream, albeit at the expense of higher auxiliary electricity consumption. Preliminary estimations indicate that the application of flue gas condensation could allow the TEO plant to achieve an R1 efficiency value well above 1, reinforcing its qualification as a highly efficient energy recovery facility. Multiple design approaches exist for incorporating flue gas condensation into the plant, ranging from retrofitting into existing wet flue gas cleaning systems to fully integrated solutions that are considered from the outset of plant design. Prominent examples such as the Amager Bakke facility in Copenhagen demonstrate the advantages of early integration, both in terms of performance and system coherence (Ramboll, 2012). Regardless of the specific implementation strategy, the effectiveness of flue gas condensation is strongly dependent on the temperature level of the district heating return flow: the lower the return temperature, the greater the achievable heat recovery and overall efficiency gain.

6 CONCLUSION

The TEO project demonstrates how modern waste-to-energy facilities can combine advanced combustion technology, efficient energy recovery, and state-of-the-art emission control to meet stringent environmental and economic requirements.
By integrating multidisciplinary expertise and maintaining a system-oriented design approach, the project minimizes interface risks and ensures robust overall performance. In addition, the consideration of future enhancements such as sewage sludge integration and flue gas condensation highlights the plant's flexibility and long-term sustainability. As such, TEO has the potential to set a new benchmark for waste incineration in Central and South-Eastern Europe.

REFERENCES

Boehm, B. (1981). *Software Engineering Economics.* Prentice-Hall.

Neuwahl, F., Cusano, G., Benavides, J., Holbrook, S., & Roudier, S. (2019). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration.* Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/761437

Ramboll. (2012, October 15). *Waste-to-energy CHP - Amager Bakke Copenhagen*. Retrieved from https://stateofgreen.com/en/solutions/waste-to-energy-chp-amager-bakke-copenhagen/

CONTACT

DI Nora Fricko
n.fricko@conengagroup.com
+43 699 123 500 10
Senior Process Engineer
CONENGA Group GmbH
www.conengagroup.com

Kupferspeziierung in Rostaschen aus der Verbrennung von Siedlungsabfällen

Philipp Hänggi[1], Gisela Weibel[1], Mirjam Wolffers[1], Alexander Weh[1], Rainer Dähn[2] & Sergey Churakov[1,2]
[1)] Universität Bern, Fachstelle Sekundärrohstoffe, Bern, Schweiz
[2)] Paul Scherrer Institut PSI, Laboratory for Waste Management, Villigen, Schweiz

KURZFASSUNG: Kupfer zählt zu den umweltrelevanten Spurenelementen in Rostaschen aus der Müllverwertung, wobei dessen Freisetzung massgeblich von der chemischen Bindungsform abhängt. Während bisher vor allem der Einfluss der Verbrennung und der anschliessenden Alterung untersucht wurde, ist über den Einfluss der nachgeschalteten Aufbereitung auf die Kupferspeziierung bislang wenig bekannt. In der vorliegenden Arbeit wurden fünf Rostaschen aus Schweizer Müllverwertungsanlagen untersucht, die unterschiedliche Austragungs- und Aufbereitungsverfahren repräsentieren. Die Mineralogie wurde mittels Röntgendiffraktometrie und die Kupferspeziierung mittels Synchrotron-basierter Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS) untersucht. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede in Mineralogie und Kupferspeziierung. Während Kupferoxide, Kupfersulfide und metallisches Kupfer die dominierenden Spezies darstellen, unterscheiden sich nass und trocken ausgetragene Rostaschen hinsichtlich der Oxidspeziierung deutlich. In nass ausgetragenen Rostaschen dominiert CuO, in trocken ausgetragenen Cu_2O. Dies deutet darauf hin, dass der Wasserkontakt die Oxidation von Cu^+ zu Cu^{2+} fördert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Aufbereitung neben dem Kupfergehalt auch die Speziierung beeinflusst und damit Auswirkungen auf das Freisetzungsverhalten von Kupfer hat.

1 EINLEITUNG

Bei der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen entsteht neben der Filterasche vor allem Rostasche, die rund 20–25 Gew.-% des ursprünglichen Abfallstroms ausmacht (Huber et al. 2020). Aufgrund ihrer mineralischen Zusammensetzung stellt sie grundsätzlich einen potenziellen Sekundärrohstoff dar und könnte beispielsweise als Ersatz für natürliche Gesteinskörnungen eingesetzt werden. In der Schweiz ist eine stoffliche Verwertung der mineralischen Fraktion derzeit jedoch nicht zulässig, da insbesondere die Gesamtgehalte einzelner Schwermetalle die gesetzlichen Grenzwerte überschreiten (VVEA, Stand 1. Januar 2026). Eine besondere Bedeutung kommt dabei Kupfer zu, da es die Grenzwerte regelmässig deutlich überschreitet. Für die tatsächliche Umweltrelevanz ist jedoch nicht allein der Gesamtgehalt entscheidend, sondern auch die chemische Bindungsform des Kupfers. Diese bestimmt massgeblich dessen Löslichkeit, Mobilität und damit das potenzielle Freisetzungsverhalten unter Umweltbedingungen.

Die Bestimmung der Kupferspeziierung in Rostaschen aus der Müllverwertung stellt aufgrund der heterogenen Zusammensetzung und des hohen Anteils amorpher Phasen eine analytische Herausforderung dar. Eine geeignete Methode hierfür ist die Synchrotron-basierte Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS), mit der die lokale chemische Umgebung des Kupfers direkt untersucht werden kann. Frühere Arbeiten zeigen, dass Kupfer in Rostaschen in unterschiedlichen Bindungsformen wie metallischem Kupfer, Oxiden und Sulfiden vorliegt. Während der Einfluss der Verbrennungsbedingungen sowie der Alterung bereits mehrfach untersucht wurde, ist bislang wenig darüber bekannt, wie sich unterschiedliche Austragungs- und Aufbereitungsverfahren auf die Kupferspeziierung auswirken. Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Untersuchung von fünf industriell aufbereiteten Schweizer Rostaschen unterschiedlicher Prozessrouten. Neben der Gesamtchemie und Mineralogie steht insbesondere die Frage im Mittelpunkt, inwieweit die Aufbereitung die chemische Bindungsform des Kupfers beeinflusst.

2 MATERIALIEN UND METHODEN

Für die Untersuchungen wurden fünf Rostaschen aus Schweizer Müllverwertungsanlagen ausgewählt, die unterschiedliche Austragungs- und Aufbereitungsverfahren repräsentieren. Alle Anlagen arbeiten mit Rostfeuerungen. Die Proben wurden direkt nach der jeweiligen Aufbereitung entnommen und als Sammelproben über mehrere Stunden gewonnen, um repräsentative Materialien zu erhalten. Eine Übersicht der untersuchten Rostaschen sowie der jeweiligen Austragungs- und Aufbereitungsverfahren und des Massenanteils der untersuchten Fraktion an der ursprünglichen Rohrostasche ist in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Übersicht der untersuchten Rostaschen (BA1-5) mit Austragungs- und Aufbereitungsverfahren

	Austrag	Aufbereitung	Anteil an der Rohschlacke [%]
BA 1	Nassaustrag	Brechen, Magnet- und Wirbelstromabscheidung	80
BA 2	Nassaustrag	Brechen, Magnet- und Wirbelstromabscheidung	80
BA 3	Nassaustrag	Siebung, Dichtetrennung, Hochspannungs-Pulsfragmentierung, Magnet- und Wirbelstromabscheidung	20
BA 4	Trockenaustrag	Brechen, Magnet- und Wirbelstromabscheidung	13
BA 5	Trockenaustrag	Brechen, Magnet- und Wirbelstromabscheidung, Sensorbasierte Sortierung	5

Die Proben BA1 und BA2 stammen aus einer konventionellen Nassaustragung mit anschliessender trockener mechanischer Aufbereitung einschliesslich Zerkleinerung sowie magnetischer und Wirbelstromabscheidung. BA3 wurde ebenfalls nass ausgetragen, anschliessend jedoch einer erweiterten nassmechanischen Aufbereitung mit Dichtetrennung und Hochspannungs-Pulsfragmentierung unterzogen. Die Proben BA4 und BA5 stammen aus einer Trockenaustragung und wurden vollständig trocken aufbereitet. Für BA5 erfolgte zusätzlich eine sensorbasierte Sortierung, mittels der, durch gezielte Anreicherung heller Körner, eine kiesartige Fraktion produziert wurde. Nach der Trocknung wurden sämtliche Proben auf eine Korngrösse kleiner 0,1 mm vermahlen. Die Gesamtgehalte der Elemente wurden nach Mikrowellenaufschluss mittels ICP-MS bestimmt. Zur mineralogischen Charakterisierung wurde eine quantitative Phasenanalyse mittels Röntgendiffraktometrie und Rietveld-Auswertung durchgeführt. Die Bestimmung der Kupferspeziierung erfolgte mittels Synchrotron-basierter Röntgenabsorptionsspektroskopie (XAS) an der Cu-K-Kante. Die Spektrenauswertung erfolgte durch Linear Combination Fitting (LCF) unter Verwendung eigener sowie in der Literatur veröffentlichter Referenzspektren verschiedener Kupferverbindungen (Lassesson et al. 2014).

3 RESULTATE UND DISKUSSION

Die unterschiedlichen Austragungs- und Aufbereitungsverfahren führten zu deutlichen Unterschieden in der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der untersuchten Rostaschen. Die mittels Röntgendiffraktometrie bestimmten Mineralphasen sind in Tab. 2 zusammengefasst. Alle Proben weisen einen hohen amorphen Anteil von mindestens 60 Gew.-% auf. Die höchsten Gehalte wurden für BA3 und BA5 bestimmt, was auf eine Anreicherung glasreicher und keramischer Partikel während der jeweiligen Aufbereitung hindeutet. Neben der amorphen Phase stellen Quarz und Melilith die wichtigsten kristallinen Bestandteile dar. Auffällig ist der vergleichsweise geringe Melilithgehalt von BA5, der vermutlich auf die sensorbasierte Sortierung zurückzuführen ist, bei der dunklere, schlackenartige Partikel bevorzugt ausgeschleust werden. Gleichzeitig wurden in BA3 und BA5 erhöhte Anteile an Mullit nachgewiesen, was auf eine Anreicherung keramischer Bestandteile schliessen lässt.

Tab. 2: Übersicht der untersuchten Rostaschen mit Austragungs- und Aufbereitungsverfahren

Phase	BA1	BA2	BA3	BA4	BA5
Amorph	60	61	72	60	72
Quarz	10	7	10	15	12
Melilith	10	9	6	7	3
Calcit	4	4	3	2	4
Klinopyroxene	4	3	2	1	2
Feldspate	1	1	2	2	2
Ettringit	3	4	<1	<1	<1
Wollastonit	2	2	<1	2	<1
Larnit	<1	<1	1	3	<1
Mullit	<1	<1	1	<1	2
Magnetit	2	2	<1	<1	<1
Magnesit	1	1	<1	<1	<1
Hämatit	<1	<1	<1	<1	<1

Die Cu-XAS-Spektren der fünf untersuchten Rostaschen sowie eine Auswahl der neu gemessenen Referenzverbindungen sind in Abb. 1 dargestellt. Bereits anhand der Spektren zeigen sich deutliche Ähnlichkeiten zwischen BA1 und BA2 beziehungsweise zwischen BA4 und BA5. Die mittels Linear Combination Fitting (LCF) ermittelten Anteile der einzelnen Cu-Spezies sind in Tab. 3 zusammengefasst. In allen fünf Rostaschen dominieren die Kupferoxide. Der Anteil an metallischem Cu liegt unabhängig von Austragungs- und Aufbereitungsverfahren zwischen 10 und 15 %. Der geringe Anteil an metallischem Kupfer deutet darauf hin, dass das Potenzial einer zusätzlichen Kupferrückgewinnung durch eine reine Optimierung der Metallabscheidung begrenzt ist.

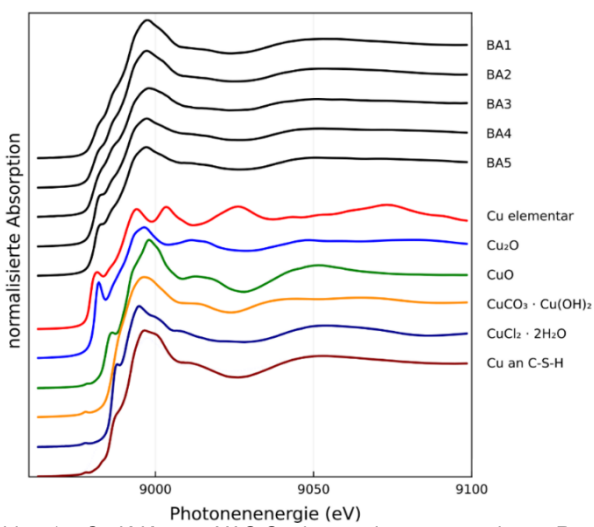


Abb. 1: Cu-K-Kanten-XAS-Spektren der untersuchten Rostaschen und Auswahl neu gemessener Referenzverbindungen

Ein deutlicher Unterschied zeigt sich hingegen bei den Kupferoxiden. Während in den nass ausgetragenen Rostaschen BA1 bis BA3 CuO die dominierende Oxidphase darstellt, überwiegt in den trocken ausgetragenen Rostaschen BA4 und BA5 Cu_2O. Dieser systematische Unterschied spricht dafür, dass der Kontakt mit Wasser während Austragung und Aufbereitung die Oxidation von Cu^+ zu Cu^{2+} begünstigt. Ein vergleichbarer Zusammenhang wurde bereits in früheren XAS-Untersuchungen beschrieben und wird durch die vorliegenden Ergebnisse weiter gestützt.

Tab. 3: Mittels Linear Combination Fitting ermittelte Kupferspeziierung der untersuchten Rostaschen

	BA1	BA2	BA3	BA4	BA5
Cu_2O	20	20	15	40	40
CuO	35	30	30	25	25
Sulfide	15	15	30	15	15
Cu elementar	10	15	15	15	15
Cu-Spinelle				5	5
Cu an C-S-H	<20	<20	10		
$Cu_2Cl(OH)_3$	<20	<20			
$Cu_3(PO_4)_2$	<20	<20			
$CuSO_4 \cdot H_2O$	<20	<20			

BA3 weist einen doppelt so hohen Anteil an Kupfersulfiden auf wie die übrigen Proben. Dies könnte auf eine Anreicherung sulfidischer Partikel während der nassmechanischen Aufbereitung zurückzuführen sein. Alternativ ist eine teilweise Neubildung von Kupfersulfiden während der Aufbereitung denkbar. Im Gegensatz zu den übrigen Prozessrouten erfolgt die Fragmentierung bei BA3 in wässriger Suspension. Dabei entstehen kontinuierlich frische Partikeloberflächen. In Kombination mit der wässrigen Phase und schwefelhaltigen Bestandteilen der Rostasche könnten dadurch lokale Reaktionsbedingungen entstehen, die die Bildung von Kupfersulfiden begünstigen. Aufgrund der geringen Löslichkeit von Kupfersulfiden könnte eine solche Umwandlung die Kupferfreisetzung aus der Rostasche vermindern. Die nahezu identische Cu-Speziierung von BA4 und BA5 zeigt zudem, dass die sensorbasierte Sortierung zwar die mineralogische Zusammensetzung, nicht jedoch die Bindungsform des verbleibenden Kupfers verändert.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass Austragungs- und Aufbereitungsverfahren die Kupferspeziierung in Rostaschen aus der Müllverwertung wesentlich beeinflussen. Während sich die Anteile an metallischem Kupfer zwischen den untersuchten Proben nur gering unterscheiden, treten bei den Kupferoxiden deutliche Unterschiede zwischen nass und trocken ausgetragenen Rostaschen auf. Insbesondere die Dominanz von CuO in nass behandelten beziehungsweise Cu_2O in trocken behandelten Rostaschen weist darauf hin, dass der Wasserkontakt während der Aufbereitung die Oxidation des Kupfers massgeblich beeinflusst. Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass die Aufbereitung nicht nur den Gesamtkupfergehalt der mineralischen Fraktion verändert, sondern auch dessen chemische Bindungsformen beeinflusst. Damit ergeben sich Ansatzpunkte zur Optimierung von Aufbereitungsverfahren sowie für eine differenziertere Bewertung der Umweltrelevanz von Kupfer in Rostaschen.

LITERATURVERZEICHNIS

Huber, F., Blasenbauer, D., Aschenbrenner, P., & Fellner, J. (2020). Complete determination of the material composition of municipal solid waste incineration bottom ash. *Waste Management*, 677–685.

Lassesson, H., Fedje, K., & Steenari, B.-M. (2014). Leaching for recovery of copper from municipal solid waste incineration fly ash: Influence of ash properties and metal speciation. *Waste Management & Research*, 755–762.

VVEA. (Stand 1. Januar 2026). *Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen*

KONTAKT

Philipp Hänggi
philipp.haenggi@unibe.ch
Fachstelle Sekundärrohstoffe, Universität Bern

Rohstoffsicherung durch Zirkularität: Potenziale und Grenzen pulvermetallurgischer Recyclingrouten für Schnellarbeitsstahl und NdFeB-Magnete

Kathrin Greiff[1], Jacqueline Rosefort[1], Wiebke Hagedorn[1] & Anna-Caroline Assmann[1]
[1)] Lehrstuhl für anthropogene Stoffkreisläufe, RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

KURZFASSUNG: Vor dem Hintergrund des EU Critical Raw Materials Acts sowie zunehmender geopolitischer Spannungen rücken zirkuläre Strategien zur Sicherung kritischer Rohstoffe in den Fokus. Offen bleibt jedoch, ob innovative Recyclingrouten tatsächlich zu einer ökologischen Entlastung beitragen. Eine Antwort bietet eine Umweltbewertung, wie sie im Rahmen des Forschungsprojektes GENESIS (EnerGieeffiziENtE KreiSlaufwirtschaft kritischer RohStoffe), mittels Lebenszyklusanalyse, gemäß DIN EN ISO 14040/44, durchgeführt wurde. Dabei wurden pulvermetallurgische Recyclingrouten für Schnellarbeitsstähle (HSS) und Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB-Magnete) untersucht und mit konventionellen Produktionspfaden verglichen. Die Produktdemonstratoren sind eine HSS-Schneidscheibe (150 g) für den Stoffstrom Schnellarbeitsstahl sowie zwei anisotrope NdFeB-Magnete (je 20 g) und ein isotroper NdFeB-Magnet (40 g) für den Stoffstrom NdFeB. Die Ergebnisse zeigen: Zirkuläre Prozesse sind nicht per se ökologisch vorteilhaft. Der HSS-Demonstrator weist aufgrund hoher Energiebedarfe höhere Umweltauswirkungen auf, während NdFeB-Magnete von vermiedener Primärrohstoffgewinnung profitiert. Der Vergleich verdeutlicht den Zielkonflikt zwischen Rohstoffeinsparung und Energieaufwand. Sensitivitätsanalysen bestätigen die hohe Relevanz zentraler Prozessparameter.

1 EINLEITUNG

Schnellarbeitsstähle (HSS) und Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB-Magnete) enthalten zahlreiche Elemente, die von der Europäischen Union (EU) aufgrund ihrer begrenzten Verfügbarkeit und geopolitischen Konzentration als kritische Rohstoffe eingestuft sind (European Commission, 2020; European Union, 2024; Hagedorn & Greiff, 2023). Diese Elemente sind im Besonderen vor dem Hintergrund der Energiewende sehr relevant (Torta, Ciacci, Vassura & Passarini, 2024; van Nielen, Sprecher, Verhagen & Kleijn, 2023). Die Kreislaufwirtschaft bietet Lösungsansätze für eine nachhaltigere Materialnutzung und für die Herausforderungen wie Ressourcenknappheit und Importabhängigkeit (Eggert et al., 2016; Jin, Afiuny, McIntyre, Yih & Sutherland, 2016). Bisher sind jedoch keine Recyclingrouten für HSS- und NdFeB-Produktsysteme etabliert. Neben der technologischen Machbarkeit stellt sich die Frage, inwieweit Recyclingrouten über pulvermetallurgische Verfahren zu einer ganzheitlichen ökologischen Entlastung beitragen können. Der Beitrag präsentiert zentrale Ergebnisse des Forschungsprojekts GENESIS (EnerGieeffiziENtE KreiSlaufwirtschaft kritischer RohStoffe), in dem pulvermetallurgische Recyclingrouten für Schnellarbeitsstähle (HSS) und Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete (NdFeB) untersucht und mit konventionellen Produktionspfaden verglichen wurden.

2 METHODIK

Neben der technischen Machbarkeitsanalyse wurde im Projekt GENESIS, anhand von Produktdemonstratoren, eine umfassende ökologische Bewertung mittels Lebenszyklusanalyse (LCA) gemäß DIN EN ISO 14040/44 durchgeführt. Das Ziel dieser LCA ist der Vergleich der Umweltauswirkungen der konventionellen und zirkulären Route der Produktion von HSS-Schneidscheiben und NdFeB-Magneten. Die Modellierung wurde mit der Software OpenLCA durchgeführt und basiert auf der Datenbank ecoinvent v 3.10. Die hier dargestellte Auswertung umfasst die Indikatoren Cumulative Energy Demand (CED), Raw Material Indicator (RMI) und Abiotic Depletion

Potential (ADP), als allgemeine Indikatoren für den Energie- und Ressourcenverbrauch. Im Projekt wurde eine vollständige Wirkungsabschätzung mittels ReCIPe 2016 v 1.03, midpoint (H) durchgeführt. Der Untersuchungsrahmen der Analyse ist in Tab. 1 definiert.

Tab. 1: Modellierungsdetails und Szenarien

	Schnellarbeitsstahl (HSS)	**Neodym-Eisen-Bor (NdFeB)**
Scope	Cradle-to-gate	Cradle-to-gate
Functional Unit (FU)	1 HSS-Schneidscheibe (150 g)	2 anisotrope NdFeB-Magnete (je 20g) und 1 isotroper NdFeB-Magnet (40 g)
Szenarien	**Materialproduktion (primär):** Recyclingstahlgehalt im Ausgangsmaterial (0, 30, 60, 90 %), Gasart, -verbrauch (He, Ar, N) und Energieverbrauch bei der Gaszerstäubung	**Materialaufbereitung (sekundär):** Chargengröße (1,26-2,52 kg/ Zyklus) **Fertigung**: Stempelmaterial (CuCrZr: 50 Zyklen/ Stempel, CuCoBe: 1 Zyklus/ Stempel), Kühlmittel (0-550g/ Zyklus), Energieverbrauch

Die betrachteten Produktsysteme umfassen die in Abb. 1 und Abb. 2 aufgezeigten Prozessschritte. Die konventionelle Materialextraktion und -produktion sowie die konventionelle Fertigung basieren auf Primär- und Sekundärdaten industrieller Prozesse. Die Materialaufbereitung sowie die Fertigung der zirkulären Produkte beruhen auf Daten aus Versuchen im Labormaßstab. Für die zirkuläre HSS-Schneidscheibe wurde sortenreiner Schleifschlamm, aus der Produktion von Räumnadeln, als Rohstoff verwendet. Für die Produktion der zirkulären NdFeB-Magneten wurden End-of-Life Magneten aufbereitet. Detaillierte Beschreibungen der zugrunde liegenden Aufbereitungsprozesse sind in folgenden Beiträgen zu finden: (Assmann & Greiff, 2023; Assmann, Raulf, Johach, Becker & Greiff, 2024). Bei der zirkulären Fertigung handelt es sich um die pulvermetallurgischen Prozesse, Field Assisted Sintering Technology/ Spark Plasma Sintering (Fast/ SPS) und Electro-Discharge Sintering (EDS).

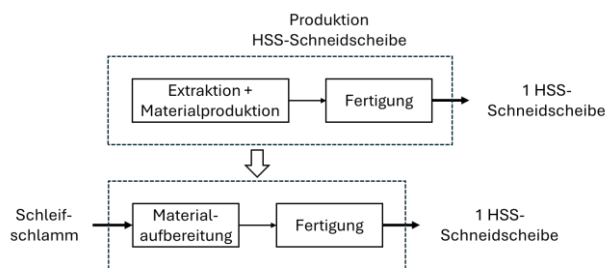


Abb. 1: Prozessschema für die konventionelle und die zirkuläre Herstellungsmethode eines HSS-Schneidscheibe (150 g)

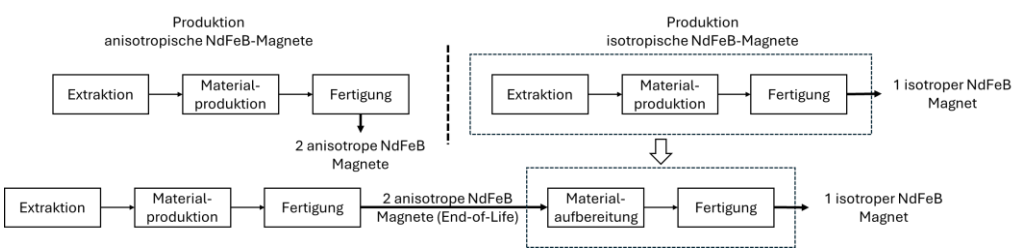
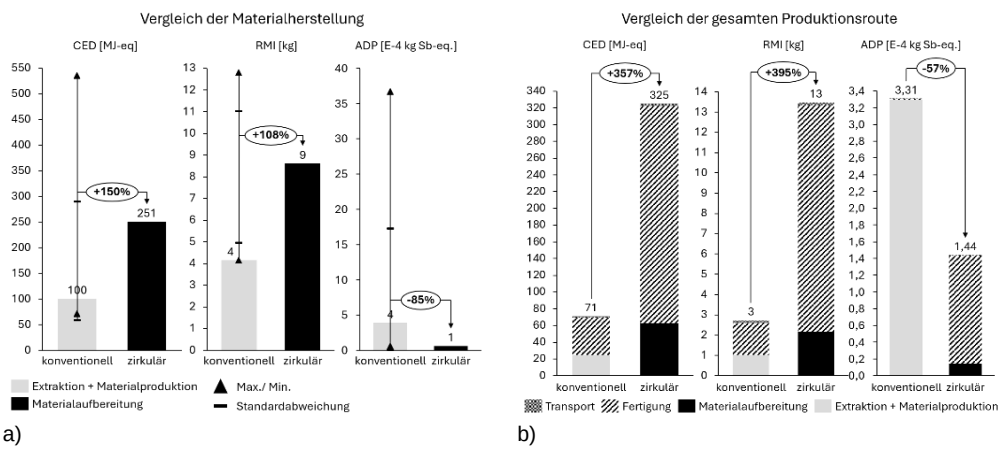


Abb. 2: Prozessschema für die konventionelle und die zirkuläre Herstellungsmethode von zwei anisotropen Magneten (jeweils 20 g) und einem isotropen Magneten (40 g)

3 ERGEBNISSE

Die LCA-Ergebnisse der Schneidscheibenproduktion zeigen deutliche Unterschiede zwischen der konventionellen und der zirkulären Produktionsroute, in der Materialherstellung und entlang der gesamten Produktionskette (Abb. 3). Ein Vergleich der Umweltauswirkungen offenbart, dass die zirkuläre Produktionsroute mit einem erheblich höheren Energie- und Rohstoffaufwand verbunden ist. Dies spiegelt sich in höheren Werten für CED und RMI wider. Auch die hier nicht dargestellten Ergebnisse für das Global-Warming-Potential (GWP) belegen die höhere Umweltlast der zirkuläre Produktionsroute, die durch das gegenwärtig eingesetzte Energiesystem entsteht. Die größte Differenz zwischen den Produktionssystemen, wird für den RMI auf Produktebene festgestellt: Die zirkuläre Produktionsroute verursacht einen um 395 % höheren Rohstoffaufwand als die konventionelle Route (Abb. 3 b)). Maßgeblich hierfür sind die energieintensiven Prozessschritte des FAST-/SPS-Verfahrens. Ein gegensätzliches Bild zeigt sich beim ADP. Hier verursacht die zirkuläre Produktionsroute eine um 57 % geringere Verknappung nicht erneuerbarer mineralischer Rohstoffe (Abb. 3 b)). Es wird deutlich, dass durch die Nutzung von Recyclingrohstoffen insbesondere kritische und begrenzt verfügbare Ressourcen geschont werden. Die Szenarioanalyse zeigt zudem, dass Veränderungen in der primären Materialproduktion die Differenz der Umweltauswirkungen zwischen zirkulärer und konventioneller Materialherstellung reduzieren oder sogar umkehren können (Abb. 3 a)).



a) b)

Abb. 3: Produktsystem HSS (Schneidscheibe) a) Umweltauswirkungen Materialherstellung unter Berücksichtigung der Spannweite; b) Umweltauswirkungen des gesamten zirkulären und konventionellen Produktsystems

Ein Vergleich der Umweltauswirkungen der konventionellen und zirkulären Produktion von NdFeB-Magneten zeigt, dass die zirkuläre Produktion in allen Wirkungskategorien (hier dargestellt mit CED, RMI und ADP) zu geringeren Umweltauswirkungen führt als die konventionelle Produktion. Auf der Ebene der Gesamtproduktion werden im zirkulären Produktsystem bis zu 50 % geringere Umweltauswirkungen kalkuliert als im konventionellen System (Abb. 4). Die Hotspot-Betrachtung der gesamten Produktionskette (Abb. 4) verdeutlicht, dass insbesondere die Extraktion und Materialproduktion in der konventionellen Route maßgeblich zu den Gesamtauswirkungen beitragen. Die Szenarioanalyse zeigt, dass Veränderungen der Prozessparameter die Differenz der Umweltauswirkungen zwischen der zirkulären und der konventionellen Produktion verringern.

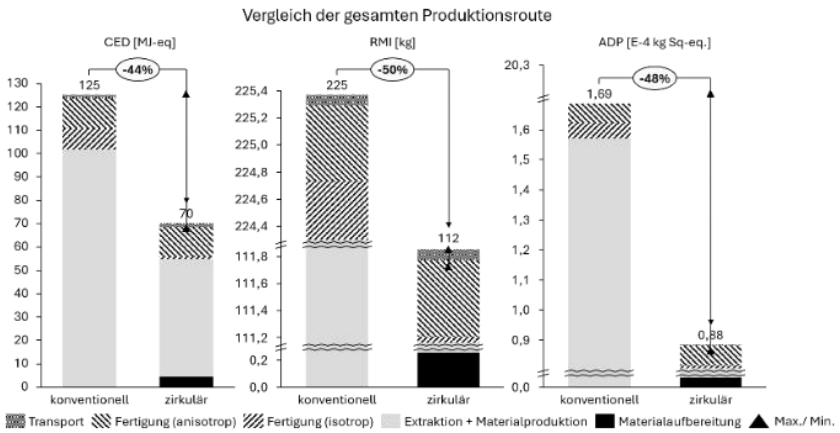


Abb. 4: Produktsystem NdFeB (Magnete) mit Umweltauswirkungen des gesamten zirkulären und konventionellen Produktsystems. Für das zirkuläre Produktsystem ist die Spannweite inkludiert.

4 DISKUSSION

Während die Analyse für die Produktion von NdFeB-Magneten eindeutig geringere Umweltauswirkungen der zirkulären Produktionsroute zeigt, legt sie für die Produktion von HSS-Schneidscheiben einen Zielkonflikt zwischen Energieaufwand und dem Erhalt von nicht erneuerbaren mineralischen Rohstoffen offen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass zirkuläre Produktionssysteme nicht zwangsläufig in allen Wirkungskategorien Vorteile aufweisen und daher eine differenzierte Bewertung erforderlich ist.

Eine mögliche Erklärung liegt in der Verteilung der Umweltlasten entlang der Prozesskette. Im Falle des NdFeB-Produktsystems zeigt sich, dass die primäre Rohstoffgewinnung über alle Indikatoren hinweg der Haupttreiber der Umweltauswirkungen ist. Die Substitution des Primärmaterials durch mechanisch rückgewonnenes Material führt daher zu deutlichen Verbesserungen. Im HSS-Produktsystem verursacht die zirkuläre Produktionsroute aufgrund des hohen Energie- und Hilfsmittelbedarfs der Materialaufbereitung sowie der Fertigung über FAST-/SPS höhere Werte für CED und RMI als die konventionelle Route. Gleichzeitig weist die zirkuläre Route ein deutlich geringeres Abiotic Depletion Potential (ADP) auf, welches mit Einsparung von Erzen, d.h. nicht erneuerbaren mineralischen Rohstoffen, verbunden ist. Dies lässt den Schluss zu, dass eine zirkuläre Prozessführung zur langfristigen Schonung von Lagerstätten, darunter insbesondere Lagerstätten kritischer Rohstoffe, beitragen kann und zugleich die Abhängigkeit von Lieferländern verringern kann. Die Ergebnisse des HSS-Produktsystems verdeutlichen somit einen Burden-Shifting zwischen Energieaufwand und Ressourcenschonung.

Gleichzeitig weisen die Szenarioanalysen darauf hin, dass die Ergebnisse maßgeblich von den zugrunde gelegten Modellannahmen beeinflusst werden. Für das Produktsystem HSS-Schneidscheibe ist dies besonders relevant, da die betrachtete Prozesskette auf einem niedrigen Technologie-Reifegrad basiert. Die Gegenüberstellung mit einem technologisch etablierten industriellen Prozess ist daher mit Einschränkungen verbunden. Die hohen Umweltauswirkungen im mechanischen Recycling des Schleifschlamms werden beispielsweise im Wesentlichen durch den hohen Aceton-Bedarf im Waschprozess bestimmt. Hier besteht Potenzial für weitere Prozessoptimierungen, die den Energie- und Hilfsmittelbedarf reduzieren könnten. Im Kontext der Gesamtprozessgestaltung stellt sich darüber hinaus die Frage, ob die gewählte Prozesskette grundsätzlich die geeignetste Systemkonfiguration darstellt oder ob, für den Einsatz des aufbereiteten Schleifschlamms, andere Produktsysteme eine passendere Alternative wären.

Die Interpretation der Ergebnisse hängt zudem wesentlich von der Auswahl der verwendeten Indikatoren ab. Während der CED den kumulierten Primärenergiebedarf beschreibt und der RMI die Gesamtmenge der Rohstoffaufwände (abiotisch und biotisch), bewertet das ADP das

Verknappungspotenzial nicht erneuerbarer mineralischer Ressourcen, indem das Verhältnis der jährlichen Produktionsmenge zu verfügbaren Ressourcenmenge, bezogen auf ein Referenzsystem, abgebildet wird (Gürzenich & Wagner H, 2004; Mostert & Bringezu, 2019; van Oers, Guinée & Heijungs, 2020). Die Aussagekraft des ADP ist jedoch begrenzt, da weder Dissipationsverluste noch die Dauer der Nutzung von Rohstoffen innerhalb technischer Kreisläufe berücksichtigt werden. Das ADP stellt zwar einen etablierten Indikator zur Bewertung von Ressourcenverknappung dar, berücksichtigt jedoch nur eingeschränkt die spezifischen Zielsetzungen einer Circular Economy. Neuere Ansätze der Wirkungsabschätzung, wie sie von (Beylot, Dewulf, Greffe, Muller & Blengini, 2024) dargestellt werden, schlagen daher vor, neben der Ressourcenentnahme verstärkt die zukünftige Zugänglichkeit von Rohstoffen sowie Dissipationsverluste entlang des Lebenszyklus zu berücksichtigen. Hierzu zählen beispielsweise dissipationsbasierte Ansätze wie das Environmental Dissipation Potential (EDP), das Abiotic Resource Dissipation Potential (ADR) oder neuere Konzepte zur Bewertung der Ressourcenzugänglichkeit. (Beylot et al., 2024) Als Ergänzung zum RMI ermöglichen solche Indikatoren eine differenziertere Bewertung von Recyclingprozessen, da sie die langfristige Erhaltung kritischer Rohstoffe im technischen Kreislauf berücksichtigen.
Daneben bleibt die Energieversorgung ein entscheidender Ansatzpunkt. Vor dem Hintergrund einer zukünftigen Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien erscheint dieser Aspekt besonders relevant (Europäisches Parlament und Rat der europäischen Union, 2023). Während hohe Energieaufwände gegenwärtig häufig mit erhöhten Umweltwirkungen verbunden sind, könnten flexible und lastadaptive Produktionssysteme zukünftig verstärkt auf Zeiten hoher Verfügbarkeit erneuerbarer Energien ausgerichtet werden (Addai & Musilek, 2026; DeHaan, Billings, Sieving & Powell, 2026; Ma, Liu, Ding & Gao, 2026). Insbesondere energieintensive Recycling- und Aufbereitungsprozesse bieten hierfür ein hohes Potenzial. Unter solchen Randbedingungen gewinnt die Schonung kritischer Rohstoffe zunehmend an Bedeutung, da Energie aus erneuerbaren Quellen prinzipiell regenerierbar ist während mineralischer Rohstoffe nur in begrenzter Menge existieren. Die Kombination aus zirkulärer Materialnutzung, erneuerbarer Energieversorgung und intelligenter Prozessführung könnte daher einen wesentlichen Beitrag zur langfristigen Transformation ressourcenkritischer Wertschöpfungssysteme leisten.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse der vorgestellten Umweltbewertung zeigen: Zirkuläre Produktionsrouten müssen nicht inhärent mit geringeren Umweltauswirkungen verbunden sein. Für das Produktsystem der HSS-Schneidscheibe zeigt der Vergleich der zirkulären Produktionsroute mit der konventionellen einen Zielkonflikt zwischen verschiedenen Bewertungsgrößen. Während der Energie- und Rohstoffaufwand für die zirkuläre Route höher ausfällt, sind es bei der Bewertung von Ressourcenverknappung geringere Werte. Zurückzuführen ist das vor allem auf den hohen Energie- und Hilfsmittelbedarf in der zirkulären Materialaufbereitung und der zirkulären pulvermetallurgischen Fertigung. Es kommt zu einem Burden-Shifting, da die geschlossene Kreislaufführung kritische Rohstoffe einspart, den Energiebedarf durch die neue Prozessführung jedoch drastisch erhöht. Im Gegensatz dazu ist die zirkuläre Magnetproduktion vollumfänglich mit geringeren Umweltauswirkungen verbunden, was vor allem auf die hohen Umweltauswirkungen in der primären Materialherstellung zurückzuführen ist. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Umweltlasten der zirkulären Produktionsrouten maßgeblich durch den Energieverbrauch bestimmt werden und eine Rückgewinnung von Rohstoffen allein nicht ausreicht, um ökologische Vorteile zu realisieren. Vor dem Hintergrund einer zukünftigen Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien erscheint dieser Aspekt besonders relevant. Während hohe Energieaufwände gegenwärtig häufig mit erhöhten Umweltwirkungen verbunden sind, könnten flexible und lastadaptive Produktionssysteme zukünftig verstärkt auf Zeiten hoher Verfügbarkeit erneuerbarer Energien ausgerichtet werden. Insbesondere energieintensive Recycling- und Aufbereitungsprozesse bieten hierfür ein hohes Potenzial. Unter solchen Randbedingungen gewinnt die Schonung kritischer Rohstoffe zunehmend an Bedeutung, da Energie aus erneuerbaren Quellen prinzipiell regenerierbar ist,

während mineralische Rohstoffe nur in begrenzter Menge existieren. Die Kombination aus zirkulärer Materialnutzung, erneuerbarer Energieversorgung und intelligenter Prozessführung könnte daher einen wesentlichen Beitrag zur langfristigen Transformation ressourcenkritischer Wertschöpfungssysteme leisten.
Zukünftige Analysen sollten weitere Wirkungskategorien einbeziehen, um das Systemverständnis zu verbessern und fundiertere Handlungsempfehlungen zu ermöglichen. Durch eine kritische Diskussion der gewählten Indikatoren lassen sich die Analysen weiter ausbauen und das Verständnis der Ergebnisse stärken. Weiterer Forschungsbedarf besteht auch hinsichtlich der zukünftigen Energieversorgung von zirkulären Produktionsrouten.

LITERATURVERZEICHNIS

Addai, M. & Musilek, P. (2026). *Artificial Intelligence-Enhanced Droop Control for Renewable Energy-Based Microgrids: A Comprehensive Review.* Electronics, 15(3), 707. https://doi.org/10.3390/electronics15030707

Assmann, A.-C. & Greiff, K. (2023). *Zerkleinerung von NdFeB-Magneten im Labormaßstab - Ermittlung optimaler Betriebsparameter für eine schonende Zerkleinerung.* 12. DGAW Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft.

Assmann, A.-C., Raulf, K., Johach, E., Becker, A. & Greiff, K. (2024). D*e-oiling of grinding sludge: What is the potential of mechanical de-oiling by a centrifuge?* Recy & DepoTech 2024, 343–348. Verfügbar unter: https://publications.rwth-aachen.de/record/1008851/files/1008851.pdf

Beylot, A., Dewulf, J., Greffe, T., Muller, S. & Blengini, G.-A. (2024). *Mineral resources depletion, dissipation and accessibility in LCA: a critical analysis.* The International Journal of Life Cycle Assessment, 29(5), 890–908. https://doi.org/10.1007/s11367-023-02278-3

DeHaan, M., Billings, B., Sieving, J. & Powell, K. M. (2026). *Intelligent industrial demand response to increase grid flexibility and reliability: A review.* Energy Reports, 15, 108962. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.108962

Eggert, R., Wadia, C., Anderson, C., Bauer, D., Fields, F., Meinert, L. et al. (2016). *Rare Earths: Market Disruption, Innovation, and Global Supply Chains.* Annual Review of Environment and Resources, 41(1), 199–222. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085700

Europäisches Parlament und Rat der europäischen Union. (2023). *Richtlinie (EU) 2023/2413 des europäischen Parlaments und des Rates.* In Reihe L. Zugriff am 25.05.2026. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202302413

European Commission. (2020). *Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study.* Publications Office. https://doi.org/10.2873/58081

European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1252 establishing a framework for a secure and sustainable supply of critical raw materials. CRMA.* Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj

Gürzenich, D. & Wagner H. (2004). *Cumulative energy demand and cumulative emissions of photovoltaics production in Europe.* Energy, 29(12-15), 2297–2303. https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.037

Hagedorn, W. & Greiff, K. (2023, 2. Juli). *The Criticality Mitigation Potential of the Circular Economy.* 11th International Conference on Industrial Ecology, Leiden, Netherlands.

Jin, H., Afiuny, P., McIntyre, T., Yih, Y. & Sutherland, J. W. (2016). *Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling.* Procedia CIRP, 48, 45–50. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.013

Ma, C., Liu, Z., Ding, X. & Gao, Y. (2026). *Research Progress on Energy Consumption Throughout the Life Cycle of Machine Tools.* Applied Sciences, 16(3), 1462. https://doi.org/10.3390/app16031462

Mostert, C. & Bringezu, S. (2019). *Measuring Product Material Footprint as New Life Cycle Impact Assessment Method: Indicators and Abiotic Characterization Factors.* Universität Kassel. https://doi.org/10.17170/kobra-20190521521

Torta, G., Ciacci, L., Vassura, I. & Passarini, F. (2024). *Exploring mass and economic potentials of rare earth elements recycling from electric vehicles at end-of-life.* Mineral Economics. https://doi.org/10.1007/s13563-024-00433-2

Van Nielen, S. S., Sprecher, B., Verhagen, T. J. & Kleijn, R. (2023). *Towards neodymium recycling: Analysis of the availability and recyclability of European waste flows.* Journal of Cleaner Production, 394, 136252. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136252

Van Oers, L., Guinée, J. B. & Heijungs, R. (2020). *Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited—updating ultimate reserve estimates and introducing time series for production data.* The International Journal of Life Cycle Assessment, 25(2), 294–308. https://doi.org/10.1007/s11367-019-01683-x

Vom Aufbereitungsrückstand zum Wertstoff: Scherensand als Baustein einer zirkulären Stahlindustrie

Paul Demschar[1], Thomas Kremlicka[1] & Klaus Philipp Sedlazeck[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Im Zuge der mechanischen Behandlung von Abfällen fallen neben Sekundärrohstoffen und Produkten auch unweigerlich Behandlungsrückstände und Feinfraktionen an. Diese werden bis dato hauptsächlich deponiert. In zirkulären Stoffkreisläufen ist es erforderlich, Behandlungsrückstände als potentielle Ressourcen zu betrachten und entsprechend zu bewerten. Eine solche Feinfraktion stellen Scherensande dar, die bei der schneidenden Zerkleinerung von Schrotten im Umfang von ca. 2 % anfallen. Im Zuge des Forschungsprojektes *MeteoR* konnte gezeigt werden, wie durch mechanische Aufbereitung aus Scherensanden wertvolle Rohstoffe rückgewonnen werden können. Besonders hervorzuheben sind dabei chargierfähige Schrotte mit einer Reinheit von 99 % für den Einsatz im Elektrolichtbogenofen. Auf Basis österreichischer Stoffstromdaten ergibt sich ein jährliches Potenzial von rund 11.000 t Schrott, der durch die Inwertsetzung von Scherensanden verfügbar ist. Die Ergebnisse unterstreichen die zentrale Bedeutung der systemischen Einbeziehung von Behandlungsrückständen der Abfallwirtschaft in Strategien zur Rohstoffversorgung.

1 FEINFRAKTIONEN DER ABFALLBEHANDLUNG

Im Zuge der Behandlung von Siedlungs-, Gewerbe-, Bau- und Abbruchabfällen sowie metallhaltigen Stoffströmen fallen in Österreich jährlich rund 1,4 Mio. t an Behandlungsrückständen an. Berechnet ohne Bodenaushubmaterial, entspricht dies 3,5 % der Gesamtabfallmenge (BMK 2023). In mechanischen Aufbereitungsverfahren werden gezielt verwertbare Produkte bzw. Sekundärrohstoffe abgetrennt, während vornehmlich feinkörnige Anteile aufgrund ihrer stofflichen Eigenschaften als Behandlungsrückstände ausgeschleust werden. Da Trennschnittlagen anlagenspezifisch variieren, ist eine allgemeingültige Definition von Behandlungsrückständen als Feinfraktionen über die Korngröße nicht möglich. Aus funktionaler Sicht kann in der abfalltechnischen Praxis eine Gleichsetzung von Feinfraktionen und Behandlungsrückständen erfolgen, da beide Stoffströme jene Materialanteile repräsentieren, die nach dem Stand der Technik nicht mehr in den primären Aufbereitungsprozess integriert werden. Sie werden daher in Verwertungs- oder Beseitigungsverfahren weitergeleitet und gehen der Kreislaufwirtschaft verloren. Die eingeschränkte Verwertbarkeit von Feinfraktionen ist auf hohe stoffliche Heterogenität, Schadstoffbelastungen, hohe Feuchtegehalte sowie intensive Agglomerationsneigung, geringe physikalische Merkmalsunterscheide, komplexe Verwachsungsverhältnisse sowie generell auf die Feinkörnigkeit zurückzuführen (Demschar et al. 2025a).

Im Kontext verstärkter Bemühungen und stringenter Vorgaben zur Implementierung einer Kreislaufwirtschaft nehmen Feinfraktionen eine Schlüsselrolle ein, wie eine Einordnung in die Abfallhierarchie gemäß EU-Abfallrahmenrichtlinie (RL2008/98/EG) verdeutlicht (Abb. 1). Während sich die öffentliche Diskussion häufig auf Abfallvermeidung und Vorbereitung zur Wiederverwendung konzentriert, wird die technische Abfallwirtschaft, die sich gemäß der Abfallhierarchie in die Stufen „Recycling“, „Sonstige Verwertung“ und „Beseitigung“ eingliedert, oftmals lediglich als Endpunkt von Stoffströmen wahrgenommen (Petersen 2013). Tatsächlich bilden diese drei Elemente die stoffliche Basis sämtlicher kreislaufwirtschaftlicher Überlegungen. Dort entscheidet sich, welche Anteile an Rohstoffen erneut in den Wertstoffkreislauf rückgeführt und welche als Behandlungsrückstände ausgeschleust werden. Die gezielte Inwertsetzung von Feinfraktionen ist daher kein Randthema der Kreislaufwirtschaft, sondern eine zentrale Voraussetzung für deren weitere Entwicklung. Jede erfolgreiche Rückführung von Wertstoffen aus Feinfraktionen trägt zur

Zirkularität des Gesamtsystems bei und verhindert, dass potenziell nutzbare Ressourcen in thermischen Senken oder durch Beseitigung auf Deponien verloren gehen.

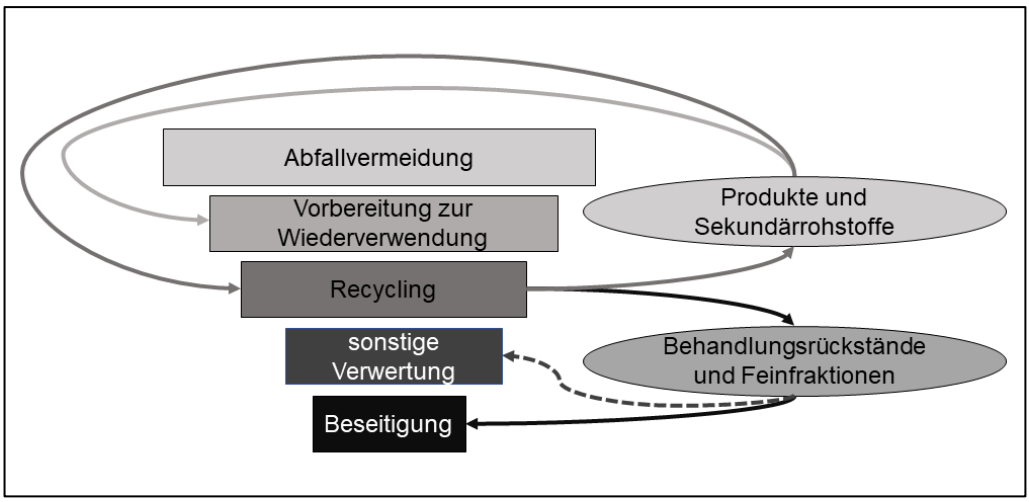


Abb. 1: Einordnung von Behandlungsrückständen und Feinfraktionen in die Abfallhierarchie gemäß EU-Abfallrahmenrichtlinie.

Das interdisziplinäre Forschungsprojekt *MeteoR (Mechanisch-thermochemische Verfahrenskombination für das Recycling von Feinfraktionen aus Abfallbehandlungsanlagen*) hat es zum Ziel, bis dato unzureichend genutzte Feinfraktionen systematisch zu identifizieren, zu charakterisieren und durch gezielte mechanische sowie thermochemische Behandlung in den Wertstoffkreislauf rückzuführen.

2 FEINFRAKTION SCHERENSAND

Die Transformation der Stahlindustrie zählt zu den zentralen Herausforderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität der europäischen Industrie. Die europäische Stahlindustrie strebt eine Reduktion prozessbedingter CO_2-Emissionen um 55 % bis 2030 (Basisjahr 1990) an und verlagert dazu die Rohstahlproduktion zunehmend weg von integrierten Hüttenwerken hin zum Elektrolichtbogenofen (ELO; EUROFER 2024). Durch diese zunehmende Abkehr von Primärverfahren ändert sich die Rohstoffbasis grundlegend: Schrotte (Abfälle) ersetzen bergbaulich gewonnene primäre Erze. Prognosen gehen trotz stabiler Rohstahlproduktionsmengen zumindest von einer Verdoppelung des Schrottbedarfs in den kommenden zehn Jahren aus (Hackl et al. 2022). Neben der Optimierung etablierter Sammel- und Aufbereitungssysteme rücken daher zunehmend bislang ungenutzte oder nur unzureichend erschlossene Stoffströme in den Fokus der wissenschaftlichen Betrachtung.

Ein solcher Stoffstrom entsteht bei der Zerkleinerung von Schrotten mittels Translationsscheren; der Scherensand. Translationsscheren eignen sich zur Grobzerkleinerung voluminöser, dickwandiger und großformatiger Schrotte. Das Funktionsprinzip beruht auf der schneidenden Beanspruchung, bei der ein bewegliches Messer in linearer Translationsbewegung gegen eine zweite, feststehende Klinge geführt wird. Der zu zerkleinernde Schrott wird dabei im Scherenmaul fixiert, während das Messer mit hoher Kraft in den Materialquerschnitt eindringt und diesen linienförmig zerteilt. Dabei auftretende hohe lokale Spannungen führen neben der eigentlichen Zerkleinerungswirkung auch zur Entstehung von Abrieben am Schrott sowie am Messer (Nickel 1996).

Feinanteile und Abriebe aus dem Schneideprozess können mit den für die Manipulation des stückigen Schrottes eingesetzten Greifersystemen (Mehrschalengreifer, Polypgreifer) nicht bewegt werden und verbleiben im Bereich des Scherenauswurfes. Die Erfassung erfolgt durch Räumschilder und die Lagerung in Bunkern gemeinsam mit auf den Betriebsflächen anfallenden Kehrichten. Da gemäß dem Stand der Technik keine separate Erfassung von Feinanteilen und Abrieben aus dem Schneideprozess erfolgt, vermischen sich diese mit Schrottplatzkehricht zu einem gemeinsamen Stoffstrom. Der Begriff Scherensand bezeichnet die Gesamtheit der erfassten Feinfraktion der schneidenden Schrottzerkleinerung. In Bezug auf die mit Translationsscheren behandelte Schrottmenge fallen in etwa 2 % Scherensand an. Aufgrund fehlender Verwertungswege fanden sie bislang kaum Beachtung und werden überwiegend deponiert (Demschar et al. 2025b).

Ziel der im Zuge des Projektes *MeteoR* durchgeführten Untersuchungen ist die grundlegende Charakterisierung der stofflichen Zusammensetzung von Scherensanden und darauf aufbauend die Erhebung und Bewertung ihres Ressourcenpotenzials. Dazu wurde das Material durch mechanische Fraktionierung in distinkte Teilströme zerlegt, diese charakterisiert und durch Zusammenführung der Ergebnisse das Scherensand-Ausgangsmaterial im Bottom-up-Charakterisierungsansatz beschrieben. Die mechanische Fraktionierung erlaubt die integrierte Entwicklung konkreter Aufbereitungspfade zur Wertstoffrückgewinnung. Der Fokus lag dabei auf Schrotten zum Einsatz im ELO.

3 METHODIK

3.1 Aufbereitungstechnische Fraktionierung

Der erste mechanische Behandlungsschritt dient dem Aufschluss von Agglomeraten und Phasenvergesellschaftungen. Dieser erfolgte in nasser Prozessführung in einem Rührbottich, was die Verfahrensführung in einer Attritionszelle simulieren sollte. Der Abzug aus dem Rührbottich erfolgte als Feststofffraktion (größer (>) 1 mm) und als Schlammfraktion (kleiner (<) 1 mm). Die mechanische Fraktionierung wurde separat für diese beiden Fraktionen durchgeführt, um korngrößenabhängige Effekte zu berücksichtigen und die stoffliche Charakterisierung verzerrungsfrei vornehmen zu können.

Im Bereich der Feststofffraktion (> 1 mm) wurde zunächst eine Entmetallisierung mittels Magnetscheidung am Schwachfeld-Walzenscheider (magnetische Flussdichte < 0,1 Tesla) durchgeführt, um im Anschluss daran elektrisch leitfähige Nichteisenmetalle durch Wirbelstromsortierung am exzentrischen Polradscheider selektiv auszutragen. Auch Anteile < 1 mm aus der Feststofffraktion, die sich im Laufe der mechanischen Behandlung aus ebendieser freigesetzt haben, wurden analog zur Vorgehensweise für die Feststofffraktion (> 1 mm) trockenmechanisch behandelt und nicht mit der Schlammfraktion vereinigt.

Für die Schlammfraktion (< 1 mm) erfolgte eine Dichtesortierung am Querstoßherd. Die Trennung basiert dabei auf einer Kombination von Wasserströmung, Schwerkraft und einer quer zur Fließrichtung wirkenden periodischen Beschleunigung. Aufgrund unterschiedlicher Dichten und Korngrößen werden die Partikel verschieden stark über die Herdfläche transportiert, sodass Unterschiede in der Schleppgeschwindigkeit trennwirksamen Einfluss entwickeln.

3.2 Auswertung und Analyse

Die Auswertung erfolgte auf Grundlage einer durchgängigen Massenbilanzierung über sämtliche Fraktionierungsschritte hinweg in Masseprozent in Bezug auf die Originalsubstanz des Scherensand-Ausgangsmaterials (M-%). So berechnete Massenausbringenswerte und Transferkoeffizienten erlauben quantitative Aussagen zu Anteil und Verteilung einzelner Merkmalsklassen.

Um qualitative Ergebnisse zu erheben, wurden in den Feststofffraktionen (> 1 mm) händische Sortieranalysen durchgeführt. Die ermittelten Massenanteile wurden gemeinsam mit den Transferkoeffizienten zur Bewertung der Stoffverteilung sowie der Trennleistung der eingesetzten Aufbereitungsverfahren herangezogen. Die Feinanteile der Feststofffraktion (< 1 mm) sowie die Schlammabgänge des Querstoßherdes (< 1 mm) wurden zusätzlich mittels semiquantitativer Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) analysiert, um Anreicherungs- und Verarmungstendenzen in Bezug auf für die Stahlherstellung relevante Spurenelemente zu identifizieren.

4 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der mechanischen Fraktionierung sind in Abbildung 2 als vollständig bilanziertes Flussdiagramm in M-% in Bezug auf das Scherensand-Ausgangsmaterial dargestellt.

4.1 Aufschluss

Das Material wurde im Zuge des Aufschlusses in zwei Feststofffraktionen (> 1 mm; 66 M-%) sowie eine Schlammfraktion (< 1 mm; 34 M-%) überführt. Die Attrition erwies sich als vollständig wirksam; sämtliche Feststofffraktionen erreichten Aufschlussgrade von 100 %. Die Schlammfraktion zeigte Hinweise auf Kohlenwasserstoffverbindungen in Form eines schillernden Filmes auf der Oberfläche der abgezogenen Flüssigkeiten (in Berge, Vorkonzentraten sowie Konzentrat).

4.2 Feststofffraktionen

Im Korngrößenbereich > 1 mm entfallen 27 M-% auf eine Eisenschrottfraktion. Mit einer Reinheit von 99 % und einer maximalen Korngröße von 150 mm ist diese als chargierfähig für den ELO zu bewerten. Die Abtrennung von Nichteisenmetallen durch Wirbelstromsortierung spielte mit 0,8 M-% lediglich eine untergeordnete Rolle. Die verbleibende Restfraktion im Umfang von 23 M-% weist eine stark heterogene Zusammensetzung auf, wobei mineralische Bestandteile mit einem Anteil von 74 % dominieren. Außerdem finden sich Kunststoffe, Lackpartikel, Glas sowie Holz- und Papierbestandteile in dieser Restfraktion.

Die Feststofffraktion im Bereich < 1 mm enthält magnetisierbare Anteile im Umfang von 2 M-%. Chemische Analysen (XRF) zeigten, dass diese Fraktion durch hohe Eisengehalte (> 33 %) sowie relevante Zinkgehalte (ca. 2 %) gekennzeichnet ist und damit ein stoffliches Rückgewinnungspotenzial für die Metallurgie besitzt (Demschar et al. 2025b). Die Restfraktion < 1 mm weist hingegen erhebliche Anteile mineralischer und organischer Bestandteile auf. Eisen- und Zink sind in deutlich geringeren Konzentrationen vorhanden.

4.3 Schlammfraktion

Die Dichtsortierung führte zur selektiven Abtrennung eines eisenreichen Konzentrates. Während sich leichte und mineralische Bestandteile bevorzugt in der Berge und den Vorkonzentratströmen anreichern, steigt der Eisengehalt kontinuierlich bis zum Konzentrat an und liegt in diesem bei 81 %. Gleichzeitig nimmt der Gehalt an für die Stahlherstellung unerwünschte Spurenelemente wie Silizium (13 %) und Kupfer (0,22 %) im Konzentrat ab (Demschar et al. 2025b). Die

Dichtesortierung am Querstoßherd ist demnach geeignet, die Schlammfraktion für einen Einsatz zur Stahlerzeugung vorzubereiten.

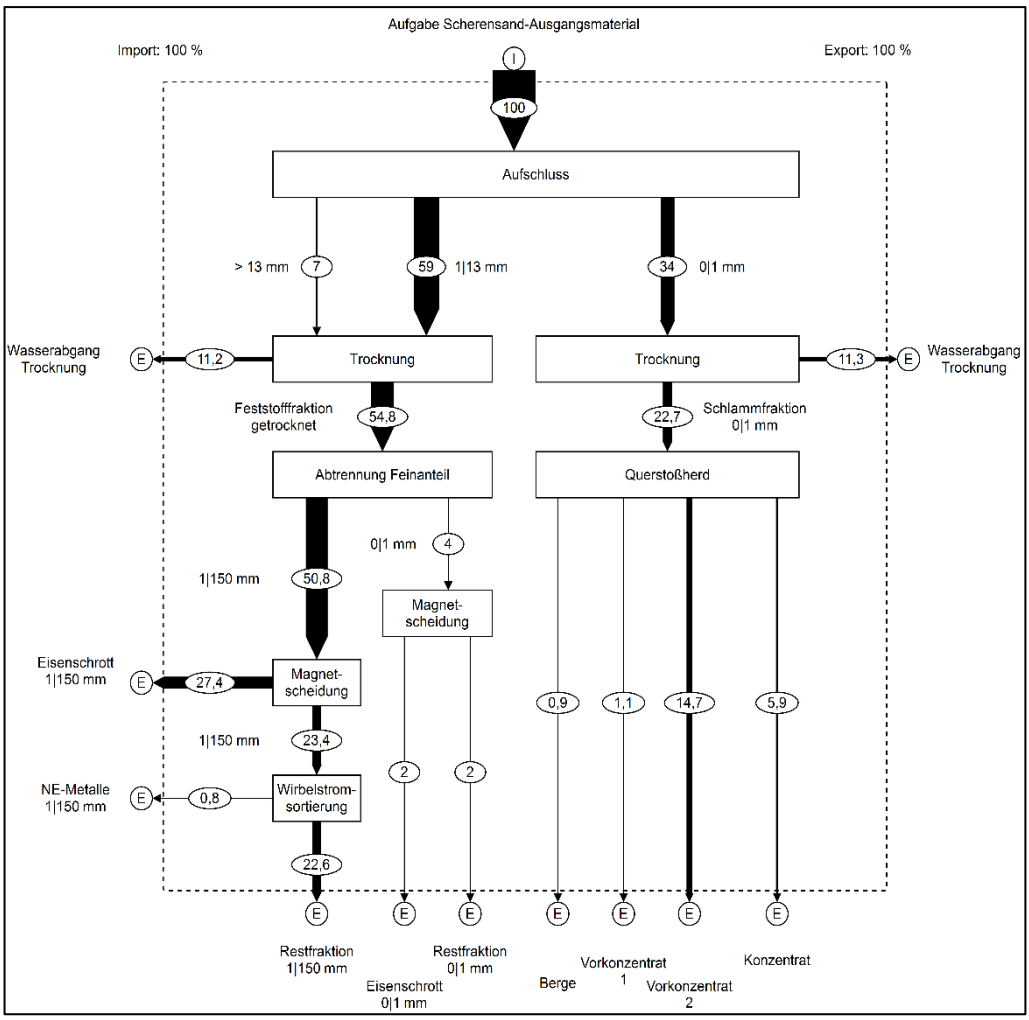


Abb. 2: Vollständiges Flussdiagramm der mechanischen Fraktionierung des Scherensand-Ausgangsmaterials. Die Werte verstehen sich als Masseprozent in Bezug auf die Originalsubstanz des Scherensand-Ausgangsmaterials (M-%).

5 FAZIT UND AUSBLICK

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die verfahrenstechnische Kombination aus attritivem Aufschluss, Magnetscheidung, Wirbelstromsortierung und Feinkorndichtesortierung bis zu 35 M-% an Schrotten und Eisenkonzentraten aus Scherensanden rückgewonnen werden können. Auf Basis der jährlichen österreichischen Schrottmengen und der Anwendung des Scherensandaufkommens von 2 % der behandelten Menge, ergibt sich ein prognostizierter jährlicher Scherensandanfall von etwa 40.000 t. Durch die experimentell ermittelten Werte, resultiert daraus eine potentiell rückgewinnbare Schrottmenge von rund 11.000 t pro Jahr, rein bezogen auf die tatsächlich im ELO einsetzbare Schrottfraktion > 1 mm. Dies verdeutlicht die hohe Relevanz der

systemischen Betrachtung von Feinfraktionen aus der Abfallbehandlung als wertvolle Ressourcen. Die Einbindung von Feinfraktionen in stoffstrombezogene Analysen erweitert das verfügbare Sekundärrohstoffpotenzial erheblich und stärkt kreislaufwirtschaftliche Bestrebungen (Demschar et al. 2025b).

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei den Projektpartnern (Bernegger GmbH, FCC Austria GmbH, Technische Universität Graz, Holcim (Österreich) GmbH, IFE Aufbereitungstechnik GmbH, Universität Innsbruck, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, RHI Magnesita GmbH), der Förderagentur FFG (www.ffg.at, Fördernummer FO999897764) und dem Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie für ihre Beiträge.

LITERATURVERZEICHNIS

BMK (2023): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023, Teil 1. BAWP. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Online verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/recht/vo/abfallverzeichnis.html, zuletzt geprüft am 21.10.2024.

Demschar, Paul; Kremlicka, Thomas; Rettinger, Severin; Pomberger, Roland; Sedlazeck, Klaus Philipp (2025a): Process combination for mechanical co-processing of residues from municipal solid waste treatment. In: *Waste Manag Res* 43 (12), S. 2031–2042. DOI: 10.1177/0734242x251352808.

Demschar, Paul; Kremlicka, Thomas; Waldl, Wolfram; Pomberger, Roland; Sedlazeck, Klaus Philipp (2025b): Process-adapted material characterization for ferrous metal recovery from residues arising in scrap cutting operations. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 208, S. 115172. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.115172.

EUROFER (2024): European Steel in Figures 2024. Covering 2023. Hg. v. European Steel Association. European Steel Association (EUROFER). Brüssel. Online verfügbar unter https://www.eurofer.eu/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2024, zuletzt geprüft am 02.04.2025.

Hackl, G.; Beermann, M.; Rieger, J.; Häuselmann, M.; Schenk, J.; Michelic, S. K. et al. (2022): IRONER–Potenziale für innovatives und nachhaltiges Recycling von Stahl. Leoben (Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 1/2023). Online verfügbar unter https://fti-ressourcenwende.at/resources/pdf/schriftenreihe_2023-01-ironer.pdf.

Nickel, Werner (1996): Recycling-Handbuch. Strategien - Technologien - Produkte. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).

Petersen, Frank (2013): Die fünfstufige Abfallhierarchie – Funktionen und Probleme 12 (1), S. 2–12. Online verfügbar unter https://abfallr.lexxion.eu/article/abfallr/2013/1/401.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Paul Demschar
paul.demschar@unileoben.ac.at
+43 3842 / 402 - 5107
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben
https://www.avaw-unileoben.at

Innovative Prozesskonzepte zur Metallrückgewinnung und Recycling von gebrauchten Feuerfestmaterialien aus der Nichteisenmetallurgie

Simone Sedlazeck[1], Wolfgang Premm[2], Stefan Steinlechner[2], Alexander Leitner[1], Dean Gregurek[1] & Andreas Köck[1]
[1)] RHI Magnesita GmbH, Leoben, Österreich
[2)] Montanuniversität Leoben, Christian Doppler Labor für selektive Rückgewinnung von Spezialmetallen mittels innovativer Prozesskonzepte, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Die Rückgewinnung von Wertmetallen und sekundären Rohstoffen aus gebrauchten Feuerfest-(FF)-materialien der Nichteisenmetallurgie (NEM) stellt eine zentrale Herausforderung dar, da diese Materialien bisher überwiegend deponiert oder nur geringwertig verwertet werden. Gleichzeitig enthalten sie relevante Mengen wirtschaftlich bedeutender Metalle wie Kupfer oder Nickel und bieten zudem Potenzial zur CO_2-Reduktion durch das Recycling der FF-Matrix. Aufgrund ihres Einsatzes unter extremen thermischen und chemischen Bedingungen weisen FF-Materialien aus der NEM komplexe Infiltrationen von metallischen, oxidischen und sulfidischen Phasen in der keramischen Matrix auf. Die daraus resultierende heterogene und stark variierende Verteilung erschwert die Aufbereitung und erfordert maßgeschneiderte Prozessstrategien. Im Rahmen des CD-Labors „Selektive Rückgewinnung von Spezialmetallen mittels innovativer Prozesskonzepte“ wird daher ein integriertes Recyclingkonzept entwickelt, das sowohl mechanische also auch hydrometallurgische Verfahrensschritte kombiniert. Ziel ist sowohl eine hohe Metallrückgewinnung als auch die Erzeugung industriell verwertbarer Produktströme. Besonderes Augenmerk gilt dabei einem Closed-Loop-Ansatz, der die Nutzung aller entstehenden (Neben-)Produkte berücksichtigt.

1 EINLEITUNG

Die steigenden Anforderungen an Ressourceneffizienz und Emissionsreduktion rücken insbesondere Nebenströme energieintensiver Industrien in den Fokus. In der Nichteisenmetallurgie stellen gebrauchte FF-Materialien einen bislang wenig genutzten, jedoch potenziell wertvollen Sekundärrohstoff dar. Diese Hochleistungskeramiken sind essenziell für Hochtemperaturprozesse, fallen jedoch am Ende ihrer Lebensdauer in großen Mengen als Ofenauskleidungen an und werden derzeit überwiegend deponiert. Gleichzeitig enthalten sie sowohl energieintensiv hergestellte FF-Rohstoffe als auch metallische Infiltrationen aus dem Produktionsprozess.

Insbesondere magnesia-chrombasierte Materialien zeichnen sich durch hohe thermische und chemische Beständigkeit aus, ihre Herstellung ist jedoch mit erheblichen CO_2-Emissionen verbunden. Eine Rückführung dieser Materialien in den Stoffkreislauf bietet daher ein hohes Potenzial zur Reduktion von Umweltbelastungen. Gleichzeitig können sich während des Einsatzes wertvolle Metalle wie Kupfer und Nickel in der keramischen Matrix anreichern. Diese Metalle sind von zentraler Bedeutung für Zukunftstechnologien und stellen einen zusätzlichen Anreiz für die Entwicklung effizienter Aufbereitungsstrategien dar. Vor diesem Hintergrund gewinnen integrierte Ansätze an Bedeutung, die sowohl die Rückgewinnung der FF-Matrix als auch der enthaltenen Metallphasen berücksichtigen. Die vorliegende Arbeit adressiert diese Herausforderungen durch eine systematische Untersuchung von gebrauchten FF-Materialien aus der Kupfer- und Nickelmetallurgie. Im Fokus stehen dabei die detaillierte Charakterisierung der Materialien sowie die Bewertung ihres Aufbereitungs- und Recyclingpotenzials. Ziel ist es, ein grundlegendes Verständnis der stofflichen Zusammensetzung und Phasenverteilung zu schaffen, um darauf aufbauend geeignete Prozessstrategien für eine nachhaltige Nutzung dieses komplexen Sekundärrohstoffs abzuleiten.

2 MATERIAL UND METHODEN

Die experimentellen Untersuchungen basieren auf unterschiedlichen Chargen gebrauchter magnesia- und alumina-chrom FF-Materialien aus der Kupfer- und Nickelmetallurgie mit variierender Herkunft und Zusammensetzung. Zunächst erfolgte eine umfassende Charakterisierung mittels mikroskopischer und analytischer Methoden zur Bestimmung von Phasenverteilung und Stoffzusammensetzung. Darauf aufbauend wurden die Proben sowohl hydrometallurgisch mittels Salzsäurelaugung behandelt als auch mechanisch zur verbesserten Freilegung metallischer Bestandteile aufbereitet. Der Laugung nachgeschaltet wurden mehrstufige Zementations- und Fällungsprozesse untersucht, während die mechanische Aufbereitung und Trennung durch Versuche zur sensorgestützten Sortierung weiter optimiert wird. Die metallfreien Laugungsrückstände und mechanisch abgereicherten FF-Proben wurden in FF-Produkten rezykliert und die chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaft mit Standardprodukten verglichen.

2.1 Materialcharakterisierung

Die untersuchten gebrauchten FF-Materialien stammen aus unterschiedlichen pyrometallurgischen Prozessen der primären und sekundären Kupfer- und Nickelproduktion und umfassen magnesia-chrom- und alumina-chrombasierte Produkte in Form von Einzelsteinen und Sammelproben. Die Materialien unterscheiden sich hinsichtlich Herkunft, Einsatzbedingungen und chemischer Zusammensetzung und weisen daher variierende Infiltrationsgrade und Abnützungserscheinungen auf. Für die Charakterisierung wurden ausgewählte Steine zunächst visuell und mittels optischer Mikroskopie untersucht, um makroskopische Veränderungen sowie Infiltrationszonen entlang der FF-Matrix abzuschätzen. Darauf aufbauend erfolgte eine detaillierte analytische Untersuchung mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (engl. XRF), Röntgendiffraktometrie (engl. XRD) sowie rasterelektronenmikroskopischer Analysen (engl. SEM) in Kombination mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (engl. EDX), um sowohl die chemische Zusammensetzung als auch die Phasenverteilung und die Mikrostruktur der Materialien zu bestimmen (Witt & Steinlechner (2025), Steinlechner & Premm, 2025). Somit konnte die Metallkonzentration von Kupfer und Nickel sowie Begleitelementen abgeschätzt werden. Die Phasenidentifikation erfolgte durch eine kombinierte Auswertung von XRD- und SEM/EDX-Daten, um die Aussagekraft trotz der hohen Komplexität und Heterogenität der Reststoffe zu erhöhen.

2.2 Hydrometallurgische Route

Die Laugung wurde in einem doppelwandigen Reaktionsgefäß durchgeführt, dessen Temperatur über ein zirkulierendes Wärmeträgermedium konstant gehalten wurde. Zur Minimierung von Verdampfungsverlusten wurde das System weitgehend geschlossen betrieben und mit einem Deckel ausgestattet, der nur die notwendigen Öffnungen für Rückflusskühler, Rührwerk, pH-Elektrode sowie die Zugabe von Reagenzien aufwies. Als Laugungsmittel wurde Salzsäure verwendet. Nach dem Aufheizen von deionisiertem Wasser auf die Zieltemperatur wurde das vorzerkleinerte FF-Material entsprechend dem gewählten Feststoff-Flüssigkeits-Verhältnis zugegeben. Die Salzsäure wurde kontinuierlich dosiert, um den gewünschten pH-Wert einzustellen und konstant zu halten. Nach Abschluss der Versuche wurden Feststoff und Lösung durch Filtration getrennt, der Rückstand gewaschen und beide Phasen analysiert (Lösung mittels ICP-OES, Feststoff mittels XRF nach Trocknung bei 105 °C). Zur Untersuchung des Auflösungsverhaltens wurden Prozessparameter wie Temperatur, Reaktionszeit, pH-Wert und Feststoff-Flüssigkeits-Verhältnis systematisch variiert. Die chemischen Analysen der Laugen dienten als Grundlage für die mehrstufige Laugenreinigung. Zur Reinigung kamen eine Hydroxidverbindung zur Neutralisationsfällung sowie Metallpulver zur Zementation zum Einsatz, wobei sowohl unterschiedliche Verfahrenskombinationen getestet als auch die Zugabemenge des Zementationsmittels und die Dauer der Neutralisationsfällung variiert wurden. Die gereinigten Lösungen wurden mittels ICP-OES analysiert und die Rückstände nasschemisch untersucht (Premm und Steinlechner (2026)).

2.3 Mechanische Aufbereitung, Trennung und sensorgestützte Sortierung

Die mechanische Aufbereitung erfolgte in mehreren Schritten mit unterschiedlicher Komplexität der eingesetzten Trennverfahren. Neben klassischen Brech- und Siebversuchen wurden erste Parameterstudien zur Magnet- und Wirbelstromscheidung sowie Vorstudien zur elektrodynamischen Fragmentierung (EDF) durchgeführt. Für die Brech- und Siebversuche wurden repräsentative Teilproben der zuvor charakterisierten FF-Materialien mittels Backenbrecher zerkleinert und durch Trockensiebung in definierte Korngrößenfraktionen im Bereich von 6,3 mm bis 125 µm klassiert. Diese Fraktionierung ermöglichte eine differenzierte Betrachtung des Aufschlussgrades sowie der Verteilung metallischer und oxidischer Bestandteile in Abhängigkeit von der Partikelgröße. Aus jeder Siebfraktion wurden repräsentative Teilproben entnommen, fein vermahlen und anschließend mittels XRF chemisch untersucht. Auf diese Weise konnten detaillierte Verteilungsprofile relevanter Elemente wie Cu, Ni, Fe sowie weiterer Begleitelemente erstellt werden. Die Kombination aus Korngrößenverteilung und chemischer Zusammensetzung erlaubte eine quantitative Bewertung der Elementanreicherung in den jeweiligen Fraktionen (Steinlechner und Premm (2025), Premm und Steinlechner (2026)). Darauf aufbauend wurden weiterführende mechanische Aufbereitungsverfahren eingesetzt, insbesondere EDF, um eine potenziell verbesserte Freilegung metallischer Bestandteile, hauptsächlich Nickel, zu untersuchen. Die resultierenden Produkte wurden ebenfalls hinsichtlich ihrer Verteilung und Anreicherung in unterschiedlichen Korngrößenfraktionen ausgewertet. Die magnetische, nickelhaltige Fraktion wurde anschließend mittels eines isodynamischen Magnetabscheiders weiter separiert. Zur Untersuchung der Kupferfreisetzung aus infiltrierten FF-Materialien wurden die Proben zunächst im Backenbrecher zerkleinert und anschließend mittels Wirbelstromscheidung behandelt. Ergänzend wurde die Möglichkeit der Trennung von kupferreichen und -armen Zonen innerhalb der FF-Steine durch sensorgestützte Sortierverfahren bewertet (Leitner et al., 2024).

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Wiederverwertung der Rückstände der hydrometallurgischen Route

Zwei Ausgangsmaterialien wurden hinsichtlich ihres Potenzials für den Wiedereinsatz in magnesia-chrom Steinen verglichen. Dabei handelt es sich einerseits um SRM (secondary raw material), das gebrochen, gesiebt und auf eine Korngröße von < 1 mm vermahlen wurde, und andererseits um SRL (solid leachate residue), das denselben mechanischen Aufbereitungsschritten unterzogen und anschließend unter definierten, durch eine Parameterstudie optimierten Bedingungen (Temperatur, pH-Wert, Dauer sowie Feststoff-Flüssigkeits-Verhältnis) mittels Salzsäure gelaugt wurde. Die resultierenden chemischen Zusammensetzungen der beiden Materialien sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Auszug der chemischen Zusammensetzung von SRM und SLR mittels XRF.

Massen-%	MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Cr_2O_3	Fe_2O_3	NiO	CuO
SRM	53	6,1	2,3	1,8	20	14	0,18	1,1
SLR	20	13	1,6	0,20	44	20	0,03	0,24

Die Laugung des Cu-infiltrierten FF-Materials führte zu einer deutlichen Abreicherung des Kupfers und Nickels auf unter 1 Massen-% bzw. 0,1 Massen-% (Premm und Steinlechner (2026)). Zusätzlich gehen Matrixbestandteile (MgO, SiO_2, CaO) in Lösung und es kommt zur Aufkonzentration von chromhaltigen Spinellen (durch XRD bestätigt). Sowohl SRM als auch SLR wurden für die Steinproduktion im Labormaßstab herangezogen. Zusätzlich wurde ein Stein mit Standardrezeptur unter denselben Bedingungen hergestellt (Abbildung 1).

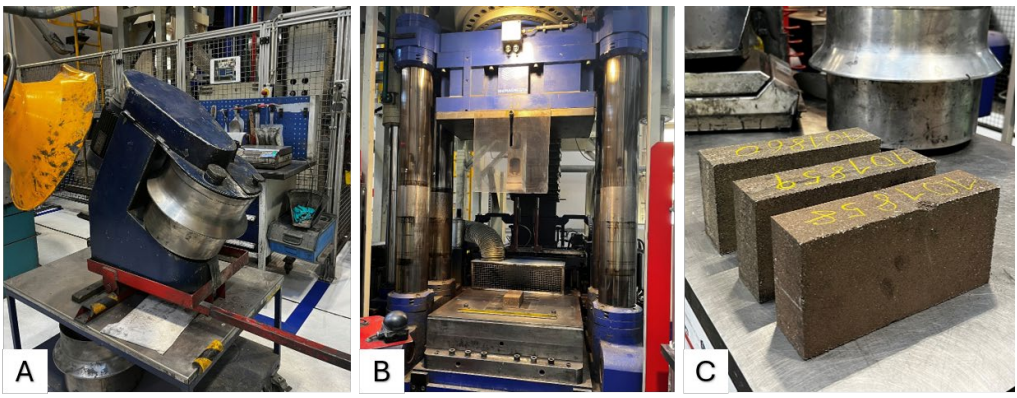


Abb. 1: Steinherstellung im Labormaßstab. A: Mischen; B: Pressen; C: FF-Steine vor dem Brennen.

Die alternative Rezeptur mit Recyclingmaterial wies insgesamt eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie die Standardrezeptur auf, bei jedoch leicht erhöhten Anteilen an CaO und Cr_2O_3 sowie insgesamt höherem SiO_2-Gehalt. Besonders hervorzuheben ist, dass die Konzentrationen kritischer Schwermetalle, insbesondere von Kupfer, durchgehend sehr niedrig sind (< 0,1 Massen-% bei SLR und 0,13 Massen-% bei SRM) und somit keine Einschränkung für den Einsatz darstellen. Auch die thermomechanischen Eigenschaften entsprechen mit vergleichbarer Heißbiegefestigkeit und hohem Druckerweichen dem Standardniveau, wodurch eine gute Eignung als Sekundärrohstoff bestätigt wird. Auch die mineralogischen Untersuchungen zeigen keine signifikanten Unterschiede im Gefüge der drei untersuchten Rezepturen (Abbildung 2).

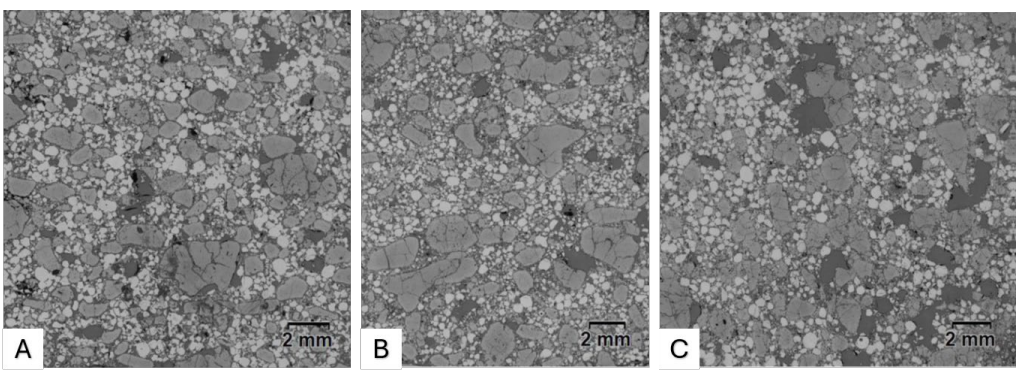


Abb. 2: Gefüge der drei Steine im Auflichtmikroskop. A: 5% SRL; B: 5% SRM; C: Standardrezept.

Erste Versuche der Laugenreinigung im Zuge der hydrometallurgischen Route zeigten, dass sich Verunreinigungen durch die Zugabe von Hydroxiden mittels Neutralisationsfällung effizient aus der Lauge entfernen lassen (Restkonzentrationen von unter 1 mg/L). Durch einen nachgeschalteten Zementationsschritt wurde Kupfer selektiv aus der Lösung abgeschieden, wobei ein Produkt mit einem Kupfergehalt von über 90 Massen-% gewonnen werden konnte, dass einer weiteren Verwertung in der Kupferindustrie zugeführt werden kann. Ein zusätzlicher selektiver Zementationsschritt ermöglichte zudem die Abtrennung weiterer Verunreinigungen bei gleichzeitig hohen Extraktionsraten sowie die Gewinnung eines nickelhaltigen Produkts, das für eine nachfolgende Nickelrückgewinnung geeignet ist. Die Ergebnisse der Laugungsreinigungsversuche zeigen, dass wiederverwertbare Nebenprodukte gewonnen und die Lauge erfolgreich für eine konventionelle Säurerückgewinnung aufbereitet werden kann.

3.2 Mechanische Aufbereitung und Separation

Die durchgeführten Voruntersuchungen zur mechanischen Aufbereitung und Separation zeigen ein grundsätzlich hohes Potenzial für einzelne Korngrößenfraktionen. Ohne weiterführende, systematische Parameterstudien konnte jedoch noch keine Restfraktion mit ausreichend geringer Kupfer- und Nickelkonzentration für einen direkten Wiedereinsatz in FF-Produkten erzeugt werden. Gleichzeitig ermöglichte die umfassende Materialcharakterisierung die eindeutige Identifikation von Infiltrationszonen innerhalb der FF-Steine (Abbildung 3 und Tabelle 2).



Abb. 3: Kupferinfiltrierte Steinschnitten mit A: Kaltseite; B: Übergangszone; C: Heißseite.

Tab. 2: Auszug der chemischen Zusammensetzung in den unterschiedlichen Zonen (A, B, C) mittels XRF.

Massen-%	Probe 1		Probe 2	
	Cu	Ni	Cu	Ni
A: Kaltseite	0,01	0,09	4,5	0,16
B: Übergangszone	0,12	6,4	7,1	0,07
C: Heißseite	0,18	11	13	0,31

Eine Anreicherung des Kupfers und Nickels wurde hier deutlich in der Heißseite (dem Aggregatsinneren zugewandte Seite des Steines) detektiert, während die Kaltseite (der Aggregatswand zugewandte Seite des Steines) teilweise Kupferkonzentrationen unter 0,1 Massen-% aufweist. Diese können gezielt mittels sensorgestützter Sortierung abgetrennt werden, sodass nicht infiltrierte Bereiche perspektivisch ohne zusätzliche Vorbehandlung direkt als Sekundärrohstoff in neuen FF-Produkten eingesetzt werden können. Erste Produktionsversuche im Labormaßstab bestätigten, dass der Wiedereinsatz dieser unbehandelten, nicht infiltrierten Bereiche keine signifikanten Unterschiede zu Standardrezepturen ohne Recyclinganteil aufweist.

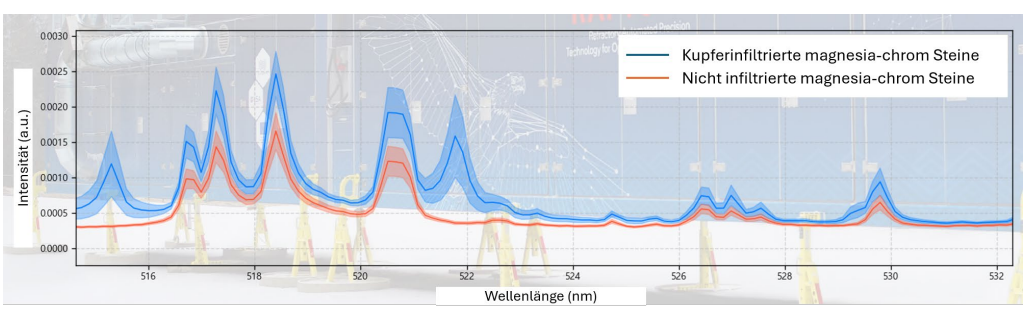


Abb. 4: LIBS-Spektren von kupferinfiltrierten und nicht infiltrierten magnesia-chrom Steinen generiert in der automatisierten Sortieranlage RAPTOR.

Erste Tests zur sensorgestützten Sortierung zeigen die prinzipielle Machbarkeit anhand der Unterscheidung von Kupfer mittels laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie (engl. LIBS). Wie in Abbildung 4 dargestellt, können die FF-Steine anhand charakteristischer Kupfersignale bei 515 nm und 522 nm differenziert und in weiterer Folge automatisiert sortiert werden.

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass gebrauchte FF-Materialien aus der NEM ein bislang unzureichend genutztes, jedoch vielversprechendes Sekundärrohstoffpotenzial darstellen. Durch die kombinierte Anwendung materialanalytischer Methoden konnte die komplexe Verteilung metallischer und mineralischer Phasen detailliert charakterisiert und als Grundlage für gezielte Aufbereitungsstrategien genutzt werden. Die Ergebnisse der hydrometallurgischen Untersuchungen belegen, dass eine effiziente Rückgewinnung von Kupfer und Nickel sowie eine signifikante Abreicherung möglich ist und die entstehenden Rückstände für den Wiedereinsatz in FF-Produkten geeignet sind, wobei vergleichbare materialtechnische Eigenschaften zu Standardrezepturen erreicht wurden. Darüber hinaus wird die Lauge im Zuge der Reinigungsschritte auch für eine anschließende Säurerückgewinnung vorbereitet. Die mechanischen Aufbereitungsansätze zeigen ebenfalls Potenzial zur Metallfreilegung und -anreicherung, erfordern jedoch weiterführende Optimierungen, insbesondere im Hinblick auf eine hinreichende Abreicherung störender Metallgehalte. Hervorzuheben ist die Identifikation klarer Infiltrationszonen innerhalb der FF-Steine, die eine selektive Trennung ermöglichen. Erste Ergebnisse zur sensorgestützten Sortierung mittels LIBS verdeutlichen, dass eine automatisierte Trennung von kupferreichen und -armen Bereichen durch die automatisierte Sortiereinheit RAPTOR prinzipiell realisierbar ist und somit neue Wege für eine effiziente Vorseparation eröffnet. Insgesamt zeigt sich, dass insbesondere integrierte Prozessansätze, die mechanische, hydrometallurgische und sensorbasierte Verfahren kombinieren, großes Potenzial für eine nachhaltige Verwertung dieses komplexen Abfallstroms bieten. Die Ergebnisse leisten damit einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung geschlossener Stoffkreisläufe und bilden eine fundierte Grundlage für weiterführende Prozessoptimierungen und Upscaling-Studien.

5 DANKSAGUNG

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Wirtschaft, Energie und Tourismus und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft.

LITERATURVERZEICHNIS

Leitner, A., Neuhold, S., Heid, S., Gavagnin, D., Meschik, P. M., Stastny, R., Zocratto, B., & Moraes, M. N. (2024). Enhancing refractory recycling: The role of automated sensor-based sorting systems. Bulletin, 41–46.

Premm, W., & Steinlechner, S. (2026). Recycling of spent magnesia chrome refractories: Combined mechanical beneficiation and hydrometallurgical approach. In Conference Proceedings of the 65th Conference of Metallurgy and Materials (COM2026). Manuskript zur Veröffentlichung eingereicht.

Steinlechner, S., & Premm, W. (2025). Investigations into the recyclability of magnesia-chromium refracto ries from the copper and nickel industries. In Conference Proceedings of the Sustainability through Science and Technology Symposium (SIPS 2025).

Witt, K., & Steinlechner, S. (2025). Recovery potential of spent magnesia-chrome refractories from copper and nickel industries. In A. Lazou, C. Meskers, E. Olivetti, F. Diaz, & M. Gökelma (Eds.), REWAS 2025 – Circular economy for the energy transition (pp. 213–221). Minerals, Metals and Materials Series. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80892-0_20

Rückgewinnung wertvoller Ressourcen aus sekundären Rohstoffen mittels Bioleaching im Pilotmaßstab

Clemens Habermaier[1], Sabine Spiess[1], Erik Viertauer[1], Christoph Thaler[2], Ludwig Birklbauer[2], Nina Neuwirth[2] & Marianne Haberbauer[1]
[1)] K1-MET GmbH, Linz, Österreich
[2)] voestalpine Stahl GmbH, Linz, Österreich

KURZFASSUNG: Die Rückführung metallurgischer Stäube in den Materialkreislauf der Stahlindustrie wird häufig durch hohe Zinkgehalte erschwert. Ein biologischer Laugungsprozess zur selektiven Entfernung von Zink aus Gießhallenstaub gilt als vielversprechende Alternative zu thermischen Recyclingprozessen. Dazu wurden Laborversuche mit acidophilen Mikroorganismen durchgeführt und zentrale Prozessparameter wie Belüftung, Rührintensität und die Medium-Zusammensetzung variiert, um den Laugungsprozess zu optimieren. Als besonders geeignete Mikroorganismen erwiesen sich Vertreter der Art *Acidithiobacillus thiooxidans*, welche eine hohe Säurebildungsrate aufweisen. Auf Basis der experimentellen Ergebnisse wurde ein Scale-up-Konzept für einen 1.000-L-Rührkesselreaktor entwickelt und anschließend umgesetzt. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Übertragung des Prozesses in den Pilotmaßstab erfolgreich realisiert werden konnte.

1 EINLEITUNG

Die Transformation hin zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft stellt insbesondere die Stahlindustrie vor große Herausforderungen. Diese Branche zählt zu den ressourcen- und energieintensivsten Industriezweigen und erzeugt erhebliche Mengen an Nebenprodukten, darunter metallurgische Stäube. Diese enthalten hohe Eisenanteile und stellen somit grundsätzlich eine wertvolle Sekundärrohstoffquelle dar.
Ein zentrales Problem ist jedoch der Gehalt an Schwermetallen, insbesondere Zink. Aufgrund seiner niedrigen Siedetemperatur führt Zink im Hochofenprozess zu Betriebsstörungen, indem es kondensiert und Ablagerungen in den obersten Schichten des Ofens bildet (Binnemans, Jones, Fernández & Torres, 2020). Dadurch wird die direkte Rückführung der Stäube eingeschränkt, was wiederum zu Deponierung und zusätzlichen Kosten führt.
Konventionelle Verfahren zur Metallabtrennung sind oftmals energieintensiv oder mit hohen Umweltbelastungen verbunden. Im Gegensatz dazu bietet die biologische Laugung einen alternativen Ansatz, bei dem Mikroorganismen Metalle unter milden Bedingungen mobilisieren. Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen effizienten Bioleaching-Prozess zu entwickeln und dessen Übertragbarkeit in den technischen Maßstab zu untersuchen.

1.1 Biologische Laugung

Die biologische Laugung basiert auf der Fähigkeit bestimmter Mikroorganismen, metallhaltige Sulfide oder elementaren Schwefel chemisch umzuwandeln. Besonders relevant sind acidophile Bakterien wie *Acidithiobacillus thiooxidans* und *A. ferrooxidans*, die durch biologische Oxidation Schwefelsäure erzeugen. Diese Säure wirkt als Laugungsmittel und ermöglicht die Lösung von Metallverbindungen wie Zinkoxid aus dem Staub. Während Zink relativ gut in Lösung überführt werden kann, verbleiben schwer lösliche Verbindungen im Feststoff. Die Reaktionsgleichungen der Schwefel-Oxidation (Gleichung 1) ist nachfolgend angeführt (Kremser et al., 2021).

$$S^0 + 1{,}5\ O_2 + H_2O \rightarrow SO_4^{2-} + 2\ H^+ \quad (1)$$

Im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich, dass *A. thiooxidans* gegenüber *A. ferrooxidans* eine höhere Effizienz der Schwefel-Oxidation aufweist. Dies führt zu einer erhöhten Säureproduktion, was wiederum zu niedrigeren pH-Werten und verbesserten Laugungsbedingungen führt.
Ein entscheidender Prozessparameter ist die Sauerstoffversorgung, da die Mikroorganismen aerob sind. Der Stoffübergang wird durch den volumetrischen Stoffübergangskoeffizienten (k_La) beschrieben. Eine ausreichende Sauerstoffzufuhr ist notwendig, um die bakterielle Aktivität aufrechtzuerhalten und stabile Prozessbedingungen zu gewährleisten.

1.2 Scale-up

Die Übertragung eines biotechnologischen Prozesses vom Labor- in den technischen Maßstab stellt einen komplexen Schritt dar, da zahlreiche physikalische und biologische Wechselwirkungen berücksichtigt werden müssen. Ziel des Scale-ups ist es, die im Labormaßstab erzielten Ergebnisse möglichst verlustarm auf größere Systeme zu übertragen.

1.2.1 Grundlegende Scale-up-Strategie

Ausgangspunkt der Auslegung war ein Laborreaktor mit einem Volumen von 3 L, der systematisch untersucht wurde. Auf dieser Basis wurde ein Pilotreaktor mit einem Arbeitsvolumen von 1.000 L konzipiert, was in Bezug auf den untersuchten Gießhallenstaub einer Behandlungskapazität von etwa 125 kg Staub pro Batch entspricht.
Ein wesentliches Prinzip beim Scale-up ist die Einhaltung geometrischer Ähnlichkeiten. Das Verhältnis von Reaktordurchmesser zu Flüssigkeitshöhe sowie das Verhältnis von Rührerdurchmesser zu Reaktordurchmesser wurden beibehalten, um vergleichbare Strömungsverhältnisse zu gewährleisten. Zusätzlich wurden dimensionslose Kennzahlen wie die Reynolds-Zahl und die Leistungszahl berücksichtigt, um Strömungs- und Energieeinträge zu charakterisieren.

1.2.2 Sauerstoffübertragung (k_La)

Die Sauerstoffversorgung stellt einen der kritischsten Aspekte beim Scale-up dar. Während im Labormaßstab oft ausreichend Sauerstoff verfügbar ist, kann es im größeren Maßstab zu Limitierungen kommen.
Die Sauerstoffübertragung erfolgt über Gasblasen, die im Reaktor dispergiert werden. Dabei hängt die Effizienz von mehreren Faktoren ab:

- Blasengröße und Verweilzeit
- Rührintensität
- spezifische Oberfläche der Gasblasen
- Viskosität des Mediums

Der Stoffübergang wird durch den k_La beschrieben, der im Labormaßstab experimentell bestimmt wurde. Für die Auslegung des Pilotmaßstabs wurden Modelle verwendet, die den Zusammenhang zwischen Energieeintrag und Gasgeschwindigkeit berücksichtigen.
Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine geeignete Kombination von Belüftung (ca. 0,5 vvm) und Rührgeschwindigkeit eine ausreichend hohe Sauerstoffversorgung sichergestellt werden kann. Gleichzeitig muss ein Kompromiss gefunden werden, da erhöhte Rührleistungen mit einem höheren Energieverbrauch sowie einer verstärkten mechanischen Belastung (Scherstress) der Mikroorganismen führen.

1.2.3 Rührtechnik und hydrodynamische Effekte

Die Durchmischung des Reaktors ist entscheidend für die Homogenität des Systems und den Stofftransport. Im Pilotmaßstab wurde ein zweistufiges Rührsystem vorgesehen, bestehend aus:

- einer Rushton-Turbine für Gasdispersion
- einem Schrägblattrührer zur Durchmischung

Die komprimierte Luft wird unterhalb des Rührsystems über eine Ringbrause eingeblasen und fein im Reaktor verteilt. Dieses Design (Abbildung 1) ermöglicht eine effiziente Sauerstoffübertragung bei gleichzeitig gleichmäßiger Verteilung der Feststoffpartikel.
Ein kritischer Parameter ist die Umfangsgeschwindigkeit des Rührers („Impeller Tip Speed“). Zu hohe Werte können zu einer Schädigung der Mikroorganismen infolge erhöhter Scherkräfte führen (Takors, 2014). Im vorliegenden Konzept wurde daher ein Bereich gewählt, der sowohl ausreichende Durchmischung als auch die biologische Stabilität gewährleistet.



Abb. 1: Design des Begasungssystems und der Rührorgane im Pilotreaktor.

1.2.4 Massen- und Energiebilanzen

Für die Auslegung des Reaktors wurden detaillierte Stoff- und Energiebilanzen erstellt. Pro Batch werden etwa 125 kg Staub eingesetzt, wobei ein Teil der Masse infolge der Laugung in die Flüssigphase übergeht. Die Massenbilanz eines Batch-Experiments ist in Abbildung 2 gezeigt.

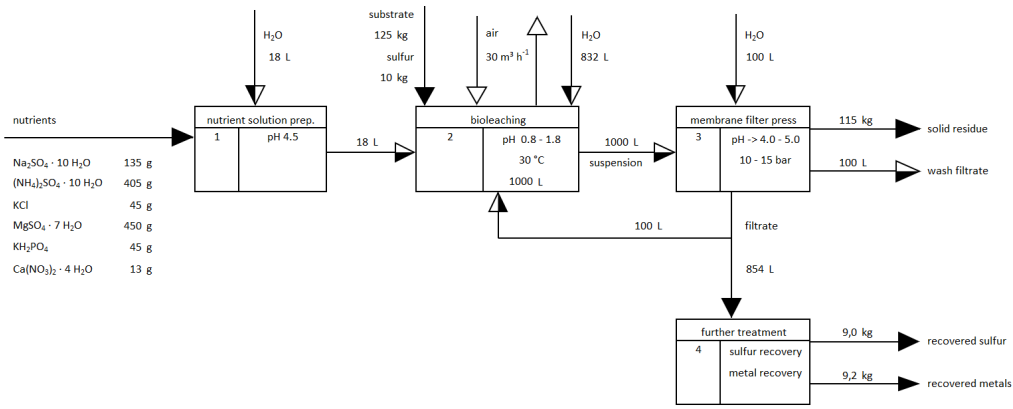


Abb. 2: Massenbilanz eines Batch-Versuches in Pilotmaßstab.

Die Suspension weist eine Dichte von etwa 1,097 kg/m³ auf, was bei der Berechnung von Strömungs- und Energiegrößen berücksichtigt wurde.
Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Wärmehaushalt des Systems. Durch die mikrobielle Aktivität wird Wärme freigesetzt, die abgeführt werden muss, um stabile Prozessbedingungen zu gewährleisten. Gleichzeitig treten Wärmeverluste über die Reaktoroberfläche auf. Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass im Pilotmaßstab eine aktive Kühlung erforderlich ist, um eine konstante Betriebstemperatur von etwa 30 °C zu gewährleisten.

1.2.5 Prozessintegration und Apparateauswahl

Neben dem Reaktor selbst wurde auch die periphere Anlagentechnik in die Auslegung einbezogen. Dazu gehören insbesondere:

- Belüftungssystem (Luftzufuhr)
- Temperaturregelung
- Sensorik (pH, Redoxpotential, Temperatur)
- Fest-Flüssig-Trennung

Für die Abtrennung der Feststoffe wurde eine Filterpresse vorgeschlagen, die eine effiziente Separation der gelaugten Stäube ermöglicht. Gleichzeitig kann das Filtrat teilweise als Inokulum in den Prozess zurückgeführt werden, wodurch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens verbessert wird.
Auch die Auswahl geeigneter Materialien spielt eine wichtige Rolle, da stark saure Betriebsbedingungen vorliegen. Edelstahl (z. B. AISI 316L / 1.4404) wurde aufgrund seiner Korrosionsbeständigkeit als geeignet bewertet.

1.3 Aufbau und Inbetriebnahme

Der Pilotreaktor wurde vorerst ohne Filterpresse in Betrieb genommen. Betriebsrelevante Parameter wie Reaktortemperatur, Zulufttemperatur, Begasungsrate, pH-Wert sowie Redoxpotential (ORP) werden über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) kontinuierlich erfasst und ausgewertet. So können der Reaktionsverlauf überwacht und mögliche Störungen in der Reaktionskinetik oder im Anlagenbetrieb frühzeitig erkannt werden. Darüber hinaus wurden geeignete Sicherheitseinrichtungen implementiert, um einen sicheren Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Der finale Aufbau ist in Abbildung 3 dargestellt.



Abb. 3: Aufbau der Pilotanlage im Technikum der K1-MET GmbH

1.4 Ergebnisse

Die im Labormaßstab durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass der Bioleaching-Prozess grundsätzlich geeignet ist, Zink selektiv aus Gießhallenstaub zu entfernen. Die erzielten Laugungseffizienzen belegen eine signifikante Reduktion des Zinkgehalts im Feststoff, wobei Restgehalte von unter 0,9 Gew.-% erreicht wurden. Bezogen auf die Feststoffphase lagen die Zinklaugungseffizienzen bei etwa 50 %, während Eisen nur in geringem Umfang in Lösung überging und überwiegend im Feststoff angereichert wurde. Bei Stäuben mit höheren Zinkgehalten konnte die Laugungseffizienz auf teilweise über 60 % gesteigert werden. Die Variation von Prozessparametern zeigte, dass insbesondere die Belüftungsrate und die Rührintensität einen entscheidenden Einfluss auf die Laugungseffizienz haben, da sie den Sauerstoffeintrag und damit die Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen maßgeblich beeinflussen.

Erste Versuche in der Pilotanlage zur Produktion der Schwefelsäure zeigten bereits hohe Umwandlungsraten. Die Analysen ergaben, dass die Bakterien bereits innerhalb von sieben Tagen die gesamte Schwefellast von 10 g L^{-1} oxidieren konnten. Die Versuche mit Gießhallenstaub im Pilotmaßstab werden derzeit noch durchgeführt.

2 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass Bioleaching ein vielversprechender Ansatz zur Aufbereitung metallurgischer Stäube ist. Durch die gezielte Auswahl geeigneter Mikroorganismen sowie die Optimierung zentraler Prozessparameter konnte eine Verbesserung der Zinkentfernung erzielt werden.
Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Entwicklung eines Scale-up-Konzepts, das eine Übertragung des Prozesses in den Pilotmaßstab ermöglicht hat. Die Untersuchungen zeigen, dass insbesondere die Sauerstoffübertragung sowie die hydrodynamischen Bedingungen entscheidende Einflussgrößen für die Prozessleistung sind.
Insgesamt bestätigt die Arbeit das Potenzial biologischer Verfahren für eine nachhaltige und ressourceneffiziente Metallrückgewinnung. Über den betrachteten Anwendungsfall hinaus kann Bioleaching auch in Bereichen wie Batterierecycling oder Phosphorrückgewinnung eingesetzt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Binnemans, K., Jones, P. T., Fernández, Á. M., & Torres, V. M. (2020) Hydrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from Steel Industry By-Products: A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy, Volume 6*, 505-540.

Kremser, K., Thallner, S., Strbik, D., Spiess, S., Kucera, J., Vaculovic, T., . . . Guebitz, G. M. (2021) Leachability of metals from waste incineration residues by iron- and sulfur-oxidizing bacteria. *Journal of Environmental Management*(Volume 280), 111734.

Takors, R. (2014) *Kommentierte Formelsammlung Bioverfahrenstechnik.* Springer Spektrum.

KONTAKT

DI Clemens Habermaier
clemens.habermaier@k1-met.com
+43 (0) 664 78 00 46 28
Projekt Manager in Area 2
K1-MET GmbH
www.k1-met.com

Aufbereitung sekundärer, feindisperser Hüttenzwischenprodukte – Von der Machbarkeit zum Anlagenkonzept zur Inbetriebnahme

Stefan Jäckel[1] & Justus Ihle[2]
[1)] POWPRO GmbH, Geschäftsführender Gesellschafter, Dresden, Deutschland
[2)] Feinhütte Halsbrücke GmbH, Leiter Metallurgie, Halsbrücke, Deutschland

KURZFASSUNG: Die Feinhütte Halsbrücke GmbH modernisierte ihre Aufbereitungstechnologie zur Herstellung hochwertiger Zinn- und Bleilegierungen sowie zur Verwertung metallhaltiger Sekundärstoffe. Im Mittelpunkt steht die Entwicklung einer neuen Aufbereitungsanlage, in der unterschiedliche Sekundärmaterialien gemeinsam mit Reduktionsmitteln und Feinstäuben vor dem Einsatz im Ofen gemischt, granuliert und anschließend brikettiert werden. Durch die vorgelagerte Homogenisierung der Einsatzstoffe wird der Kontakt zwischen Kohlenstoff und oxidischen Bestandteilen verbessert, wodurch die Verhüttung effizienter gestaltet werden kann. Dies führt zu einer Reduzierung des Kohlenstoff- und Energieverbrauchs, einer Steigerung der Produktivität sowie einer Verringerung der Staubemissionen beim Schüttguthandling. Die nachgeschaltete Brikettierung erhöht zusätzlich die Lagerfähigkeit der Einsatzstoffe und verhindert deren Entmischung. Der Vortrag stellt den Weg von der Machbarkeitsbetrachtung über die Entwicklung des Anlagenkonzeptes bis zur Inbetriebnahme der neuen Aufbereitungsanlage im Jahr 2024 vor und gibt einen Einblick in die dabei eingesetzte Verfahrenstechnik.

1 AUSGANGSSITUATION, ANLAGENKONZEPT UND UMSETZUNG

1.1 Unternehmens- und Prozesshintergrund

Feinhütte Halsbrücke GmbH kann auf eine über 400-jährige Historie am Standort zurückblicken. Damit ist der Hüttenstandort einer der ältesten, noch in Betrieb befindlichen, weltweit. Heute werden am Standort Halsbrücke qualitativ hochwertige Metalle und Metalllegierungen in mannigfaltigen Zusammensetzungen, Varianten, Formaten – und Reinheiten produziert. Mit modernsten Technologien und weitreichendem metallurgischem Know-how ist die Feinhütte zudem in der Lage, praktisch alle Arten von Zinn- und Bleirückständen als Sekundärmaterial aufzuarbeiten – ressourcensparend, umweltschonend und wirtschaftlich.

Um bei optimalem Energie- und Ressourceneinsatz die kundenseitig geforderten Reinheitsgrade im Endprodukt abbilden zu können, müssen die Primär- und Sekundärmaterialien vor der Verhüttung vorbereitende Prozesse durchschreiten. Elementar für die Prozessführung bei der Verhüttung und die Produktqualität nach der Verhüttung ist die Bereitstellung der richtigen Mischung aus Aufgabematerialien (Gattieren) für den Ofenprozess.

1.1.1 Bisheriger Aufbereitungsprozess

Neben den unterschiedlichen Primärmaterialien (Pb/Sn-Schrott) werden dem Ofenprozess Schlackebildner (Glas, Sand, Soda, Kalksplitt) und Reduktionsmittel (Koks, Steinkohle) zugegeben. Gleichzeitig werden bei der Raffination anfallenden, noch metallhaltigen Sekundärstoffe und die beim Schmelzprozess anfallenden Feinstäube aufgefangen und zur Erhöhung der Metallausbeute erneut dem Ofen zugeführt.

In der bisherigen Technologie zur Aufbereitung von verschiedensten Primär- und Sekundärmaterialien findet die Mischung aller Zuschlagstoffe weitestgehend im Kurztrommelofen, also während der laufenden Verhüttung statt. Nur die aus dem Abgasstrom des Ofens abgeschiedenen Fein-

und Feinststäube werden separat unter Zugabe von Wasser und/oder zu verwertenden Suspensionen und Schlämmen im Mischer der Anlage gemischt und gleichzeitig einer Aufbaugranulation unterzogen. Es entstehen so feste Granulate mit einer Restfeuchte von 10 – 13 %, die sich gut und nahezu staubfrei dem Ofenprozess zudosieren lassen.

1.1.1.1 Optimierter Aufbereitungsprozess

Im neuen, optimierten Ofenprozess sollen die in der Raffination anfallenden, unterschiedlichen Sekundärmaterialien (Krätzen, Puder, Stäube) direkt mit dem Reduktionsmittel (Koks, Steinkohle) und den Feinstäuben aus der Abgasbehandlung gemischt und granuliert werden. Wie im laufenden Prozess werden der Mischung hier als Flüssigphase Wasser, Suspensionen und Schlämme hinzugefügt. Das Vermischen von Kohlenstoff und oxydischem Sekundärmaterial vor dem Einsatz im Ofen soll so einen besseren Kontakt des Kohlenstoffs mit dem gebundenen Sauerstoff ermöglichen und sich damit energetisch positiv auf die Prozessführung auswirken.

Der betriebswirtschaftliche Nutzen dieser Vorgehensweise liegt im Wesentlichen in den folgenden Punkten:

- Durch diese räumliche Annäherung der Komponenten können sowohl der Kohlenstoffverbrauch als auch die Reaktionszeit während der Verhüttung verringert werden.
- Durch eine effizientere Verhüttung kann der spezifische Energieverbrauch gesenkt und damit die Produktivität gesteigert werden.
- Die Mischung und Granulation der Rohstoffe reduziert die Staubexposition (Flugstaub) im Betriebsgelände effektiv.

1.1.1.2 Lagerung und Brikettierung

Aufgrund der Chargen- und Produktvielfalt der Aufgabegüter ist die Zwischenlagerung der vorgemischten Granulate über einen Zeitraum von mindestens 6–8 Wochen erforderlich. Mit fortschreitender Lagerzeit kommt es zur Durchtrocknung und zum Zerfall der Granulate. Wird dem Mischvorgang eine Brikettierung nachgeschaltet, kann unabhängig vom Feuchtegehalt eine noch festere Bindung der Materialien untereinander erfolgen. Neben Vorteilen im Schüttguthandling und der Erhöhung der Lagerfähigkeit wird so eine Entmischung der verpressten Materialien wirksam verhindert.

1.1.1.3 Projektumsetzung

Der Vortrag gibt einen Einblick in den Ablauf und die Verfahrenstechnik eines der größten Modernisierungsprojekte der Feinhütte Halsbrücke GmbH am Standort – von der Machbarkeit über das Anlagenkonzept bis zur Inbetriebnahme der Aufbereitungsanlage im Jahr 2024.

2 ZUSAMMENFASSUNG

Mit der neuen Aufbereitungsanlage wurde die Grundlage für einen optimierten Ofenprozess geschaffen. Durch die vorgelagerte Mischung, Granulation und anschließende Brikettierung der Einsatzstoffe können die Prozessführung verbessert, Energie- und Kohlenstoffverbrauch reduziert sowie Staubemissionen im Betrieb verringert werden. Gleichzeitig wird die Lagerfähigkeit der aufbereiteten Materialien erhöht und eine Entmischung wirksam verhindert. Das Projekt zeigt den Weg von der Machbarkeit bis zur erfolgreichen Inbetriebnahme der Anlage im Jahr 2024.

Zinc flexible RecoDust process

Wolfgang Reiter[1], Klaus Doschek-Held[2] & Christoph Thaler[3]
[1)] K1-MET GmbH, Area 1, Leoben, Austria
[2)] Technical University of Leoben / Chair of Thermal Processing Technology, Leoben, Austria
[3)] voestalpine Stahl GmbH, Abteilung, Linz, Austria

ABSTRACT: Future steel plants will generate dust with widely varying zinc contents, driven by differing electric arc furnace (EAF) feedstocks such as scrap blends, hot briquetted iron (HBI), or direct reduced iron (DRI). The RecoDust process is engineered to manage this variability by processing dusts of mixed composition and, contingent upon the specific settings of the Flash-Reactor (including temperature, residence time, and gas atmosphere), attaining zinc extraction efficiencies greater than 99%. The first product, RecoDust Slag (RDS), is low in zinc and can be recycled internally as a synthetic iron ore, replacing part of the burden in sinter, pellet, or direct-charge routes. Its consistent chemistry helps stabilise furnace operations while reducing the need for primary ore and minimising landfilling of EAF dusts. The second product, Crude Zinc Oxide (CZO), features a high ZnO content, making it a viable secondary raw material for zinc production and suitable for established routes such as Waelz processing or hydrometallurgical refining, with impurity levels manageable through downstream treatment. By decoupling iron and zinc cycles, RecoDust enhances circularity, cuts waste disposal, and increases flexibility in sourcing and operating conditions, allowing steelmakers to adapt to changing feedstock markets without sacrificing metal recovery or environmental performance.

1 INTRODUCTION

The trend in iron and steel metallurgy (Ehrenberg, 2024) towards higher steel production volumes and lower climate-impacting emissions leads to dust with variable compositions; in particular, the use of scrap results in varying zinc contents in the dust.
A suitable process for zinc recovery is required, specifically for the utilisation of dusts from electric arc furnaces and the blast furnace/converter route. (Colla et al., 2023) Landfilling this hazardous waste is not consistent with the principles of a circular economy.
The most common aggregate for the recycling of Electric arc furnace dusts is the Waelz process, which has some disadvantages: zinc content of the waelz slag of more than 4.5 % and a zinc separation of about 89 %. (von Billerbeck, 2026)

2 TEST PROCEDURE AND THE RECODUST PILOT PLANT

Figure 1 presents the RecoDust pilot plant situated at the Chair of Thermal Processing Technology (Montanuniversität Leoben), which has a maximum throughput capacity of 250 kg/h. Its principal components comprise a storage tank for pneumatic conveying, a Flash-Reactor, a converter, a quench, and a filter. Dust is pneumatically conveyed to the burner, utilizing natural gas as the conveying medium, wherein sub-stoichiometric combustion facilitates the creation of a mildly reducing atmosphere within the Flash-Reactor. Under these conditions, the feedstock undergoes melting, zinc is reduced and evaporates, and the off-gas is thermally stabilized in the converter. Following quenching, the Crude Zinc Oxide (CZO) is collected in the filter. The secondary product, RecoDust slag (RDS), consists of non-volatile constituents and is intermittently tapped. The feed vessel is equipped with a load cell to monitor the dosing rate.

The smelting conditions for an exemplary trial are a Flash-Reactor temperature of 1700°C, an air excess ratio of 0.9, and a target dosing rate of 230 kg h^{-1}. The feedstock consists of 82 % basic oxygen furnace dust and 18 % electric arc furnace dust.

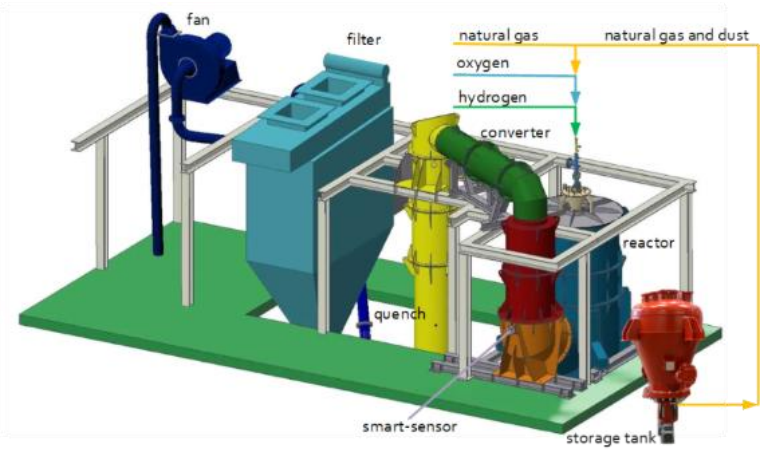


Fig. 1: RecoDust pilot plant (Reiter, et al., 2023)

3 RESULTS AND MATERIAL FLOW ANALYSIS

A material flow analysis offers essential insights into the quantitative and qualitative movement of materials within a specified system. This facilitates a comprehensive understanding of resource efficiency, potential environmental impacts, and opportunities for optimisation. The analysis is conducted based on the average across trials under identical operating conditions. The results are utilized to compute several Key Performance Indicators (KPIs) and serve as the foundation for subsequent Life Cycle Assessments (LCAs).

An exemplary mass flow analysis for the total mass flow of zinc and iron is shown in Fig. 2. It is shown that nearly 691 kg were fed into the RecoDust pilot plant, with the largest output stream being RecoDust slag at 539.5 kg, followed by the second product, Crude Zinc Oxide, at 72.2 kg. The other product streams are deposits in the gas purification pipe, including the Quench (QU), Converter knee (CK), Converter beginning (CB), and Converter ending (CE). The relatively high level of disposals is due to the non-ideal arrangement of the exhaust gas line.

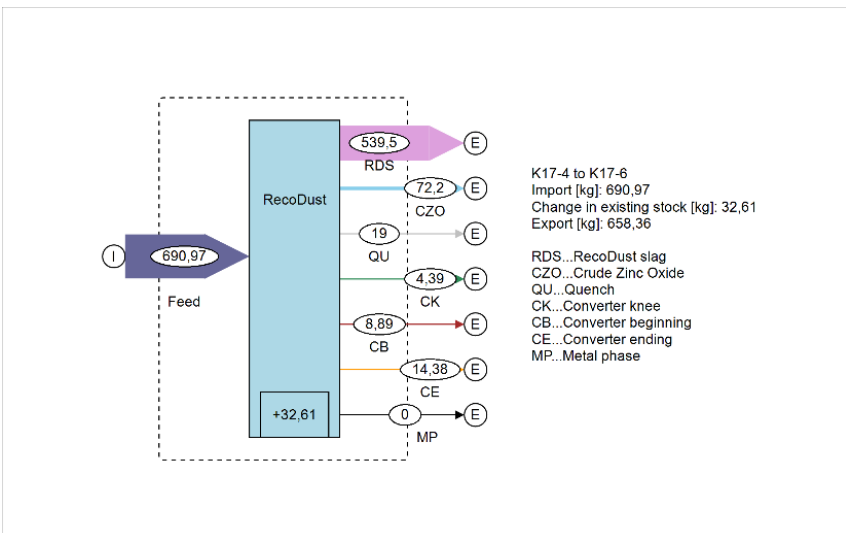


Fig. 2: Mass flow of an exemplary RecoDust trial

The flow analysis of the element zinc (Figure 3) indicates that approximately 90 kilograms of zinc were introduced into the RecoDust pilot plant, including roughly 56.2 kilograms in the CZO. A minimal amount of 1.56 kilograms remains within the RDS. The remaining zinc is deposited in the exhaust gas line, with 12.73 kilograms accumulating in the RecoDust process. This demonstrates that less than 2% of the zinc is captured in the RDS.

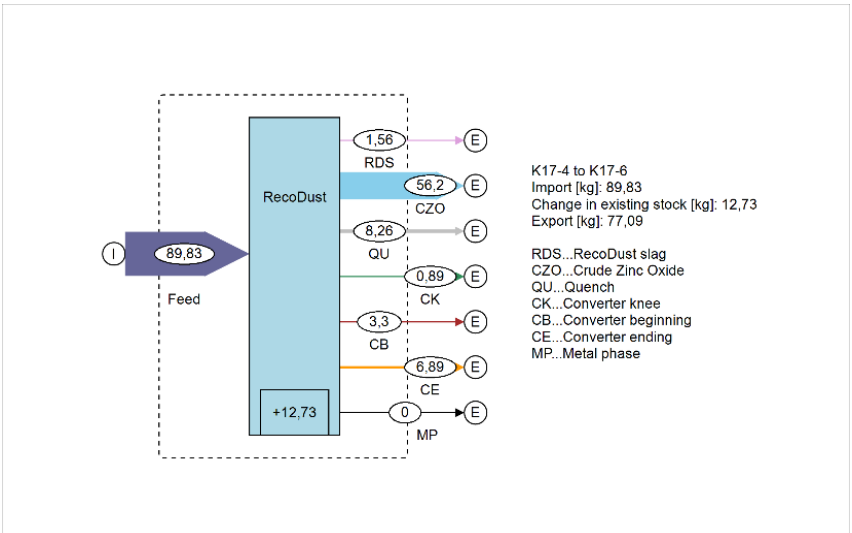


Fig. 3: Zinc balance of an exemplary RecoDust trial

4 PRODUCT QUALITY AND OUTLOOK

The primary quality criterion of the RDS is the zinc content; the lower the content, the more desirable it is. For comparison with the waelz process, the zinc separation degree is a highly useful metric and is calculated as follows:

$$Zn_{sep} = (1 - \frac{m_{ZnRDS}}{m_{ZnFeed}}) * 100 \quad (1)$$

In Table 1, the Zn_{sep} of each trial is provided.

Tab. 1: Zinc separation degree of different trials

ZnO feed / %	Zn_{sep} / %	Air excess ratio / -
23.53	99.4	0.8
24.15	99.3	0.8
7.36	98.2	0.9
16.1	98.3	0.9

According to Reiter (Reiter, Verwertungsmöglichkeiten der RecoDust-Schlacke, 2020), a zinc separation efficiency exceeding 98% is requisite for the utilization of RecoDust Slag (RDS) as a substitute for iron ore within an integrated steel manufacturing process. This is particularly pertinent for its application as sinter feed and subsequent use in the blast furnace. The degree of zinc separation is predominantly affected by the air excess ratio in the conducted experiments, given that the temperature of the Flash-Reactor remains constant throughout all trials. The zinc separation degree of the high-zinc feedstocks exceeds 99 % but diminishes as the air excess ratio increases.

The second product, the CZO, should meet sailing requirements due to a higher zinc content, reaching up to 75%, compared to 63% in waelz oxide (von Billerbeck, 2026). The next steps involve a comparative analysis of RecoDust technology with alternative methods (e.g., FASTMET, Primus®, Waelz) for zinc extraction or sublimation, along with a comparison of the properties of the final products.

REFERENCES

von Billerbeck, E. (2026) Befesa. Von https://images.befesa.com/media/2022/04/Umweltbericht-2021-der-Befesa-Zinc-Duisburg-GmbH.pdf. 18. Juni 2026.

Colla, V., Branca, T., Peitruck, R. W., Morlillon, S., Algermissen, D., & Snaet, D. (2023) Future resarch and developments on reuse and recycling of steelmaking by-prodcuts. *Metals*, 13.

Ehrenberg, A. (2024) The Steelmaking Transformation Process and Its Consequences for Slag Utilization. *steel resarch international*, 28.

Reiter, W. (2020) Verwertungsmöglichkeiten der RecoDust-Schlacke. Leoben. 05.12.2020.

Reiter, W., Rieger, J., Raupenstrauch, H., Cattine, L., Maystrenko, N., Kovalev, D., . . . Mitrofanov, A. (2023) Recovery of Valuable Materials with the RecoDust Process. *Metals*, 13.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge the funding support of K1-MET GmbH, a metallurgical competence centre. The research programme of the K1-MET competence center is supported by COMET (Competence Center for Excellent Technologies), the Austrian programme for competence centers. COMET is funded by the Federal Ministry for Innovation, Mobility, and Infrastructure, the Federal Ministry for Economy, Energy, and Tourism, the Federal States of Upper Austria, Tyrol and Styria as well as the Styrian Business Promotion Agency (SFG) and the Standortagentur Tyrol. Furthermore, Upper Austrian Research GmbH continuously supports K1-MET. Beside the public funding from COMET, this research project is partially financed by the industrial partner voestalpine Stahl GmbH and the scientific partner Technical University of Leoben.

CONTACT

Wolfgang Reiter
Wolfgang.Reiter@k1-met.com
+4366488949112
Area 1
K1-MET GmbH
K1-met.com

WattsOK? Reuse und Recycling von PV-Modulen – technologische und ökologische Entscheidungsgrundlagen

Simon Prüller[1], Therese Bouvier-Schwarz[2] & Thomas Nigl[2]
[1)] 2nd Cycle FlexCo, Amstetten, Österreich
[2)] Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Der weltweite Ausbau der Photovoltaik verlagert die zentrale Frage vom Bau hin zum Umgang mit alternden Anlagen: Mit jeder Modulgeneration wächst die Menge ausgebauter Module, für die zu entscheiden ist, ob sie wiederverwendet oder hochwertig recycelt werden. Der eigentliche Engpass einer zirkulären Photovoltaik liegt nicht beim Recycling am Lebensende, sondern wird durch die Entscheidungsqualität auf Modulebene bestimmt, welche industriellen Durchsatz, standardisierte Diagnostik und lückenlose Rückverfolgbarkeit erfordert. Am Beispiel von 2nd Cycle wird eine automatisierte Prüf- und Aufbereitungsplattform beschrieben, die gebrauchte Module in Laborqualität, aber im industriellen Durchsatz charakterisiert und dann datenbasiert den Entscheidungspfad Reuse oder Recycling wählt. Zur ökologischen Bewertung wurden szenariobasiert Werte für die Energy Payback Time (EPBT) errechnet. Eine erste Bilanzierung auf Basis von Primärdaten ergibt eine EPBT von 0,78 Jahren im First Life und 0,13 Jahren im Second Life und unterstreicht damit den ökologischen Nutzen von PV-Reuse.

1 EINLEITUNG

Die Energiewende ist unmittelbar mit dem Ausbau erneuerbarer Energietechnologien verbunden. In Österreich betrug die Bruttostromerzeugung im Jahr 2024 knapp 81.900 GWh; davon entfielen 7.645 GWh auf Photovoltaik. Gegenüber dem Vorjahr entspricht dies einer Steigerung von 47,4 % (E-Control, 2025). Mit dem starken Ausbau von Photovoltaikanlagen rücken zunehmend auch Fragen des End-of-Life-Managements in den Vordergrund. Dabei stellt sich nicht nur die Frage, wie PV-Module am Ende ihrer technischen Nutzungsdauer möglichst effizient und ökologisch recycelt werden können, sondern ob ein ausgebautes Modul tatsächlich bereits Abfall ist oder ob es nach geeigneter Prüfung noch sicher und wirtschaftlich in einem zweiten Lebenszyklus eingesetzt werden kann. Der vorliegende Beitrag adressiert daher die Schnittstelle zwischen Reuse und hochwertigem Recycling und zeigt, warum eine standardisierte, prüfungsbasierte Entscheidung auf Modulebene eine zentrale Voraussetzung für zirkuläre Photovoltaik ist.

2 HERAUSFORDERUNGEN UND AKTUELLE RAHMENBEDINGUNGEN

Mit dem zunehmenden PV-Anlagenbestand wächst jedoch auch die künftige Menge an Modulen, die im Zuge von Repowering, Rückbau, Schadensereignissen oder technischen Erneuerungen ausgebaut werden. Diese Entwicklung erzeugt nicht nur eine Mengenfrage, sondern vor allem eine Qualitäts- und Entscheidungsfrage: Welche Module können sicher weiterverwendet werden, welche sind reparaturfähig und welche müssen einem hochwertigen Recycling zugeführt werden?

Der Engpass einer zirkulären Photovoltaik liegt nicht ausschließlich im Recycling am Lebensende, sondern bereits in der Entscheidungsqualität auf Modulebene. Eine belastbare Entscheidung erfordert industriellen Durchsatz, standardisierte Diagnostik, dokumentierte Prüfergebnisse und lückenlose Rückverfolgbarkeit.

In der Praxis erfolgt diese Entscheidung bislang häufig anhand einfacher Kriterien, etwa ob ein Modul noch Leistung liefert oder sichtbare Beschädigungen aufweist. Für eine belastbare Reuse-Entscheidung ist das nicht ausreichend. Sicherheits- und Alterungsrisiken wie Backsheet-Schäden, Delamination, Zellrisse, Potential-Induced Degradation, Hotspots oder defekte Bypassdioden lassen sich mit einfachen Sicht- oder Leistungsprüfungen nur unzureichend erfassen (Köntges et al., 2014). Für eine qualifizierte Bewertung sind daher mehrere komplementäre Prüfverfahren erforderlich, die elektrische, optische und materialbezogene Informationen zusammenführen.

Eigene Prüfdaten aus bisherigen Projekten zeigen, dass die reine Leistungsdegradation defektfreier kristalliner Siliziummodule häufig geringer ist als die öffentliche Wahrnehmung vermuten lässt. In den bisher untersuchten Modulchargen lagen die beobachteten jährlichen Leistungsverluste vielfach im Bereich von etwa 0,1 bis 0,25 % pro Jahr. Defektfreie Module können somit auch nach längerer Betriebsdauer noch einen hohen Anteil ihrer ursprünglichen Nennleistung aufweisen. Kritisch sind daher nicht zwingend gealterte Module als Gesamtheit, sondern einzelne Defektmodule innerhalb eines Bestands. Diese können Mismatch-Verluste verursachen, ganze Strings in ihrer Leistung begrenzen und in bestimmten Fällen auch sicherheitsrelevante Risiken darstellen.

Ohne Diagnostik auf Modulebene werden solche Defekte häufig als normale Alterung des Gesamtparks interpretiert. Dadurch bleiben werthaltige Module ungenutzt, während einzelne fehlerhafte Module den Weiterbetrieb oder eine Zweitnutzung ganzer Chargen erschweren. Die Herausforderung besteht somit darin, funktionstüchtige, sichere und leistungsfähige Module zuverlässig von nicht geeigneten Modulen zu trennen.

2.1 Rahmenbedingungen und Reuse-Paradox

Der regulatorische Rahmen adressiert PV-Module zunehmend als relevanten Abfall- und Ressourcenstrom (Richtlinie 2012/19/EU über Elektro-Und Elektronik-Altgeräte, 2012). Die praktische Umsetzung ist jedoch mit einem strukturellen Spannungsfeld verbunden. Einerseits ist Reuse aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht sinnvoll, wenn dadurch die Nutzungsdauer sicherer und leistungsfähiger Module verlängert wird. Andererseits besteht die Gefahr, dass ausrangierte Module unter dem Begriff „gebrauchte Ware“ unzureichend geprüft oder nicht dokumentiert weitergegeben werden und damit einer kontrollierten Erfassung, Prüfung und Verwertung entzogen werden.

Dieses Spannungsfeld lässt sich als Reuse-Paradox beschreiben: Reuse kann ökologisch vorteilhaft sein, führt aber nur dann zu einer tatsächlichen Kreislaufwirtschaft, wenn technische Sicherheit, Restleistung, Rückverfolgbarkeit und ein gesicherter End-of-Life-Pfad gewährleistet sind. Ohne standardisierte Prüfung besteht das Risiko, dass nicht geeignete Module exportiert oder weiterverwendet werden, ohne dass ihr Zustand belastbar dokumentiert ist. Gleichzeitig fehlen diese Mengen in den regulären Sammel- und Verwertungsstrukturen, wodurch der Aufbau spezialisierter Recyclingkapazitäten erschwert wird (Komoto et al., 2025).

Die Position dieses Beitrags ist daher bewusst differenziert: Reuse und Recycling sind keine Gegensätze. Reuse ist dann sinnvoll, wenn nachgewiesen werden kann, dass Module elektrisch sicher, leistungsfähig und für den vorgesehenen Einsatz geeignet sind. Module, die diese Anforderungen nicht erfüllen, müssen einem fachgerechten und möglichst hochwertigen Recycling zugeführt werden. Die technische Voraussetzung für beide Pfade ist dieselbe: eine standardisierte, skalierbare und dokumentierte Entscheidung auf Modulebene.

2.2 Warum nicht einfach alles recyceln?

Ein naheliegender Ansatz wäre sämtliche ausgebaute Module direkt dem Recycling zuzuführen. Aus ökologischer und ökonomischer Sicht ist dies jedoch nicht zwangsläufig die beste Lösung.
Erstens würde ein unmittelbares Recycling funktionstüchtiger Module den bereits investierten Herstellungsaufwand vorzeitig entwerten. Ein PV-Modul enthält nicht nur verwertbare Materialfraktionen wie Glas, Aluminium, Kupfer, Silizium und Silber, sondern auch die in der Herstellung gebundene Energie und die damit verbundenen Emissionen (Herceg et al., 2022). Wird ein noch mehrere Jahre nutzbares Modul recycelt und durch ein Neumodul ersetzt, entstehen zusätzliche Herstellungsaufwände und Emissionen.

Zweitens ist hochwertiges PV-Recycling ein Skalengeschäft. Es erfordert kontinuierliche, ausreichend große und möglichst gut charakterisierte Modulströme. In vielen Regionen befinden sich entsprechende spezialisierte Recyclingstrukturen noch im Aufbau (Komoto et al., 2025). Eine vorgelagerte Prüfung kann dazu beitragen, den tatsächlich zu recycelnden Reststrom zu qualifizieren, zu bündeln und planbarer zu machen.
Drittens verbessert eine standardisierte Entscheidungsebene nicht nur das Reuse, sondern auch das Recycling. Sie ermöglicht eine sorten- und zustandsbezogene Steuerung der nachfolgenden Prozesse.

Die Prüfung ist damit nicht der Gegenspieler des Recyclings, sondern eine Voraussetzung für dessen industrielle Skalierung.

3 SECOND LIFE ALS UNTERNEHMENSIDEE

Die 2nd Cycle FlexCo mit Sitz in Amstetten, Niederösterreich, entwickelt industrielle Technologien für Reuse und hochwertiges Recycling von PV-Modulen. Der Ansatz umfasst Reinigung, Prüfung, Klassifizierung, Reparatur, Lebensdauerverlängerung sowie die rohstoffliche Verwertung von Modulen am tatsächlichen Lebensende. Das Unternehmen verbindet Kompetenzen aus Sondermaschinenbau, Automatisierungstechnik, Robotik, Messphysik, Datenverarbeitung und KI-gestützter Auswertung.

2nd Cycle betrachtet gealterte PV-Module nicht primär als Abfallstrom, sondern als Entscheidungsproblem. Der technologische Kern liegt in einer industriellen Entscheidungs- und Ausführungsebene zwischen dem laufenden Solarpark und dem Materialrecycling. Module werden automatisiert charakterisiert, Defekt- und Degradationsmuster werden erkannt und jedes Modul wird auf Basis definierter Kriterien einem geeigneten Folgepfad zugeordnet: Weiterbetrieb, Reparatur, Reuse, Garantie- oder Schadensfallbearbeitung oder hochwertiges Recycling. Nach Kenntnis der Autoren verbinden bislang nur wenige Ansätze eine automatisierte Multi-Diagnostik auf Modulebene mit industriellem Durchsatz und einer unmittelbar anschließenden Reuse-/Recycling-Entscheidung. Genau diese Kombination ist jedoch erforderlich, um große Modulmengen nicht nur technisch zu prüfen, sondern operativ verwertbar zu machen.

Seit Anfang 2025 betreibt 2nd Cycle eine Pilotlinie für die Prüfung und Klassifizierung gebrauchter PV-Module. In realen Projekten wurden bereits mehrere tausend Module geprüft und bewertet. Dazu zählen unter anderem Anwendungen bei Energieversorgern und Anlagenbetreibern, bei denen Schadensanalysen, Zustandsbewertungen und Reuse-Entscheidungen auf Modulebene durchgeführt wurden.

Auf der Recyclingseite wird ein modularer Anlagenansatz verfolgt. Die Entwicklung ist eng mit öffentlich geförderten Forschungsprojekten verknüpft. Im FFG-Projekt „WattsOK? – Robotics and AI Enabled Reuse of PV“ werden von den Forschungspartnern Modelle zur Fehlererkennung sowie eine ökobilanzielle Bewertung der Prozesse durchgeführt.

4 REUSE & RECYCLING TECHNOLOGISCH UMGESETZT

Der technologische Ansatz von 2nd Cycle basiert auf einer durchgängigen Systemarchitektur. Ziel ist eine geschlossene Prozesskette vom Feld über die Prüfung bis zur Entscheidung und zur jeweiligen Ausführung im Reuse- oder Recyclingpfad.

Der Systemfluss reicht von der Sammlung und dem Transport der Module (SolarBox) über die automatisierte Multi-Diagnostik bis zur qualitätsgesicherten Zuordnung zu Wiederverwendung, Reparatur oder Recycling. Damit wird aus einer reinen Prüfstation ein operatives Entscheidungs- und Ausführungssystem für PV-Modulströme (Abbildung 1).

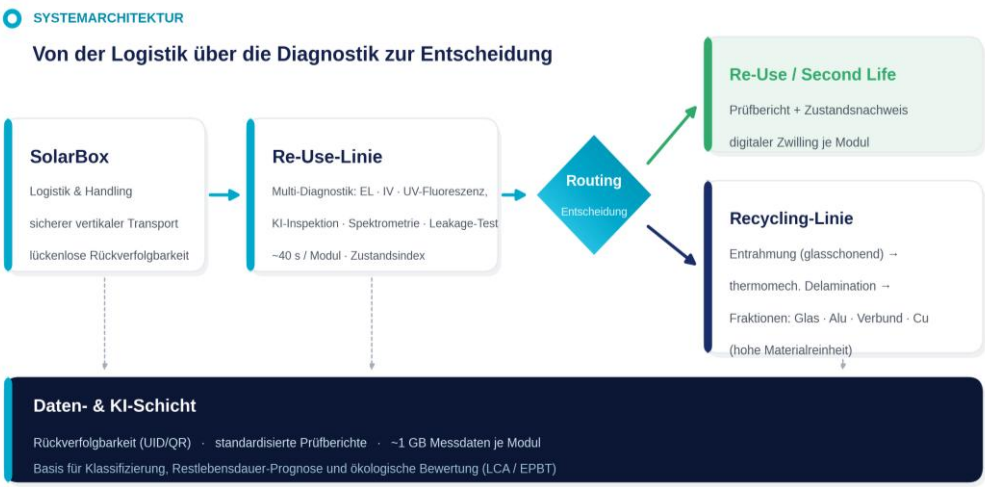


Abb. 1: Systemarchitektur von 2nd Cycle – von der Logistik über automatisierte Multi-Diagnostik und Entscheidungslogik bis zu Reuse oder hochwertigem Recycling, unterstützt durch eine durchgängige Daten- und KI-Schicht.

4.1 SolarBox: Logistiksystem und Automationsschnittstelle

Die SolarBox ist ein standardisiertes Logistiksystem für gebrauchte Module; sie ermöglicht den vertikalen Transport unterschiedlicher Formate und senkt durch definierte Lagerung und Handhabung das Risiko zusätzlicher Demontage-, Handling- und Transportschäden. Zugleich dient sie als Automationsschnittstelle: Module lassen sich ohne manuelles Umstapeln automatisiert entnehmen und der Prüflinie zuführen. So wird Logistik Teil der Qualitätssicherung, unterstützt die Rückverfolgbarkeit, reduziert Handlingrisiken und schafft die Basis für industriellen Durchsatz vom Feld bis zur automatisierten Prüfung.

4.2 Reuse-Linie: Multi-Diagnostik und standardisierte Entscheidung

Die Reuse-Linie vereint automatisiertes Handling, mehrere Prüfverfahren und eine standardisierte Auswertung in einer Zykluszeit von 40 Sekunden pro Modul zu einem integrierten Hochdurchsatzprozess. Erfasst werden Bilddaten, elektrische Kennlinien, Sicherheitsprüfdaten und materialbezogene Informationen. Ziel ist die hinreichend tiefe Zustandsaufnahme jedes Moduls und eine belastbare Entscheidung zum weiteren Nutzungspfad. Der Prüfablauf umfasst eine visuelle, KI-gestützte Inspektion, Elektrolumineszenz, Dunkelkennlinien- und Flash-/Leistungsmessung, UV-Fluoreszenz, Bypassdioden-Test, Spektrometrie und eine automatisierte Isolations- und Leakage-Prüfung.

Die technische Innovation ist die Kombination dieser Verfahren zu einer skalierbaren Entscheidungslogik: Die Bewertung beruht auf Datenfusion elektrischer, optischer und materialbezogener Quellen statt einzelner Messwerte. So wird die bisher expertenbasierte Modulbewertung digitalisiert, standardisiert und für große Mengen nutzbar.

Die Ergebnisse pro Modul sind eine eindeutige ID, digitaler Prüfbericht, Gesamtstatus und Klassifizierung für den weiteren Pfad. Die Bewertung ist konservativ: sicherheitsrelevante Auffälligkeiten führen zum Ausschluss vom Reuse; Module mit reduzierter, aber sicherer Funktion werden als B-Ware oder für definierte Anwendungen klassifiziert. Darüber hinaus ermöglicht das Vorgehen, statt einem pauschalem Komplettaustausch den Betreibern von Solarparks diesen weiterzubetreiben und selektiv zu ersetzen, zu reparieren oder zur Zweitnutzung zu überführen.

4.3 Recyclinglinie: Entrahmung, Delamination und Materialqualität

Module, die nicht für Reuse geeignet sind, werden dem Recyclingpfad zugeführt. Dabei verfolgt 2nd Cycle einen modularen High-Quality-Recycling-Ansatz.

Ein zentraler Schritt ist die Entrahmung. Das Aluminiumrahmenprofil ist eine werthaltige Fraktion; zugleich bestimmt die Art der Rahmenentfernung die Qualität der Folgeprozesse. Beschädigtes Modulglas führt zu Glasbruch, Partikelverschleppung und Verunreinigungen in nachfolgenden Materialströmen. Daher ist eine prozesssichere, möglichst spannungsarme Entrahmung entscheidend für hohe Fraktionsqualitäten.

Die von 2nd Cycle entwickelte Entrahmung verarbeitet unterschiedliche Modultypen mit geringem Umrüstaufwand. Bei intakten Modulen wird Glasbruch vermieden; bei gebrochenen Modulen wird ein prozesssicherer Ablauf inklusive Entfernung von Glasresten aus der Rahmennut gewährleistet. Ergebnis ist eine aluminiumreiche Fraktion mit reduzierter Glasverunreinigung.

Anschließend erfolgt die Trennung des Glas-Laminat-Verbundes. Intaktes Glas ist vorteilhaft, da Wärme homogener eingebracht und die Trennung gezielt an der Grenzfläche zwischen Glas und Einkapselungsmaterial geführt werden kann. Der Prozess unterscheidet zwischen intakten und gebrochenen Modulen und passt die Behandlung daran an.

Ziel ist die Erzeugung hochwertiger, weiterverwertbarer Fraktionen: eine glasreiche Fraktion, eine aluminiumreiche Fraktion, eine Verbundfraktion aus Einkapselungsmaterial, Backsheet und Zellmaterial sowie weitere Komponenten wie Junction Box, Kabel und Kupferanteile. Zentraler Hebel ist die gezielte Grenzflächentrennung bei minimalen Verschleppungen: Je geringer die Kontamination, desto höher die wirtschaftliche und technische Verwertbarkeit.

5 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG: LEBENSZYKLUSANALYSE / ENERGY PAYBACK TIME

5.1 Lebenszyklusanalyse

Im Forschungsprojekt „WattsOK?“ steht neben den technologischen Weiterentwicklungen die ökologische Betrachtung im Fokus. Mittels einer Lebenszyklusanalyse (LCA) werden die beiden Kategorien kumulierter Energieaufwand (CED) und die Treibhausgasemissionen (GWP) erhoben.

Angelehnt an die ISO-Normen 14040ff (ISO 14040ff:2006) und 14067 (ISO 14067:2018) wurden in der einleitenden „Goal & Scope“-Phase die wichtigsten Parameter und Rahmenbedingungen für die Berechnung festgelegt. Ziel ist es, „den ökologischen Fußabdruck (Emissionen) verschiedener End-of-Life-Szenarien für PV-Anlagen in Österreich zu bewerten. Ziel für diesen Beitrag ist es, in einem ersten Schritt die Energierücklaufzeit (Energy Payback Time, EPBT) zu ermitteln. Daher wurden die Systemgrenzen vom Ende des ersten Lebenszyklus (Eo1L) bis zum Ende der Produktlebensdauer (EoPL) definiert.

Im Rahmen mehrerer Gespräche mit den Projektpartnern wurden die spezifischen (österreichischen) Rahmenbedingungen, die derzeit verfügbaren Daten und die Zielvorgaben überprüft. Auf dieser Grundlage wurde eine erste Beschreibung des Ziels und Umfangs erstellt. Es wird eine Szenarioanalyse durchgeführt, um einen Vergleich von drei verschiedenen Optionen für PV-Module am Ende ihrer Lebensdauer zu ermöglichen:

- „Alles wird recycelt“ – nur Recyclingverfahren
- „Reuse/Recycling 2026“ – Reuse und aktuelles Recyclingverfahren
- „Reuse/Recycling Zukunft“ – Reuse und zukünftiges optimiertes Recyclingverfahren

Herauszuheben ist, dass die Daten der Szenarien real erhobene oder aus Anlagendaten geschätzte Werte darstellen und damit das End-of-Life im Gegensatz zu anderen Studien großteils mit Primärdaten abgebildet wird.

5.2 Energy Payback Time

Parallel dazu wird die Energy Payback Time (EPBT) ermittelt, welche darstellt, wann die Energie, welche eine PV-Anlage erzeugt und ins Netz einspeist größer ist als der Energieeinsatz, welcher für Material, Herstellung, Betrieb, Infrastruktur verwendet wurde. Eine Definition und Berechnungsgrundlage wurde dazu von der internationalen Energieagentur veröffentlicht (Frischknecht et al., 2020). Die in das System eingeflossenen Energiewerte wurden mittels EcoInvent 3.10 cut-off Datensätzen modelliert und umfassen Rohstofferzeugung, Produktion, Infrastruktur, First Life Betrieb, Wartung und Installation und Transport. Bei den End-of-Life Szenarien wurden die ersten zwei Szenarien dargestellt. Hiermit wird ein Vergleich, ob Reuse ökologisch sinnvoll ist, sichtbar. In der folgenden Abbildung 2 wird dargestellt, welche Faktoren miteinander verglichen wurden.

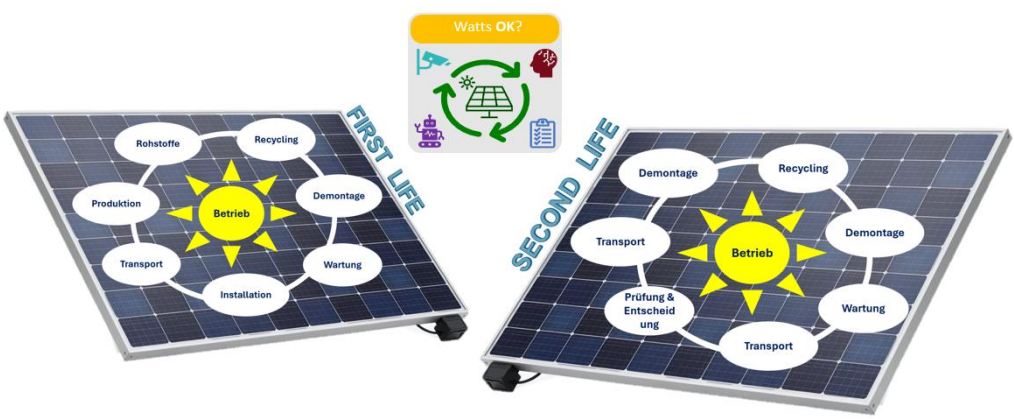


Abb. 2: Darstellung der in die EPBT eingegangen Lebenszyklusphasen eines PV-Moduls im First und Second Life

Für die Berechnung wurden folgende Annahmen getroffen: die Größe der zugrundeliegenden Anlage wurde mit 100 m^2 angenommen. Aufgrund aktueller Erfahrungen seitens der Literatur (Frischknecht et al., 2020) und der Fa. 2nd Cycle wurde die durchschnittliche Lebensdauer im First Life mit 15 Jahren, die im Second Life mit 10 Jahren angenommen. Ein mittlerer österreichischer Jahresertrag von 1050 kWh/kWp*a lag der Berechnung zugrunde. Das Ergebnis der Berechnung zeigt eine EPBT für das First Life von 0,78 Jahren und für das Second Life 0,13 Jahre.

Daraus lässt sich schließen, dass das Reuse Szenario die Umweltwirkungen weiter senken kann trotz weiterer energetischer Aufwände für die hochqualitative Prüfung und neben einer erneuerbare Energieerzeugung auch zur Ressourceneinsparung beiträgt. Besonders vorteilhaft ist das hier dargestellte Second Life, da im Vergleich zum First Life nur Prüf-, Reinigungs-, Transport- und Reinstallationsenergie aber keine Modulherstellung anfällt.

Reuse ist ökologisch vorteilhaft, wenn sichere, leistungsfähige Module identifiziert und ihre Nutzungsdauer verlängert werden; so werden Neumodule teilweise substituiert und investierte Energie- und Emissionsaufwände länger genutzt. Hochwertiges Recycling ersetzt bei nicht reuse-fähigen Modulen Primärrohstoffe und senkt Materialverluste am Lebensende. Entscheidend ist die zustandsbasierte Zuordnung jedes Moduls zum ökologisch und ökonomisch sinnvollsten Pfad – als Schnittstelle zwischen industrieller Technologie und ökobilanzieller Bewertung.

6 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Die technische Architektur der Prozesse schafft die Grundlage für eine differenzierte ökologische Bewertung. Reuse kann dann ökologische Vorteile erzeugen, wenn sichere und leistungsfähige Module identifiziert und ihre Nutzungsdauer verlängert werden. Dadurch kann die Herstellung neuer Module teilweise substituiert und der bereits investierte Energie- und Emissionsaufwand länger genutzt werden. Hochwertiges Recycling wiederum kann bei nicht reuse-fähigen Modulen Primärrohstoffe ersetzen und die Materialverluste am Lebensende reduzieren.

Entscheidend ist daher nicht ein pauschales „REUSE statt Recycling“ oder „Recycling statt REUSE“, sondern eine zustandsbasierte Zuordnung jedes Moduls zum technisch, ökologisch und ökonomisch sinnvollsten Pfad.

7 DANKSAGUNG

Die Autor:innen bedanken sich beim Projektkonsortium von WattsOK? Für die gute Zusammenarbeit im Projekt und beim Fördergeber des Projektes (Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft; FFG-Nr. FO999923026).

LITERATURVERZEICHNIS

E-Control (2025). EAG-Monitoringbericht 2025. Berichtsjahr 2024. www.e-control.at

Frischknecht, R., Stolz, P., Heath, G., Raugei, M., Sinha, P., de Wild-Scholten, M. (2020) Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic. (IEA-PVPS Task 12:2020) Paris: IEA-PVPS.

Herceg, S., Fischer, M., Weiß, K.-A. & Schebek, L. (2022). Life cycle assessment of PV module repowering. Energy Strategy Reviews, 43, 100928. https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100928

International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040:2006: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. International Organization for Standardization.

International Organization for Standardization. (2018). ISO 14067:2018: Greenhouse gases—Carbon footprint of products—Requirements and guidelines for quantification. International Organization for Standardization.

Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C., Jahn, U., Berger, K. A., Kato, K., Friesen, T., Liu, H. & Van Iseghem, M. (2014). Review of Failures of Photovoltaic Modules (IEA-PVPS T13-01:2014). Paris: IEA-PVPS.
Komoto, K. (Hrsg.), Agraffeil, C., Alonso-García, C. et al. (2025). Status of PV Module Recycling in IEA PVPS Task 12 Countries (IEA-PVPS T12-31:2025). Paris: IEA-PVPS.
Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE). Amtsblatt der Europäischen Union, L 197.

Bewertung innovativer Recyclingtechnologien für Photovoltaikmodule im Vergleich zum Stand der Technik – Entwicklung einer Bewertungsmethodik im Forschungsprojekt PVReValue

Ferozan Azizi[1], Sonja Feldbacher[2] & Thomas Nigl[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] Polymer Competence Center Leoben, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Die Photovoltaik (PV) zählt zu den wichtigsten Technologien für den Ausbau erneuerbarer Energien und stellt einen wesentlichen Baustein zur Erreichung nationaler und internationaler Klimaziele dar. Mit der kontinuierlich steigenden installierten PV-Leistung wird in den kommenden Jahrzehnten jedoch auch ein deutlicher Anstieg an End-of-Life(EoL)-Photovoltaikmodulen erwartet. Daraus ergeben sich neue Herausforderungen für die Kreislaufwirtschaft, insbesondere hinsichtlich der hochwertigen Rückgewinnung kritischer Rohstoffe wie Silizium, Silber und Kupfer. Während etablierte Recyclingverfahren überwiegend auf einer mechanischen Zerkleinerung der Module basieren und bereits hohe Rückgewinnungsraten für Glas und Aluminium erreichen, verfolgen innovative Verfahren das Ziel einer selektiven Verbundauftrennung und einer verbesserten stofflichen Verwertung.
Vor diesem Hintergrund entwickelt das Forschungsprojekt PVReValue einen ganzheitlichen Bewertungsansatz zur vergleichenden Analyse unterschiedlicher Recyclingtechnologien. Im Mittelpunkt steht die systematische Bewertung der Verfahren anhand ökonomischer, technologischer und ökologischer Kriterien sowie die Betrachtung vollständiger Recyclingprozessketten. Der vorliegende Beitrag beschreibt den Stand der Technik, stellt den entwickelten Bewertungsrahmen vor und zeigt dessen Potenzial für die objektive Einordnung innovativer Recyclingtechnologien im Hinblick auf zukünftige industrielle Anwendungen und eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft.

1 EINLEITUNG

Die Photovoltaik zählt zu den Schlüsseltechnologien der Energiewende und spielt eine zentrale Rolle beim Ausbau erneuerbarer Energien. Mit der weltweit steigenden installierten PV-Leistung wächst jedoch auch die zukünftige Menge an End-of-Life(EoL)-Photovoltaikmodulen. Während derzeit überwiegend Produktionsausschuss und vorzeitig ausgetauschte Module recycelt werden, wird ab den 2030er-Jahren ein deutlicher Anstieg regulärer Rücklaufmengen erwartet. Nach Prognosen der International Renewable Energy Agency (IRENA) könnten bis zum Jahr 2050 weltweit mehr als 70 Millionen Tonnen ausgedienter Photovoltaikmodule anfallen (IRENA & IEA-PVPS, 2016).

Neben der Erfüllung gesetzlicher Anforderungen gewinnt insbesondere die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe zunehmend an Bedeutung. Kristalline Photovoltaikmodule enthalten neben Glas und Aluminium auch wertvolle Materialien wie Silizium, Kupfer und Silber, deren Rückführung in den Materialkreislauf sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus strategischer Sicht zunehmend relevant ist (Ardente et al., 2019). Gleichzeitig verfolgt die Europäische Union mit der WEEE-Richtlinie sowie dem Critical Raw Materials Act das Ziel, die Kreislaufführung von Rohstoffen zu stärken und die Versorgungssicherheit kritischer Materialien langfristig zu verbessern (European Parliament and Council, 2012; European Parliament and Council, 2024).

Der derzeitige Stand der Technik basiert überwiegend auf mechanischen Recyclingverfahren, welche hohe Rückgewinnungsraten für Glas und Aluminium ermöglichen. Für die Rückgewinnung hochwertiger Materialfraktionen sowie kritischer Rohstoffe werden jedoch zunehmend innovative Verfahren der selektiven Verbundauftrennung entwickelt, die sich hinsichtlich ihrer technologischen Reife, Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen deutlich unterscheiden (Xu et al., 2018; Deng et al., 2019). Eine objektive Bewertung dieser Verfahren erfordert daher eine ganzheitliche Betrachtung der gesamten Recyclingprozesskette.

Vor diesem Hintergrund entwickelt das Forschungsprojekt PVReValue eine Bewertungsmethodik, welche Verfahren der Verbundauftrennung und Materialaufbereitung anhand ökonomischer, technologischer und ökologischer Kriterien systematisch vergleicht. Ziel des vorliegenden Beitrags ist es, den aktuellen Stand der Technik darzustellen, den entwickelten Bewertungsansatz vorzustellen und dessen Potenzial für die vergleichende Analyse innovativer Recyclingtechnologien aufzuzeigen.

2 STAND DER TECHNIK IN ÖSTERREICH UND INNOVATIVE ANSÄTZE

Kristalline Photovoltaikmodule bestehen aus einem mehrschichtigen Materialverbund, der auf eine hohe mechanische Stabilität und Witterungsbeständigkeit während einer Nutzungsdauer von mehr als 25 Jahren ausgelegt ist. Diese komplexe Materialzusammensetzung gewährleistet zwar eine hohe Lebensdauer der Module, erschwert jedoch gleichzeitig deren stoffliche Trennung am Ende der Nutzungsphase erheblich (Xu et al., 2018).

Aktuelle Recyclingverfahren verfolgen daher das Ziel, die unterschiedlichen Materialfraktionen möglichst effizient voneinander zu separieren und einer hochwertigen Verwertung zuzuführen. Der industrielle Stand der Technik basiert überwiegend auf mechanischen Aufbereitungsverfahren, bei denen nach der Demontage des Aluminiumrahmens und der Anschlussdose eine Zerkleinerung der Module erfolgt. Die erzeugten Stoffströme werden anschließend mittels Siebung, Magnetabscheidung, Wirbelstromseparatoren sowie Dichtetrennverfahren weiter aufbereitet (Paiano, 2015). Diese Prozesskette erfüllt die Anforderungen der europäischen WEEE-Richtlinie hinsichtlich der Verwertungsquoten und ermöglicht insbesondere die Rückgewinnung der Massenfraktionen Glas und Aluminium. Die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe wie Silber oder hochreinem Silizium ist hingegen aufgrund der starken Fragmentierung des Materialverbundes nur eingeschränkt möglich (Deng et al., 2019).

Vor diesem Hintergrund wurden in den vergangenen Jahren unterschiedliche Verfahren entwickelt, welche eine selektive Verbundauftrennung der Module ermöglichen sollen. Ziel dieser Technologien ist es, die Materialschichten möglichst materialschonend voneinander zu trennen, um homogenere Stoffströme für die anschließende Aufbereitung bereitzustellen und dadurch die Qualität der zurückgewonnenen Sekundärrohstoffe zu erhöhen (Dias et al., 2024).

2.1 Mechanische Verfahren

Das mechanische Schreddern stellt derzeit den industriellen Standard im PV-Recycling dar. Nach der Demontage der leicht separierbaren Komponenten erfolgt eine mehrstufige Zerkleinerung des Moduls, wodurch sämtliche Materialverbunde aufgebrochen werden. Anschließend werden die erzeugten Fraktionen durch verschiedene physikalische Trennverfahren weiter separiert. Die wesentlichen Vorteile dieses Ansatzes liegen in seinem hohen Durchsatz, seiner robusten Prozessführung und der guten industriellen Skalierbarkeit (Xu et al., 2018). Gleichzeitig entstehen durch die intensive Zerkleinerung feinkörnige Mischfraktionen, welche die stoffliche Rückgewinnung wertvoller Materialien erschweren und zusätzliche Aufbereitungsschritte erforderlich machen (Deng et al., 2019).

Neben dem klassischen Schreddern werden auch spanende Verfahren wie das Fräsen untersucht. Hierbei erfolgt die kontrollierte Abtragung einzelner Modulschichten, wodurch sich Materialverbunde gezielter auftrennen lassen. Im Vergleich zum Schreddern entstehen homogenere Stoffströme, allerdings ist das Verfahren mit längeren Bearbeitungszeiten verbunden und stellt höhere Anforderungen an die Prozessautomatisierung.

2.2 Thermische Verfahren

Thermische Verfahren nutzen die temperaturabhängigen Eigenschaften der polymeren Verkapselungsmaterialien zur Trennung der Modulschichten. Hierzu zählen unter anderem Hot-Knife-Verfahren sowie thermische Delaminierungsprozesse. Durch das gezielte Erweichen oder Aufschmelzen der EVA-Schichten können Glas, Solarzellen und Rückseitenfolie weitgehend getrennt werden, ohne dass eine vollständige mechanische Zerkleinerung erforderlich ist. Dadurch lassen sich größere Materialstücke erhalten, was sich positiv auf die Qualität der nachfolgenden Stoffströme auswirken kann. Dem stehen jedoch ein erhöhter Energiebedarf sowie Anforderungen an eine präzise Prozessführung gegenüber, um thermisch bedingte Materialschädigungen zu vermeiden (Dias et al., 2024).

2.3 Wasserstrahl- und laserbasierte Verfahren

Innovative Verfahren der selektiven Verbundauftrennung verfolgen das Ziel, den Materialverbund möglichst zerstörungsarm zu trennen. Beim Wasserstrahlschneiden erfolgt die Separation einzelner Modulschichten mittels Hochdruckwasserstrahl. Dadurch bleibt insbesondere die Frontglasscheibe weitgehend intakt und kann mit hoher Reinheit zurückgewonnen werden. Gleichzeitig reduziert sich die Vermischung der einzelnen Materialfraktionen, wodurch die nachfolgende Aufbereitung erleichtert wird.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen laserbasierte Verfahren. Insbesondere Ultrakurzpulslaser ermöglichen aufgrund ihrer geringen thermischen Belastung eine hochpräzise Bearbeitung einzelner Materialschichten. Dadurch können definierte Trennlinien erzeugt und Materialschädigungen minimiert werden. Gegenwärtig befinden sich diese Technologien jedoch überwiegend im Labor- oder Pilotmaßstab und müssen hinsichtlich Durchsatzes, Wirtschaftlichkeit und industrieller Skalierbarkeit weiterentwickelt werden (Dias et al., 2024).

2.4 Aufbereitung der Materialfraktionen

Unabhängig von der gewählten Verbundauftrennung schließt sich eine mehrstufige Aufbereitung der erzeugten Stoffströme an. Ziel dieser Prozessschritte ist die weitere Separation der Materialfraktionen sowie die Bereitstellung hochwertiger Sekundärrohstoffe für eine werkstoffliche Verwertung. Hierzu werden mechanische Klassierungsverfahren, Dichtetrennverfahren, Magnet- und Wirbelstromabscheidung sowie elektrostatische Trennverfahren eingesetzt. Ergänzend kommen hydrometallurgische und lösungsmittelbasierte Verfahren zum Einsatz, um insbesondere Silber, Kupfer und Silizium aus den verbleibenden Stoffströmen zurückzugewinnen (Ardente et al., 2019; Dias et al., 2022).

Die Qualität der erzeugten Stoffströme wird dabei maßgeblich durch die vorgelagerte Verbundauftrennung beeinflusst. Während selektive Trennverfahren überwiegend homogene Materialfraktionen erzeugen und dadurch den Aufwand der nachfolgenden Aufbereitung reduzieren können, führen stark fragmentierende Verfahren häufig zu komplexen Stoffgemischen, welche zusätzliche Separationsschritte erfordern. Die Auswahl geeigneter Prozesskombinationen besitzt daher einen entscheidenden Einfluss auf die Effizienz der gesamten Recyclingprozesskette (Heath et al., 2020).

Die dargestellten Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich ihres Trennprinzips, ihres technologischen Reifegrades sowie der Qualität der erzeugten Stoffströme erheblich. Gleichzeitig bestehen Zielkonflikte zwischen Wirtschaftlichkeit, Materialqualität und Umweltwirkungen, die eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Technologien erschweren. Für die Auswahl geeigneter Recyclingkonzepte ist daher ein systematischer Bewertungsansatz erforderlich, der technische, ökonomische und ökologische Kriterien gleichermaßen berücksichtigt. Vor diesem Hintergrund wurde im Forschungsprojekt PVReValue eine ganzheitliche Bewertungsmethodik entwickelt, die im folgenden Kapitel vorgestellt wird.

3 METHODISCHE BEWERTUNG DER RECYCLINGERFAHREN

Die Vielfalt der derzeit verfügbaren Recyclingverfahren für Photovoltaikmodule sowie deren unterschiedliche technologische Reife verdeutlichen die Notwendigkeit einer systematischen Bewertungsmethodik. Während einzelne Verfahren hinsichtlich ihrer Materialrückgewinnung, ihres Energiebedarfs oder ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht wurden, fehlt bislang ein einheitlicher Ansatz, der unterschiedliche Technologien entlang der gesamten Recyclingprozesskette vergleichbar bewertet (Deng et al., 2019; Heath et al., 2020). Für die Auswahl zukünftiger industrieller Recyclingkonzepte ist jedoch eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich, welche neben technischen Aspekten auch wirtschaftliche und ökologische Fragestellungen berücksichtigt.

Vor diesem Hintergrund wurde im Forschungsprojekt PVReValue ein modular aufgebauter Bewertungsansatz entwickelt. Ziel ist die vergleichende Analyse unterschiedlicher Verfahren der Verbundauftrennung und Materialaufbereitung sowie deren Kombination zu vollständigen Recyclingprozessketten. Dabei werden sowohl etablierte als auch innovative Technologien anhand einheitlicher Kriterien bewertet. Der entwickelte Ansatz dient als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl geeigneter Prozesskombinationen und unterstützt die Identifikation ressourceneffizienter Recyclingstrategien für Photovoltaikmodule.

Im Gegensatz zu einer isolierten Betrachtung einzelner Prozessschritte berücksichtigt die Methodik den gesamten Materialfluss – von der Verbundauftrennung über die Aufbereitung der Stoffströme bis hin zu den potenziellen Verwertungspfaden. Dadurch können Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Verfahrensschritten berücksichtigt und unterschiedliche Prozessketten objektiv miteinander verglichen werden.

3.1 Aufbau der Bewertungsmethodik

Die Bewertung basiert auf einem mehrdimensionalen Ansatz, der drei Betrachtungsebenen umfasst:

- ökonomische Bewertung,
- technologische Bewertung und
- ökologische Bewertung.

Für jede untersuchte Technologie werden die relevanten Informationen systematisch erhoben und einer Bewertungsmatrix zugeordnet. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Verfahren unabhängig von ihrem Entwicklungsstand nach denselben Bewertungsmaßstäben beurteilt werden können. Gleichzeitig ermöglicht der modulare Aufbau eine Erweiterung der Methodik um zusätzliche Technologien oder Bewertungskriterien, wodurch eine flexible Anwendung innerhalb zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsprojekte gewährleistet wird.

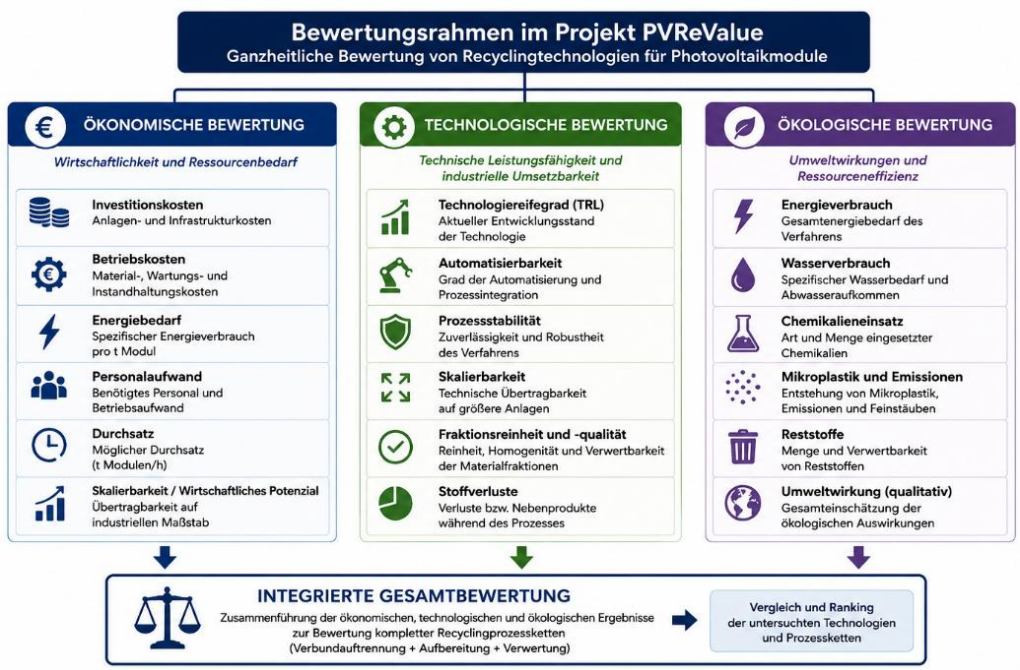


Abb. 1: Bewertungsrahmen zur ganzheitlichen Bewertung von Recyclingtechnologien für Photovoltaikmodule im Forschungsprojekt PVReValue.

3.2 Ökonomische Bewertung

Die ökonomische Bewertung dient der Einordnung der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Recyclingverfahren unter industriellen Randbedingungen. Hierbei werden sowohl Investitions- und Betriebskosten als auch prozessbezogene Kenngrößen berücksichtigt, welche die spätere industrielle Umsetzung beeinflussen. Darüber hinaus fließen Aspekte der Prozessskalierung sowie potenzielle Erlöse aus hochwertigen Sekundärrohstoffen in die Bewertung ein. Dadurch wird der wirtschaftliche Nutzen einzelner Technologien nicht ausschließlich anhand der Prozesskosten beurteilt, sondern im Zusammenhang mit der gesamten Wertschöpfungskette betrachtet (Cucchiella et al., 2015; Deng et al., 2019).

3.3 Technologische Bewertung

Die technologische Bewertung untersucht die Leistungsfähigkeit und industrielle Einsetzbarkeit der betrachteten Verfahren. Neben dem Technologiereifegrad werden insbesondere die Prozessstabilität, die Automatisierbarkeit sowie die Qualität der erzeugten Materialfraktionen berücksichtigt. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Einfluss der Verbundauftrennung auf die nachfolgenden Aufbereitungsschritte. Verfahren, welche homogene Stoffströme erzeugen, können den Aufwand der nachgelagerten Separation reduzieren und dadurch die Effizienz der gesamten Recyclingprozesskette verbessern (Heath et al., 2020).

3.4 Ökologische Bewertung

Neben technischen und wirtschaftlichen Fragestellungen bildet die ökologische Bewertung die dritte Säule des Bewertungsansatzes. Ziel ist die qualitative Einordnung potenzieller Umweltwirkungen der einzelnen Verfahren entlang der gesamten Recyclingprozesskette. Berücksichtigt werden insbesondere der Ressourcen- und Energieeinsatz, der Wasserbedarf, der Einsatz von Hilfs- und Prozessstoffen sowie die Entstehung von Emissionen und nicht verwertbaren Reststoffen (Ardente et al., 2019; Dias et al., 2022).

Da sich zahlreiche innovative Verfahren derzeit noch im Entwicklungsstadium befinden, stehen für eine vollständige Ökobilanz häufig noch keine belastbaren Prozessdaten zur Verfügung. Die entwickelte Methodik schafft daher zunächst eine qualitative Bewertungsgrundlage, welche zukünftig durch quantitative Lebenszyklusanalysen ergänzt werden kann.

3.5 Integration der Bewertungsergebnisse

Die Ergebnisse der drei Bewertungsebenen werden abschließend in einem integrierten Bewertungsmodell zusammengeführt. Dadurch können unterschiedliche Verfahren nicht nur innerhalb einzelner Bewertungskategorien, sondern hinsichtlich ihrer Gesamtleistung innerhalb der Recyclingprozesskette verglichen werden. Im Vordergrund steht dabei nicht die Identifikation eines universell besten Verfahrens, sondern die Analyse der jeweiligen Stärken und Grenzen verschiedener Prozesskombinationen.

Die entwickelte Bewertungsmethodik ermöglicht somit eine transparente und nachvollziehbare Gegenüberstellung etablierter und innovativer Recyclingtechnologien. Gleichzeitig schafft sie die Grundlage für zukünftige Technologieentscheidungen sowie für weiterführende Untersuchungen zur Ressourceneffizienz, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit von Recyclingprozessketten für Photovoltaikmodule

4 ERGEBNISSE DER VERGLEICHENDEN BEWERTUNG

Die im Projekt PVReValue entwickelte Bewertungsmethodik ermöglicht eine vergleichende Analyse unterschiedlicher Verfahren der Verbundauftrennung und Materialaufbereitung unter Berücksichtigung ökonomischer, technologischer und ökologischer Aspekte. Durch die Anwendung eines einheitlichen Bewertungsrahmens können sowohl etablierte Verfahren als auch innovative Technologien systematisch gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für zukünftige Recyclingprozessketten bewertet werden.

4.1 Ökonomische Bewertung

Die ökonomische Bewertung zeigt, dass sich die untersuchten Verfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit deutlich unterscheiden. Etablierte Technologien weisen aufgrund ihrer industriellen Reife und der vorhandenen Prozessinfrastruktur Vorteile hinsichtlich einer großtechnischen Umsetzung auf. Innovative Verfahren bieten hingegen Potenziale zur Verbesserung der Wertschöpfung, indem sie hochwertigere Materialfraktionen bereitstellen und dadurch eine hochwertigere stoffliche Verwertung ermöglichen. Die Bewertung verdeutlicht, dass die Wirtschaftlichkeit zukünftiger Recyclingprozesse nicht ausschließlich durch den Prozess selbst bestimmt wird, sondern wesentlich von der Qualität der erzeugten Stoffströme sowie den daraus resultierenden Verwertungsmöglichkeiten abhängt (Cucchiella et al., 2015; Deng et al., 2019).

4.2 Technologische Bewertung

Im Rahmen der technologischen Bewertung konnten Unterschiede hinsichtlich des Entwicklungsstandes, der Prozessführung und der Eignung für den industriellen Einsatz identifiziert werden. Während etablierte Verfahren bereits unter industriellen Bedingungen eingesetzt werden, befinden sich innovative Ansätze teilweise noch im Entwicklungs- oder Pilotmaßstab. Gleichzeitig zeigen diese Verfahren Potenziale für eine materialschonendere Verbundauftrennung und eine verbesserte Qualität der erzeugten Stoffströme. Die Bewertung verdeutlicht, dass die technologische Leistungsfähigkeit eines Verfahrens nicht ausschließlich anhand seines Reifegrades beurteilt werden kann, sondern insbesondere im Zusammenhang mit der Qualität der erzeugten Materialfraktionen sowie deren Einfluss auf die nachfolgenden Aufbereitungsschritte betrachtet werden muss (Heath et al., 2020).

4.3 Ökologische Bewertung

Die ökologische Bewertung zeigt, dass die untersuchten Verfahren unterschiedliche Umweltwirkungen entlang der Recyclingprozesskette aufweisen. Dabei wird deutlich, dass eine isolierte Betrachtung einzelner Prozessschritte nicht ausreicht, um die ökologische Leistungsfähigkeit eines Recyclingverfahrens zu beurteilen. Vielmehr beeinflussen sowohl die Art der Verbundauftrennung als auch die Qualität der erzeugten Stoffströme den Ressourcenbedarf und die Umweltwirkungen der nachgelagerten Prozessschritte. Die entwickelte Methodik ermöglicht daher eine ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette und schafft die Grundlage für weiterführende quantitative Umweltbewertungen, beispielsweise im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse (Ardente et al., 2019; Dias et al., 2022).

4.4 Gesamtbewertung der Recyclingprozessketten

Die Zusammenführung der drei Bewertungsebenen zeigt, dass keine der untersuchten Technologien alle Anforderungen gleichermaßen erfüllt. Vielmehr weisen die einzelnen Verfahren unterschiedliche Stärken und Herausforderungen auf, die abhängig von den angestrebten Verwertungszielen zu bewerten sind. Der entwickelte Bewertungsansatz ermöglicht es, diese Zielkonflikte transparent darzustellen und unterschiedliche Recyclingprozessketten systematisch miteinander zu vergleichen. Dadurch wird eine fundierte Grundlage geschaffen, um innovative Technologien hinsichtlich ihrer industriellen Eignung sowie ihres Beitrags zu einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft einzuordnen.

5 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die Entwicklung leistungsfähiger Recyclingverfahren für Photovoltaikmodule erfordert eine ganzheitliche Betrachtung der gesamten Prozesskette. Die vorgestellte Bewertungsmethodik berücksichtigt daher nicht nur einzelne Verfahren, sondern integriert ökonomische, technologische und ökologische Kriterien in einem einheitlichen Bewertungsrahmen. Dadurch können unterschiedliche Recyclingtechnologien systematisch verglichen und hinsichtlich ihrer Eignung für zukünftige industrielle Anwendungen eingeordnet werden.

Die Bewertung verdeutlicht, dass zwischen Wirtschaftlichkeit, Materialqualität und Umweltwirkungen Zielkonflikte bestehen, die bei der Entwicklung zukünftiger Recyclingkonzepte berücksichtigt werden müssen (Deng et al., 2019; Heath et al., 2020). Der entwickelte Bewertungsansatz schafft hierfür eine transparente Entscheidungsgrundlage und ermöglicht eine vergleichende Bewertung vollständiger Recyclingprozessketten anstelle isolierter Einzelverfahren.

Zusammenfassend stellt die im Forschungsprojekt PVReValue entwickelte Methodik eine wissenschaftlich fundierte Grundlage zur Bewertung innovativer Recyclingtechnologien für Photovoltaikmodule dar. Durch ihren modularen Aufbau kann sie flexibel auf neue Verfahren und zukünftige Modultechnologien angewendet werden und bildet damit die Basis für weiterführende Untersuchungen, beispielsweise im Rahmen von Lebenszyklus- oder technoökonomischen Analysen. Sie leistet somit einen Beitrag zur Entwicklung ressourceneffizienter Recyclingstrategien und unterstützt die Umsetzung einer zirkulären Wertschöpfung im Photovoltaiksektor.

LITERATURVERZEICHNIS

Ardente, F., Latunussa, C. E. L. & Blengini, G. A. (2019). Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. Waste Management, 91, 156–167. Amsterdam, Niederlande: Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.059

Deng, R., Chang, N. L., Ouyang, Z. & Chong, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 109, 532–550. Oxford, Vereinigtes Königreich: Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.020

European Parliament and Council. (2012). Directive 2012/19/EU on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Brüssel, Belgien: Official Journal of the European Union.

European Parliament and Council. (2024). Regulation (EU) 2024/1252 establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials (Critical Raw Materials Act). Brüssel, Belgien: Official Journal of the European Union.

Heath, G. A., Silverman, T. J., Kempe, M. et al. (2020). Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy. Nature Energy, 5(7), 502–510. London, Vereinigtes Königreich: Springer Nature. https://www.nature.com/articles/s41560-020-0645-2

International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). (2024). Advances in Photovoltaic Module Recycling – Literature Review and Update to Empirical Life Cycle Inventory Data and Patent Review (Report T12-28:2024). Paris, Frankreich: IEA PVPS.

International Renewable Energy Agency (IRENA) & International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS). (2016). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate: IRENA.

Paiano, A. (2015). Photovoltaic waste assessment in Italy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 99–112. Oxford, Vereinigtes Königreich: Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.208

Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A. L. & Yang, C. (2018). Global status of recycling waste solar panels: A review. Waste Management, 75, 450–458. Amsterdam, Niederlande: Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.036

KONTAKT

Dipl. Ing. Ferozan Azizi
ferozan.azizi@unileoben.ac.at
+43 3842 402 5133
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben
https://www.unileoben.ac.at/avaw/

Sondierung einer PV-Anlage auf einer in der Nachsorge befindlichen städtischen Deponie

Gernot Kreindl[1], Arne Ragossnig[2], Alois Kraußler[3], Marlies Hrad[4] & Michael Obriejetan[5]
[1)] Stadtgemeinde Leoben, Referat Abfall-, Abwasser- und Umweltmanagement, Leoben, Österreich
[2)] RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Wien, Österreich
[3)] 4ward Energy Research GmbH, Graz, Österreich
[4)] Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Wien, Österreich
[5)] Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Vor dem Hintergrund eines steigenden Elektrizitätsbedarfs bei gleichzeitigem Ausstieg aus fossilen Energieträgern und der verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energien rücken urbane Potenzialflächen zur Errichtung von PV-Großanlagen in den Vordergrund. Vorbelastete Flächen wie ehemalige Deponien, die geschlossen sind und sich in der Nachsorgephase befinden, stellen bei günstiger Exposition ein erhebliches Potential zur Erzeugung von regionalem PV-Strom dar. Die ehemalige Hausmülldeponie Seegraben, die sich im Eigentum der Stadtgemeinde Leoben befindet und auf der bis Mitte der 90er Jahre unbehandelte Siedlungsabfälle abgelagert wurden, erfüllt diese Anforderungen. Mit der Umsetzung eines Sondierungsprojektes, das als Vorstufe zur Detailplanung und der Errichtung einer PV-Großanlage mit mehreren MWp dienen soll, gilt es, neben technischen und (deponie-)rechtlichen Fragestellungen auch zum Teil komplexe Zusammenhänge im Hinblick auf sozio-ökonomische Aspekte im urbanen Kontext und geotechnische Herausforderungen zu lösen. Dabei gilt es auch, Themen der Biodiversität und des Bodenschutzes zu beachten.

1 AUSGANGSLAGE

Die seit 1996 stillgelegte und in der Nachsorgephase befindliche Hausmülldeponie Seegraben ist nördlich des Stadtkerns von Leoben situiert und erstreckt sich auf eine Fläche von 5,2 ha. Während der Nutzungsphase wurden von 1969 bis 1995 kommunale Massenabfälle (unbehandelter Hausmüll) im genehmigten Ausmaß von ca. 400.000 m³ eingebracht. Das Einzugsgebiet war die Stadt Leoben und Umgebung, daneben wurden bis 1990 ebenfalls Gewerbeabfälle unbehandelt und schichtweise abgelagert, wobei über jeder Abfallschicht Zwischen- bzw. Abdeckschichten aus taubem Gestein (geschätzt 5-10 Gew.-%) aufgebracht wurden.

Mit der Schließung der Deponie, dem Bau einer Oberflächenentwässerung und einem Sickerwassererfassungssystem sowie von Entgasungsbrunnen wurde auf den Müllkörper eine Abdeckung, bestehend aus einer Ausgleichsschicht, mineralischen Dichtschichten, zwei Lagen Geotextil und einer Rekultivierungsschicht, aufgebracht. Somit umfasst die Deponieabdeckung entsprechend den damaligen Vorgaben keine HDPE-Kunststoffdichtungsbahnen. Deponiegasmessungen an den existierenden Gasbrunnen im November 2021 und im Juli 2022 zeigen diese im Sommer aufgrund höherer Außentemperaturen erwartungsgemäß höher ausfallen als im Winter. Der Volumenstrom an den Gasbrunnen wurde messtechnisch zwar nicht erfasst, auf Basis einer Abschätzung und den dahinterliegenden Berechnungen kann von 1,62 m³/h im Winter und 2,92 m³/h im Sommer ausgegangen werden. Mittels FID gemessene oberflächennahe CH_4-Messungen lieferten im Schnitt und in Abhängigkeit von der Jahreszeit 0,13 kg/m²·a im Winter bzw. 0,05 kg/m²·a zu Tage. Im Vergleich zur Deponiegasprognose aus dem Jahr 2014 liegen die berechneten bzw. gemessenen Werte beider Szenarien weit unter den prognostizierten, d.h. diffuse Emissionen an der Oberfläche: 1,0-1,2 kg m²·a bzw. CH_4-Emsissionen aus Gasbrunnen: 1,62 m²/h (Winter) bzw. 2,92 m³/h (Sommer)). (RM Umweltkonsulenten, 2022).
Seit der Schließung der Deponie sind behördlich vorgeschriebene, jährliche Grund- und Sickerwasseranalysen durchzuführen, die abgesehen vor dem Hintergrund, dass das Deponieareal zu

einem Bergbaugebiet gehörte, in dem bis zur Schließung der Zeche im Jahr 1964 Glanzkohle abgebaut wurde, keine Auffälligkeiten zeigten.

Heute erstreckt sich das im Eigentum der Stadtgemeinde Leoben stehende ehemalige Deponieareal über zwei Etagen mit nord-südlich und ost-westlich verlaufenden Böschungsbereichen und ist bewaldet. Kontinuierliche Setzungsprozesse haben die ursprünglich planierte Oberfläche zu einer welligen Topografie entwickelt, die als Fläche jedoch aufgrund ihrer Süd-Ostexposition und der Nähe zum Stadtkern und der städtischen Infrastruktur (<1 km) ein erhebliches Potenzial zur Erzeugung erneuerbarer Energien aufweist.
Das Vorhaben der Errichtung einer PV-Großanlage mit rund 4 MW_{peak} knüpft an eine europaweit wachsende Brownfield-PV-Bewegung an, die dem globalen Trend folgt, ungenutzte Industriebrachen, Altlastenflächen und ehemalige Deponien in produktive Solarparks umzuwandeln. Im Gegensatz zur Nutzung von unberührtem Grünland werden durch die Umsetzung solcher Projekte wertvolle Naturräume geschont, der Flächenverbrauch reduziert und degradierte Flächen, die im Besitz der Öffentlichkeit stehen und nicht anderweitig verwendet werden können, einer sinnvollen Nutzung zugeführt.
Für innerstädtische Deponien existieren noch keine systematisch validierten Machbarkeitsgrundlagen, obwohl der Altlasten-Atlas 2024 des Umweltbundesamts österreichweit ca. 21 km² solcher Flächen ausweist (Umweltbundesamt, 2024). Dies entspricht einem theoretischen PV-Potenzial von 2,1 GW_{peak} – einem Fünftel der Ende 2025 in Österreich installierten Photovoltaik-Leistung von 9,8 GW_{peak} (Austrian Power Grid AG, 2026).

2 VORARBEITEN UND RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DAS PROJEKT

Nach intensiven Gesprächen und Vor-Ort-Begehungen mit der Deponieaufsichtsbehörde, dem Land Steiermark, bestehen unter bestimmten Voraussetzungen bzw. Auflagen prinzipiell keine Einwände gegen eine Nachnutzung der Deponie als PV-Fläche. So wurde auch noch vor Inkrafttreten des Entwicklungsprogramms für den Sachbereich Erneuerbare Energie des Landes Steiermark (SAPRO Solarenergie) ein entsprechendes Ansuchen um Rodung einer Fläche von knapp 5 ha eingebracht und unter gewissen Auflagen ein dementsprechender Rodungsbescheid seitens der Behörde ausgestellt.

Nach Auskunft der Aufsichtsbehörde muss die Oberflächenabdeckung inkl. Rekultivierungsschicht erhalten bleiben. Somit sind keine Tiefengründungen über die Rekultivierungsschicht hinaus in den Müllkörper hinein erlaubt bzw. großflächige Durchörterungen verboten, bis auf wenige punktuelle Ausnahmen, die für die Verankerung der PV-Unterkonstruktion unbedingt notwendig sind (Böschungsbereiche). Hier muss aus Behördensicht aber unbedingt der Nachweis erbracht werden, dass Alternativen geprüft wurden und nach Abschätzung von Restrisiken es zu keiner Verschlechterung der Gesamtsituation in Bezug auf Wasserhaushalt und Gasbildungspotential kommt. Dies schließt wiederum ein laufendes Monitoring der Deponiegasentwicklung und ggf. die Ausbildung von Methanoxidationsfenstern mit ein. Aus diesen strikten Vorgaben und der vorhandenen Topografie heraus sind alternative, innovative Methoden zur Herstellung einer PV-Unterkonstruktion, insbesondere in den Bereichen mit Hanglage, zur Erreichung der Standsicherheit der Anlage gefragt.

Als Maßnahme zur Emissionsminderung spielt die Errichtung von Methanoxidationsfenstern eine wichtige Rolle, da sich durch die Rodung auch der Wasserhaushalt des Deponiekörpers verändert und durch die im Deponiekörper vorhandene Restorganik bei verändertem Wasserhaushalt die Methangasbildung erneut angeregt werden kann. Ausgehend vom Gasbildungspotential und dem Rückbau der Schachthälse der Gasbrunnen zugunsten der Aufstellung von PV-Modulen sowie infolge der punktuellen Penetrationen der Oberflächenabdeckung sind bedarfsweise zu errichtende Methanoxidationsfenster in Abstimmung mit der Behörde zu dimensionieren und laufend einem Monitoring zu unterziehen. Unter dem Aspekt der Nachnutzung als

Energieerzeugungsfläche mit einer gewissen PV- bzw. Strominfrastruktur soll die bestehende Deponieumzäunung erhalten bleiben. Auch der Schutz vor Bodenerosion nach der Rodung (Wurzelstöcke sollen als Erosionsschutz erhalten bleiben) und ein zukünftiges Begrünungs- bzw. Pflegekonzept sind wichtige Fragestellungen, die es in der Planungsphase zu beantworten gilt.

3 SONDIERUNGSPROJEKT

Im Dezember 2025 erfolgte zusammen mit Projektpartnern der Startschuss für ein 15-monatiges interdisziplinäres FFG-Sondierungsprojekt mit dem Titel „BROWNFIELD-PV Leoben“. Mit dem Projekt sollen die Rahmenparameter für die Errichtung einer PV-Großanlage geklärt und darauf aufbauend in Abstimmung mit der Deponieaufsicht ein umsetzungsfähiges Detailkonzept entwickelt werden. Die zu untersuchenden Aspekte des Sondierungsprojekts gliedern sich in geotechnische (Deponieunterbau ohne Tiefengründungsmöglichkeit, Hanglage), rechtlich-regulatorische (Abfall-, Bau- und Forstrecht, Betreibermodell, Integration in das städtische Energienetz inkl. Speicherung), umwelttechnische (Deponiegasbildung, Biodiversitätssteigerung, Pflege & Erosionsschutz) und sozio-ökonomische (Akzeptanz bei den Anrainern) Fragestellungen.
Der technologisch-innovative Ansatz des Projekts besteht darin, innerhalb behördlich festgelegter Grenzen einen Lösungsansatz für die Umsetzung zu entwickeln und dabei eine vorbelastete, brachliegende Deponiefläche einer Nachnutzung zuzuführen.

3.1 Untersuchung von Gründungsvarianten

Gründungen zur Aufständerung von PV-Modulträgern können unterschiedlich ausfallen, wobei im Konkreten zwei Bereiche oberhalb der Abdeckung und des Deponiekörpers unterschieden werden: Plateau und Böschung. Die Kosten der Unterkonstruktion fließen maßgeblich in die Wirtschaftlichkeitsrechnung der Gesamtanlage ein. Für die ebenen Bereiche mit teilweise vorhandenen Setzungen scheinen nicht invasive Befestigungsmethoden, wie z.B. eine Ballastierung mit zusätzlich aufgebrachten Gewichten (Betonplatten oder Kies) das Mittel der Wahl zu sein, sind aber anfälliger gegenüber unerwünschten Frostbewegungen. Zudem haben Setzungen direkte Auswirkungen auf die Modulabstände und somit auf die Befestigung der Module und erfordern eine regelmäßige Überprüfung (Monitoring). Ramm- und Schraubfundamente sind frostunempfindlicher und erlauben eine steifere Verbindung von Unterkonstruktion und Modulen, scheiden aber aufgrund ihrer Eindringtiefe in den Untergrund auf den Plateaubereichen von vorneherein aus; in den Böschungsbereichen kommen sie nur im Rahmen der behördlich zugelassenen punktuellen Durchdringungen (z. B. als mantelverpresste Mikropfähle, vgl. Kap. 3.2) in Betracht. Die Ausbildung von seichten Streifen-, Platten-, Wannenfundamenten bzw. einem umgekehrten Betontisch auf ebenen Flächen innerhalb der Rekultivierungsschicht erscheint aus statischer Sicht und unter bestimmten Bedingungen möglich, setzt aber das Vorhandensein einer ausreichenden Überdeckung voraus. Mit nicht invasiven Unterkonstruktionen wird das Eindringen in den Untergrund zwar vermieden, dies wird aber durch das Zulassen einer größeren Bewegungsfreiheit, was das direkte Aneinanderreihen bzw. starre Verbindungen der Module untereinander erschwert, erkauft.

Aufbauend auf den Flächen- und Gründungsrestriktionen werden aktuell drei Systemvarianten dimensioniert und energetisch simuliert: eine vollständig nicht-invasive, ballastierte Ausführung (rund 3,9 MW_{peak}, ca. 4,7 GWh/a), eine fix aufgeständerte, punktuell gegründete Ausführung mit 30° Neigung in Südausrichtung (rund 4,2 MW_{peak}, ca. 5,0 GWh/a) sowie eine einachsig nachgeführte Ausführung mit horizontaler Nord-Süd-Achse (rund 3,7 MW_{peak}, ca. 5,1 GWh/a). Die nachgeführte Variante erzielt trotz der geringsten installierten Leistung den höchsten Energieertrag und stellt nach derzeitigem Planungsstand die wirtschaftlich vorteilhafteste Lösung dar, setzt jedoch die dichtungstechnische Beherrschung der punktuellen Gründungen voraus.

3.2 Bodenuntersuchungen

Bereits 2025 wurden sieben schwere Rammsondierungen (DPH 15) mit Endtiefen zwischen 2,9 und 12,3 m auf beiden Deponieetagen abgeteuft. Die Ergebnisse bestätigen die erwartete Heterogenität des Deponiekörpers: Sämtliche Sondierungen endeten an Hindernissen innerhalb der Auffüllung, ohne den gewachsenen Untergrund zu erreichen. Festigkeit und Steifigkeit der Auffüllung nehmen mit der Tiefe zu, sodass für die geotechnische Bemessung zwei Homogenbereiche abgeleitet wurden (bis ca. 6 m Tiefe locker bis mitteldicht, darunter zumindest mitteldicht gelagert) [INSITU Geotechnik, 2025]. Für unvermeidbare punktuelle Gründungen in den Böschungsbereichen wurden mantelverpresste Mikropfähle mit Gebrauchslasten von 300-500 kN als technisch machbare Lösung identifiziert, wobei ausschließlich Mantelreibung in Ansatz gebracht werden darf.

Im Juli 2026 durchgeführte Schürfe an ausgewählten Stellen auf der Deponie sollen ergänzend Klarheit über den tatsächlich vorherrschenden Aufbau der Abdeckung und deren Mächtigkeit geben. Gleichzeitig sollen Bodenprofile aufgenommen werden, die dazu dienen, Informationen zu gewissen Parametern im Zusammenhang mit dem Schichtenaufbau bzw. zu physikalischen Bodenkennwerten (Textur, Skelettanteil, gesättigte Wasserleitfähigkeit etc.) sowie chemischen und biologischen Parametern (organische Substanz/Humusgehalt, pH-Wert etc.) zu erhalten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen waren zum Zeitpunkt der Abgabe dieses Artikels noch nicht verfügbar.

3.3 Untersuchung vegetationsökologischer Entwicklungspfade und Pflegeansätze

Da sich das Gesamtprojekt in einer Sondierungsphase befindet und finale Entscheidungen zur technischen Ausführung sowie zur Art der Unterkonstruktion noch ausstehen, müssen alle nachfolgenden vegetationsökologischen Ansätze als vorläufige, flexible Planungsgerüste verstanden werden. Die tatsächliche bauliche Umsetzung wird maßgeblichen Einfluss auf das finale Begrünungs- und Bewirtschaftungskonzept haben. Jede PV-Unterkonstruktion verändert durch Lichtentzug, Regenschatten und veränderte Winddynamiken die lokalen Wuchsbedingungen grundlegend. Das durch den Projektpartner BOKU in Ausarbeitung befindliche Konzept betrachtet die unterschiedlichen Lebenszyklusphasen der Anlage differenziert und sieht eine flexible Aufteilung der Kernfläche in mehrere funktionale Bereiche vor:

Unter den Modulen wird bei verminderter Einstrahlung und reduzierter Feuchtigkeit die Sicherung der Bodenstabilität sowie die Vermeidung offener Erosionsflächen angestrebt, wobei ein lückenhafter Pionier- und Trockenrasen als Zielvegetation dient. Im Bereich der Traufkante steht demgegenüber der lokale Erosionsschutz und die Festigung des Oberbodens durch Durchwurzelung im Vordergrund, um der erhöhten mechanischen Belastung durch Tropfenschlag mit regenerationsfähigen Gras- und Krautstrukturen zu begegnen. In den Zwischenreihen ermöglichen die vorherrschenden Freilandbedingungen mit Sonne und natürlichem Niederschlag schließlich die gezielte Schaffung ökologischer Nischen sowie die Erhöhung der Strukturvielfalt durch standortangepasste Mischungen mit begrenzter Wuchshöhe.

Die langfristige Pflegestrategie muss prozessorientiert gestaltet werden, da gerade in der initialen Etablierungsphase von einem erhöhten Ressourcen- und Zeitaufwand auszugehen ist. Die Zielsetzung orientiert sich dabei an einem realistischen ökologischen Entwicklungspfad. Eine flächendeckende, intensiv blühende Blumenwiese ist unter den stark einschränkenden Deponiebedingungen nicht primär zu erwarten. Das ökologische Hauptaugenmerk liegt vielmehr auf der schrittweisen Schaffung ökologischer Nischen. Ergänzend bietet die Nutzung von unverbauten Randbereichen das Potenzial, als gezielte Zielflächen für weitere Landschafts- und Vegetationselemente wie Steinhaufen oder Hochstaudenfluren zu dienen, um die lokale Biodiversität abseits der Modulinfrastruktur weiter zu stärken. Die operativen Maßnahmen gliedern sich entlang des Lebenszyklus der Anlage in mehrere Phasen:

Initial- und Entwicklungsphase (Betriebsjahre 1-2): Fokus liegt auf der Stabilisierung der Flächen durch Schröpfschnitte. Die Bodenschürfe liefern ergänzende Kennwerte, wobei Bodenverbesserungen nur im Ausnahmefall für den Magerstandort erfolgen. Der Stockausschlag verbleibender Wurzelstöcke erfordert anfangs kontinuierliche Nacharbeiten. Aus Gründen des Brandschutzes und der Anlagenzugänglichkeit ist Gehölzwuchs zu unterdrücken.
Stabilisierungs- und Unterhaltungsphase (ab Betriebsjahr 3): Geplant sind ein bis zwei Nutzungen pro Jahr. Ein Abtransport des Mähguts begünstigt die Gasoffenheit, erhöht jedoch Logistik und Kosten. Diese Faktoren fließen in die Wirtschaftlichkeitsbewertung ein, wobei Kooperationen mit Landwirten gesucht werden. Alternative Konzepte, wie eine temporäre Beweidung oder der Einsatz von Mäh-/Mulchrobotern, werden auf ihre Umsetzbarkeit geprüft.

4 NETZZUGANG VS. SPEICHERUNG VOR ORT

Mit der Realisierung einer rund 4 MW_{peak} großen PV-Anlage kann bilanziell der Energiebedarf der Stadtgemeinde Leoben, der bei jährlich ca. 3 GWh liegt, gedeckt und die Eigenversorgung aller öffentlichen Gebäude (Rathaus, Wirtschaftshof, Schwimmbad, Stadtwerke, Kindergarten, Schulen, Veranstaltungsräumlichkeiten etc.) und der kommunalen Infrastruktur, wie z.B. der Straßenbeleuchtung, realisiert werden.
Bereits in der Sondierungsphase sollen die Varianten des Netzzuganges zusammen mit EVUs untersucht werden. Unter Einbeziehung der derzeit vorhandenen Kapazitäten bei den in Frage kommenden Umspannwerken (Mittelspannungsebene 20 kV), die jedoch aufgrund anderer Projektvorhaben zur Erzeugung erneuerbarer Energien derzeit ausgeschöpft sind, erscheinen Synergien mit mittelfristig in Planung bzw. kurz vor der Umsetzung stehenden Wind- und Wasserkraftwerken in der Region sinnvoll. Alternative Lösungen in Form von Hybridkraftwerken im Zusammenschluss mit Betreibern von Wasserkraftwerken entlang der Mur, aber auch mögliche Kooperationen mit großen, energieverbrauchintensiven Konzernen rücken dabei in den Vordergrund. So forciert, um nur ein Beispiel zu nennen, die voestalpine am Standort Donawitz im Rahmen ihres Projekts „Green Steel“ die Stilllegung eines konventionellen Hochofens und investiert gleichzeitig in den Bau eines Elektrolichtbogenofens. Dafür wurden neben eigenen PV- und zukünftig auch Windkraftanlagen auch ein eigenes Umspannwerk am Standort in Donawitz errichtet, welches – in der Luftlinie betrachtet – unter 2,5 km entfernt zur Deponie Seegraben liegt.

Ergänzend wird geprüft, inwieweit eine Speicherung vor Ort (Batteriespeicher) die zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Einspeisung ermöglichen und damit die Anforderungen an den Netzanschluss reduzieren kann – etwa in Kombination mit flexiblen Netzzugangsmodellen oder zur Kappung von Einspeisespitzen. Nach derzeitigem Planungsstand wird primär eine Einspeisung ohne Speicher verfolgt; die Speicheroption wird jedoch im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Sondierungsprojekts mitbewertet.

5 AKZEPTANZANALYSE

Für die möglichst friktionsfreie Realisierung von Großprojekten im öffentlichen Raum ist es wichtig, frühzeitig die Akzeptanz in der Bevölkerung zu schaffen. Im Rahmen des Sondierungsprojekts sollen die direkten Anrainer zur ehemaligen Deponie Seegraben, eine Siedlung an der Seegrabenstraße bzw. am Stollenweg mit rund 19 Mehrparteienhäusern (über 80 Wohneinheiten), eingebunden werden. Dadurch, dass die Deponie in Hanglage rund 20 m über dem Grundstücksniveau der Häuser liegt und eine bestehende Bewaldung des Osthanges erhalten bleibt, ist die direkte Sicht auf die geplante PV-Fläche nicht gegeben. Auch die Einsehbarkeit der Anlage vom Stadtkern aus ist de facto nicht gegeben. Die visuelle Betroffenheit der Anrainerschaft wird daher als gering eingeschätzt. Unabhängig davon wird das Meinungsbild der Bevölkerung ergebnisoffen erhoben, um etwaige Bedenken frühzeitig zu erkennen und in die Planung einfließen zu lassen. Dies erfolgt in enger Zusammenarbeit mit der Klima- und Energiemodellregion „KEM Murraum Leoben“, bei der die Stadtgemeinde Leoben als Trägerorganisation auftritt. Dazu gibt es

bereits in der frühen Projektphase ein kompaktes Factsheet mit einem per QR-Code verknüpften, standardisierten Online-Fragebogen, das an die direkt angrenzenden Bewohnerinnen und Bewohner verteilt und über die Kanäle der KEM sowie der Gemeindemedien gestreut wird.
Das Projektkonsortium setzt auch auf öffentliche Informationsveranstaltungen mit Visualisierungen der Anlage und Q&A-Sessions. Gegebenenfalls werden auch weitere interaktive Formate, wie Dialoge bzw. Energiestammtische angeboten.

6 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die bisherigen Ergebnisse der Sondierung zeigen, dass die Nachnutzung einer in Nachsorge befindlichen städtischen Deponie als PV-Standort grundsätzlich machbar erscheint – allerdings nur im engen Zusammenspiel von Deponietechnik, Geotechnik, Genehmigungsrecht und Energiewirtschaft. Die Deponieaufsicht steht dem Vorhaben unter definierten Auflagen offen gegenüber; die gemessenen Deponiegasemissionen liegen weit unter den seinerzeitigen Prognosewerten, womit sich die Rahmenbedingungen für eine PV-Nutzung günstig darstellen. Als zentrale Erfolgsfaktoren wurden die Wahl einer setzungs- und frosttoleranten Unterkonstruktion ohne unzulässige Durchdringung der Oberflächenabdeckung, der belastbare dichtungstechnische Nachweis punktueller Gründungen in den Böschungsbereichen, ein standortangepasstes Vegetations- und Pflegekonzept sowie insbesondere der Netzzugang identifiziert. Bis zum Projektende sollen ein mit der Behörde abgestimmtes Detailkonzept, eine Wirtschaftlichkeitsbewertung über die Anlagenlebensdauer und eine Entscheidungsgrundlage für die kommunalen Gremien vorliegen. Angesichts von österreichweit rund 21 km² vergleichbarer Deponieflächen mit einem theoretischen Potenzial von 2,1 GW_{peak} können die gewonnenen Erkenntnisse als übertragbare Grundlage für ähnliche Vorhaben dienen.

LITERATURVERZEICHNIS

Austrian Power Grid AG (2026). Österreich erneut Stromimporteur, 11.03.2026 online unter https://www.apg.at/news-presse/apg-strombilanz-2025-oesterreich-erneut-stromimporteur/.

BOKU (2026). Vegetations- und Pflegekonzept Deponie Seegraben (AP4-Zwischenstand). Wien.

INSITU Geotechnik ZT GmbH (2025). Geotechnische Stellungnahme PV-Anlage Deponie Seegraben. GZ 351523, Graz.

RM Umweltkonsulenten ZT GmbH (2022). Nachnutzung Deponie Seegraben – Deponiegasmessungen zur Ermittlung der aktuellen Emissionssituation. GZ RMU-PR-0237-2021_22/01, Wien.

Umweltbundesamt (2024). Altlasten-Atlas. Wien.

Die Circulyzer-Technologie – Der Weg vom Universitätslabor in die Fabrikhalle

Daniel Schwabl[1] & Markus Bauer[1]
[1)] Circulyzer GmbH, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Im gegenständlichen Beitrag wird ein Bogen über die Entwicklung der Circulyzer-Technologie gespannt. Dabei wird im ersten Kapitel auf die grundlegende Idee und Motivation eingegangen, wobei der Fokus auf den Einsatz für das chemische Recycling erläutert wird. Darauf aufbauend wird auf das an der Montanuniversität Leoben durchgeführte RSA Plastics Reborn und dessen Ergebnisse hinsichtlich nutzbarer Polyolefinströme als auch der errichteten Technikumsanlage eingegangen. Kapitel 2 zeigt dann welche Veränderungen sich durch den Übergang von der Universität hin in ein Spin-Off und eine industrietaugliche Technologie ergaben und welche Anwendungsfelder aktuell bedient werden. In Kapitel 3 werden die Erkenntnisse zusammengefasst und ein Vergleich zwischen den anfänglichen Erwartungen und der tatsächlichen Umsetzung der Circulyzer Technologie gezogen.

1 VOM KOPF IN DAS UNIVERSITÄTSLABOR

1.1 Anfängliche Idee und Motivation

Die Circulyzer-Technologie nahm ihren Anfang durch das von der OMV gestartete Reoil Projekt, welches es zum Ziel hatte, über eine thermochemische Konversion zusätzliche Mengen an Altkunststoffen für ein Recycling verfügbar zu machen. Die hierfür erarbeitete Prozesskette, wie sie in Bauer et al., 2016 beschrieben ist, sieht vor, dass dem Konversionsschritt ein vorangereichertes Konzentrat aus Polyolefinen (PO) - Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol - zugeführt wird. Dieses sogenannte PO-Flake sollte dann in Intermediats, also verschiedene chemische Grundbausteine, zerlegt werden, die dann als Einsatzstoffe für eine Vielzahl von Raffiniereprodukten dienen.
Für dieses chemische Recycling wurde die Gruppe der Polyolefine aus mehreren Gründen als Feedstock gewählt:

- Sie sind in großen Mengen als Abfälle verfügbar, da sie massemäßig einen großen Anteil der Kunststoffproduktion ausmachen und zum anderen für Produkte mit kurzem Lebenszyklus wie etwas Verpackungen eingesetzt werden (siehe Tab. 1)

Tab. 1: Kunststoffneuproduktion 2024 in Europa nach Polymertyp (PlasticsEurope AISBL, 2024)

Polymertyp	Anteil (%)	Beispiel für Anwendung
Polyethylen (PE)	27,0	Säcke, Behälter, Spielzeuge, Haushaltswaren
Polypropylen (PP)	19,7	Lebensmittelpackung, Rohre
Polyvinylchlorid (PVC)	10,6	Kabelhüllen, Rohre, Abdeckungen
Polyurethane (PUR)	6,9	Isolierschaum, Polster, Matratzen
Polystyrol (PS)	6,4	Verpackung, Isolierungen
Polyethylenterephthalat (PET)	5,8	Packung für Getränke und Flüssigkeiten
Andere	23,6	-

- Sie haben eine einfach chemische Struktur und enthalten keine Störatome wie Sauerstoff, Chlor oder Stickstoff, was den Konversionsprozess vereinfacht (siehe Abb. 1)
- Sie sind als nicht sortenreine Kunststoffe nur schwierig mechanisch zu recyclen, da Verunreinigungen zu starken Veränderungen ihrer Stoffeigenschaften und Verarbeitungsmöglichkeiten führen (vergleiche Abb. 1) und wodurch ihr chemisches Recycling eine ökologisch bessere Option als ihre thermische Verwertung darstellt

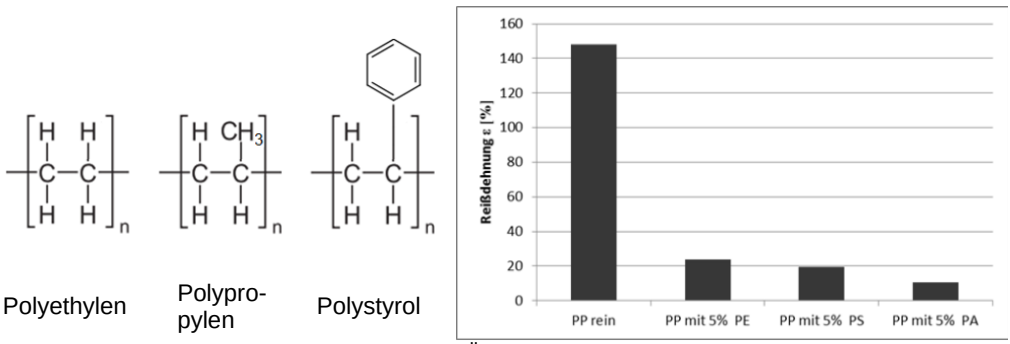


Abb. 1: Chemische Struktur der Polyolefine (links) Änderung der Reißdehnung von Polypropylen durch Verunreinigungen (rechts) (Michaeli et al., 1992)

1.2 RSA Plastic Reborn

Mit der Aufgabenstellung, aus großen Mengen an Altkunststoffen kostengünstige Polyolefinkonzentrate für das chemische Recycling rückzugewinnen, startete das Forschungsprojekt Research Studio Austria (RSA) Plastic Reborn. Ein Team aus Mitarbeiter*innen der OMV, sowie der Lehrstühle für Aufbereitung und Veredlung (AuV), Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes (VTIU) und Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW) der Montanuniversität Leoben betrieb dieses von 2014 bis 2018.
Zum einen wurde nach Abfallströmen gesucht, die als Feedstock einer künftigen Aufbereitungsanlage dienen könnten, wobei drei Kriterien festgelegt wurden:

- Der Abfallstrom muss eine jährliche Mindestmenge von 10.000 t aufweisen,
- Der Abfallstrom muss mindestens einen Gehalt von 20% Polyolefinen besitzen,
- Der Abfallstrom muss als nicht gefährlich eingestuft sein.

Mit dieser Vorgabe konnten 7 relevante Abfallströme identifiziert und ein jährliches PO-Potential für Österreich von 310.000 t auf Zahlenbasis des Jahres 2014 (Kranzinger et al., 2016) abgeschätzt werden.
Basierend auf vorangegangenen Untersuchungen im Zuge einer vorangegangenen Dissertation (Bauer, 2014) wurde zu anderen die nass-mechanische Dichtetrennung mittels eines Zentrifugalkraftscheiders nach dem LarCoDeMS-Modell, wie er in Cammack, 1987 beschrieben ist, als vielversprechendes Trennaggregat näher untersucht. Wie in Abb. 2 ersichtlich ist, sollte es mittels einer Dichtetrennung mit Wasser möglich sein, den Großteil der zu erwartenden Störstoffe wie Mineralik, Glas und Metalle aber auch die anderen Massenkunststoffe (PET, PVC, PA, PUR) von Polyolefinen abzutrennen. Diese Prozessführung wäre sowohl kostengünstig und würde auch das Abwaschen von Verunreinigungen von den Kunststoffen ermöglichen.
Abb. 3 zeigt das grundlegende Trennprinzip für einen Zentrifugalkraftscheider nach dem LarCoDeMS-Modell, bei welchem Trennmedium und zu trennendes Gut im Gegenstrom geführt werden. Dabei wird das verwendete Trennmedium am unteren Ende des etwa 30° zur Horizontalen geneigten Scheiders tangential eingepumpt, wodurch sich im Scheider ein äußerer, nach oben strömender Fluidwirbel ausbildet. Da der Scheider zudem am oberen und unteren zentralen Anschluss zur Umgebung hin offen ist, bildet sich zweiter innerer, nach unten strömender Wirbel aus Luft und Trennmedium aus. Über die Wirbel werden dabei in Abhängigkeit von der angelegten Pumpleistung Zentrifugalkräfte von 40 bis 50 G induziert.

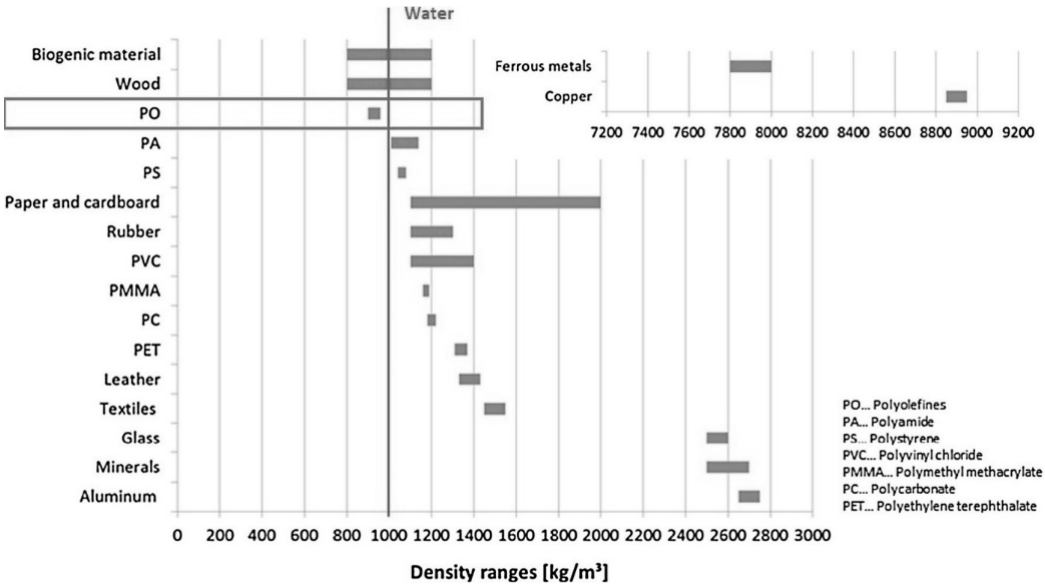


Abb. 2: Dichtespektren verschiedener Kunst- und Störstoffe (Bauer et al., 2018)

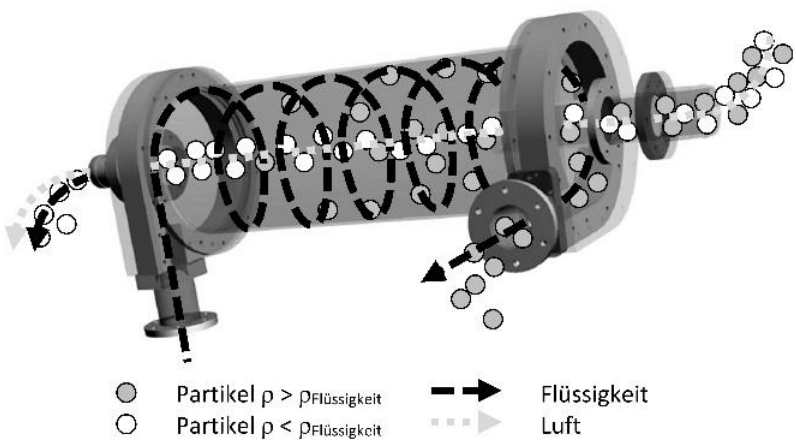


Abb. 3: Prinzipdarstellung der Funktionsweise eines Zentrifugalkraftscheiders mit Trennmedium und Aufgabegut im Gegenstrom (Schwabl et al., 2017)

Direkt in diese Wirbel wird das zu trennende Aufgabegut am oberen Ende des Scheiders zentral aufgegeben und im Trennmedium dispergiert. Jene Anteile, die eine höhere Dichte als das Trennmedium aufweisen, sinken – beschleunigt durch die Zentrifugalkräfte – zur Scheiderwandung ab, wodurch sie in den Aufwärtswirbel gelangen und als Schwergutfraktion am oberen Ende des Zentrifugalkraftscheiders tangential ausgeschleust werden. Jene Anteile, welche eine geringere Dichte als das Trennmedium aufweisen, schwimmen zur zentralen Achse des Scheiders auf und gelangen somit in die Abwärtsströmung. Sie werden als Leichtgutfraktion am unteren zentralen Austrag des Zentrifugalkraftscheiders ausgebracht.

Im Zuge des RSA Plastic Reborn wurde ein solcher Zentrifugalkraftscheider errichtet, optimiert und betrieben, wie in Schwabl et al., 2017 beschrieben ist. Dabei konnten im Zusammenspiel mit einer zur Schwergutabreicherung vorgeschalteten Setzmaschine für Abfallströme mit unterschiedlichen Ausgangsgehalten an Polyolefinen vielversprechende Trennergebnisse erzielt werden (vergleiche Tab. 2).
Es wurden in der Setzmaschine eine deponierbare Schwergutfraktion aus inerten Materialien wie Mineralik, Glas und Metallen (SGF) und dann mit dem Zentrifugalkraftscheider eine Mittelgutfraktion aus schweren Kunststoffen für die thermische Verwertung (MGF) und eine polyolefinreiche Leichtgutfraktion für das chemische Recycling (LGF) abgetrennt.

Tab. 2: Ergebnisse der Trennversuche an der Technikumsanlage für industrielle Aufgabegüter mit unterschiedlichen Polyolefingehalten (Schwabl et al., 2020)

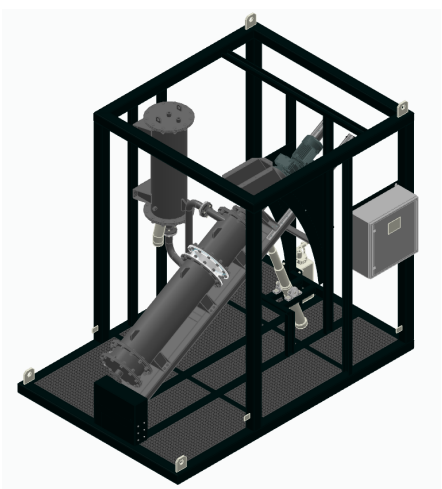
	Aufgabe		Masseausbringen Produkte			Leichtgutfraktion	
Reststoff	k_{80} [mm]	$g_{PO,A}$ [%]	$r_{m,SGF}$ [%]	$r_{m,MGF}$ [%]	$r_{m,LGF}$ [%]	$g_{PO,MGF}$ [%]	$r_{j,PO\ LGF}$ [%]
A	7,8	55,8	26,3	19,3	54,4	97,0	98,8
B	9,8	34,4	49,5	18,0	32,5	93,4	96,3
C	10,9	11,8	46,7	32,6	20,7	89,6	88,1

2 VOM UNIVERSITÄTSLABOR IN DIE FABRIKHALLE

2.1 Die Circulyzer GmbH

Basierend auf den erzielten Ergebnissen sowie einem daraus erarbeiteten Patent und dem Feedback von Industriepartnern wurde am 20. August 2020 die Circulyzer GmbH als Spin-Off der Montanuniversität Leoben gegründet. Das Unternehmen machte es sich ab da zur Aufgabe, den nun als Circulyzer bezeichneten Zentrifugalkraftscheider weiter zu optimieren und als marktreifes Produkt zu verkaufen.

2.2 Die ersten Circulyzer und Erkenntnisse



Wasserbedarf	35 - 40 [m³/h]
Materialdurchsatz	5 – 10 [m³/h]
Röhrendurchmesser	300 mm
Elektrische Leistung	5,1 [kW]
Abmessungen (L x B x H)	3 x 2 x 2,3 [m]
Leergewicht	1,5 [t]

Abb. 4: Circulyzer-Modul SST5

Zu Jahreswechsel 2023/24 wurden die ersten industriellen Circulyzer in Betrieb genommen nachdem, wie in Abb. 4 ersichtlich, einige technische Verbesserungen umgesetzt wurden:

- Eine Bauweise als eigenständige Einheit mit separatem Stahlbau möglichst nahe an einer Containergröße wurde gewünscht um den Circulyzer möglichst einfach in bestehende Anlagen einbauen zu können,
- Die stufenlose Neigungsverstellung, welche in den Versuchen hauptsächlich der Optimierung der Trennergebnisse diente, wurde von 40-20° auf 45-0° zur Horizontalen erweitert, was vor allem der leichteren Wartung der Förderschnecke und der Zuführung diente,
- Zur Steuerung des Gegendruckes wurde ein zusätzlicher Windkessel im Schwergutaustrag installiert, welcher die Wahrscheinlichkeit von Verstopfungen minimierte,
- Zusätzlich zur Überwachung des korrekten Aufbaus der Trennmedienwirbel mit Druck- und Durchflusssensoren wurde ein durchsichtiger Sichtring in der Scheiderröhre vorgesehen, um eine optische Kontrolle zu ermöglichen.

Neben diesen baulichen Anpassungen ergab sich auch eine Änderung des vermuteten Haupteinsatzfeldes. So wurde im RSA Plastic Reborn vor allem der Einsatz im chemischen Recycling und zur Aufbereitung von Folien für dieses betrachtet.
Die ersten Nutzungen ergaben sich nicht im chemischen sondern im mechanischen Recycling von Strappings und PET-Flaschen. Hier konnten in Versuchen sehr gute Trennergebnisse mit Schwergütern mit PET-Gehalten von über 98% erreicht werden. Durch die hohe Schüttdichte und die günstige Kornform konnten hier bereits mit einer in Abb. 4 gezeigten SST5 Einheit Durchsätze von 1-2 t Material erreicht werden.

2.3 Neue Anwendungsfelder

Über die enge Zusammenarbeit sowohl mit der Montanuniversität Leoben als auch mit neuen Industriepartnern wurden auch andere Anwendungsfelder für den Circulyzer getestet, die in Zukunft neue Geschäftsfelder eröffnen könnten.

2.3.1 Kunststoffasern und Textilien

Das Recycling von Kunststofffasern aus Filzen oder Vliesen sowie Textilien stellt insofern eine Herausforderung dar, als sehr feine, eher längliche Fasern getrennt werden müssen. Die eher ungünstige Partikelform führt zu einer geänderten Bewegung, wodurch das Trennergebnis beeinflusst wird.
Über mehrere Trennschritte war es beispielsweise möglich, ein PA-PET Gemisch über 5 Trennschritte von 30% auf knapp 85% PA-Gehalt aufzukonzentrieren, wobei in jedem Schritt über 90%ige PET-Fraktionen abgezogen wurden.

2.3.2 Photovoltaikmodule

Der mögliche Einsatz zum Photovoltaikrecycling wurde für die Trennung von EVA-Kunststoffen und Silizium des Zellmaterials und für verschiedene Kunststoffe des Backsheets getestet. Dabei konnten vor allem für die erstgenannte Trennaufgabe gute Reinheiten erzielt werden (Azizi et al., 2026).

2.3.3 Wäsche von Metallspänen

Das Feld der Wäsche, welches die wirkenden Zentrifugalkräfte für die Reinigung und nicht für die Trennung nutzt, wurde getestet, um Öle von Metallspänen zu entfernen. In den Versuchen konnte dabei auf Stahl- und Aluminiumspänen der Ölanteil von 15% auf etwa 2% verringert werden. Hierfür wurde als Trennmedium eine Wasser-Tensid-Lösung bei 60°C verwendet.

3 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Der Weg der Circulyzer-Technologie zeigt, dass sich mittels intensiver Forschung und der Zusammenarbeit von Industrie und Universitäten neue Ideen bis hin zur technischen Umsetzung entwickeln lassen. Die im Labor- und Technikumsmaßstab aufgezeigte Leistungsfähigkeit des Circulyzers konnte auch im Industrieeinsatz bewiesen werden.
Dabei wurde aber auch aufgezeigt, dass der anfangs eingeschlagene Fokus auf platzsparenden Aufbau und Veränderungsmöglichkeiten im Industriebetrieb nicht von großem Interesse war. Viel mehr überzeugten die technische Einfachheit und der damit einhergehende geringe Wartungsbedarf sowie der sehr geringe Energieverbrauch. Auch das erwartete Haupteinsatzfeld für hochwertige Leichtgutfraktionen für das chemische Recycling wurde durch hochreine Schwergutfraktionen für das mechanische Recycling ersetzt.
Der eingeschlagene Weg war also der vollkommen richtige, wenn er auch schlussendlich an ein anderes Ziel geführt hat.

LITERATURVERZEICHNIS

Azizi, F., Feldbacher, S., Bjelic, M., Schwabl, D., Flachberger, H., Oreski, G., & Nigl, T. (2026). Einfluss des Aufschlussgrades auf die nassmechanische und chemisch-mechanische Aufbereitung von Photovoltaik-Modulen. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*.

Bauer, M. (2014). *Dissertation: Mechanical processing of post-consumer plastics for chemical recycling.* Leoben: Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben.

Bauer, M., Lehner, M., & Hofer, W. (2016). Prozesskette zum stofflichen Recycling von Kunststoffabfällen. *Berg- und Hüttenmännisches Monatsheft*, 246-251.

Bauer, M., Lehner, M., Schwabl, D., Flachberger, H., Kranzinger, L., Pomberger, R., & Hofer, W. (2018). Sink-Float Density Separation of Post-Consumer Plastics for Feedstock Recycling . *Material Cycles Waste Management*.

Cammack, P. (1987). Der LARCODEMS - ein neuer Schwertrübescheider für Rohkohle der Körnung 100 bis 0,5 mm. *Aufbereitungs-Technik Nr.8* , 427-434.

Kranzinger, L., Pomberger, R., Schwabl, D., & Bauer, M. (2016). „Quo vadis Kunststoffrecycling – Bestandsaufnahme der polyolefinen Kunststoffe in der österreichischen Abfallwirtschaft. *Konferenzband Recy & DepoTech 2016*, 583-588.

Michaeli, W., Bittner, M., & Wolters, L. (1992). *Grundlagen des Kunststoffrecyclings.* Aachen: Carl Hanser Verlag.

PlasticsEurope AISBL. (2024). *Plastics – the Facts 2024.* Brüssel: PlasticsEurope AISBL.

Schwabl, D., Bauer, M., Peyha, M., & Lehner, M. (2020). Überführung eines nass-mechanischen Aufbereitungsverfahrens für Altkunststoffe in den Pilotmaßstab. *Recy & DepoTech 2020*, 129–134.

Schwabl, D., Flachberger, H., Bauer, M., Lehner, M., Kranzinger, L., Pomberger, R., & Hofer, W. (2017). Innovatives Verfahren zur Anreicherung von Polyolefin-Konzentraten aus industriellen Reststoffströmen zum Zwecke einer stofflichen Verwertung. *Konferenzband Rohstoff und Recycling Band*, 199-218.

KONTAKT

Dr.-mont. Dipl-Ing. Daniel Schwabl
daniel.schwabl@circulyzer.at
+43 699 11386334
Geschäftsführung
Circulyzer GmbH
https://circulyzer.at/

Friktionswäsche von PP-Flakes: Optimierung von Wasserverbrauch, Temperatur und Waschwasserreuse im Pilotmaßstab

Theresa Plesch[1], Mauricio Pane[1], Vipul Verma[1,2], Stefani Ozi[1], Moritz Mager[2], Jörg Fischer[2] & Bettina Muster-Slawitsch[1]
[1)] AEE INTEC, Wasser und Prozesstechnologien, Gleisdorf, Österreich
[2)] JKU, Institute of Polymeric Materials and Testing, Linz, Österreich

KURZFASSUNG: Die Friktionswäsche ist ein zentraler Prozessschritt im mechanischen Kunststoffrecycling, dessen Betriebsparameter bislang nur begrenzt wissenschaftlich untersucht wurden. Im Rahmen des Projekts *circPLAST-mr* wurde die Reinigung von Polypropylen Flakes im Pilotmaßstab hinsichtlich Wasser-Kunststoff-Verhältnis (W:P = 0,8–1,5), Wassertemperatur (20–80 °C), mehrstufiger Waschkonzepte sowie der Wiederverwendung von aufbereitetem Waschwasser untersucht. Die Reinigungsleistung wurde anhand eines CSB-basierten Parameters zur Quantifizierung der Oberflächenkontamination bewertet. Bereits nach einer einzelnen Friktionswaschstufe konnten Kontaminationsreduktionen von über 50 % erreicht werden. Dabei erwies sich ein Betrieb bei 20 °C und einem Wasser-Kunststoff-Verhältnis von 1,0 als besonders ressourceneffizient. Mehrstufige Waschversuche zeigten, dass der überwiegende Teil der entfernbaren Oberflächenkontamination bereits innerhalb von zwei Waschstufen entfernt wird. Darüber hinaus erzielte mittels Ultra- und Nanofiltration aufbereitetes Permeat vergleichbare Reinigungsergebnisse als Frischwasser. Die Ergebnisse zeigen das Potenzial einer ressourceneffizienten Friktionswäsche mit reduziertem Wasser- und Energiebedarf sowie einer Kreislaufführung von Waschwasser in Kunststoffrecyclinganlagen.

1 EINLEITUNG

Die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen stellt einen wesentlichen Baustein zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft dar und gilt derzeit als die wichtigste Recyclingroute für thermoplastische Kunststoffe wie Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) (Jeswani et al., 2021). Die Qualität der erzeugten Rezyklate wird jedoch maßgeblich durch Verunreinigungen beeinflusst, die entlang der Nutzungskette auf die Kunststoffoberflächen gelangen. Hierzu zählen unter anderem organische Reststoffe, Druckfarben, Klebstoffe, Papierfasern sowie mineralische Partikel. Eine effiziente Entfernung dieser Kontaminationen ist Voraussetzung für hochwertige Rezyklate und insbesondere für anspruchsvolle Anwendungen im Verpackungsbereich (Schyns & Shaver, 2021).

Die Nassaufbereitung stellt daher einen zentralen Prozessschritt im mechanischen Kunststoffrecycling dar. Neben Zerkleinerungs-, Trenn- und Trocknungsprozessen übernehmen unter anderem Friktionswäscher die Aufgabe, anhaftende Verunreinigungen durch intensive mechanische Beanspruchung und gleichzeitige Wasserzugabe von der Kunststoffoberfläche zu lösen. Trotz ihrer breiten industriellen Anwendung werden Friktionswäscher häufig auf Basis von Erfahrungswerten betrieben. Quantitative Untersuchungen zum Einfluss von Betriebsparametern wie Temperatur, Wasser-zu-Kunststoff-Verhältnis oder der Wiederverwendung von Waschwasser sind bislang nur begrenzt verfügbar (Eriksen et al., 2019).

Gleichzeitig rücken Ressourceneffizienz und Wasserverbrauch zunehmend in den Fokus der Recyclingindustrie. Moderne Kunststoffwaschanlagen benötigen erhebliche Mengen an Frischwasser und erzeugen belastete Prozesswässer, deren Behandlung und Wiederverwendung sowohl aus ökologischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht an Bedeutung gewinnt (Hahladakis & Iacovidou, 2018; Jeswani et al., 2021). Vor diesem Hintergrund besteht ein wachsender Bedarf an

belastbaren Betriebsstrategien, welche eine hohe Reinigungsleistung bei möglichst geringem Wasser- und Energieeinsatz ermöglichen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Untersuchung und Optimierung einer Friktionswäsche im Pilotmaßstab für PP-Flakes mit unterschiedlichen Grad an Oberflächenkontamination. Hierzu wurden der Einfluss des Wasser-Kunststoff-Verhältnisses sowie der Wassertemperatur systematisch untersucht. Ergänzend wurden mehrstufige Waschkonzepte sowie die Wiederverwendung von aufbereitetem Waschwasser bewertet. Die Reinigungsleistung wurde über die verbleibende Oberflächenkontamination der Flakes bestimmt, welche mittels eines CSB-basierten Analyseverfahrens quantifiziert wurde. Auf Basis der Ergebnisse können ressourceneffiziente Betriebsparameter für den industriellen Einsatz abgeleitet werden.

Die Versuche wurden im Leitprojekt „circPLAST-mr“ durchgeführt, das im Rahmen der 1. Ausschreibung der FTI Initiative Kreislaufwirtschaft genehmigt wurde. Das Projekt wurde vom BMIMI gefördert und von der FFG abgewickelt.

2 MATERIALIEN UND METHODIK

2.1 Versuchsmaterialien und Pilotanlage

Für die Untersuchungen wurden Polypropylen-(PP-) Flakes mit einer Partikelgröße von etwa 20 mm eingesetzt. Die Materialien stammten aus unterschiedlichen Aufbereitungschargen eines industriellen Kunststoffrecyclers und wurden entsprechend ihrer initialen Oberflächenkontamination in drei Klassen eingeteilt: gering (<40 mg CSB/g), mittel (40–50 mg CSB/g) und stark kontaminiert (>50 mg CSB/g).

Die Versuche wurden an einer Friktionswasch-Pilotanlage an der LIT Factory der JKU in Linz durchgeführt. Die Anlage besteht aus einem Förderband zur Beschickung der Flakes, einem Friktionswäscher sowie einem mechanischen Trockner und ist schematisch in Abbildung 1 gezeigt (Muster-Slawitsch et al., 2024). Die Verweilzeit der Flakes vom Eintritt in den Friktionswäscher bis zum Austrag aus dem Trockner beträgt etwa 5 s. Die Anlage kann mit Frischwasser, aufbereitetem Prozesswasser (Permeat) oder verunreinigten Prozesswasser betrieben werden. Frischwasser kann bis auf 80 °C temperiert werden.

Zur Wasseraufbereitung wurde eine Anlage der Firma OSMO/GAW integriert. Diese besteht aus einem Schrägsieb zur Vorbehandlung, einer Ultrafiltration sowie einer nachgeschalteten Nanofiltration. Das erzeugte Permeat wurde für ausgewählte Waschversuche erneut als Prozesswasser eingesetzt. (Moritz et al., 2026)

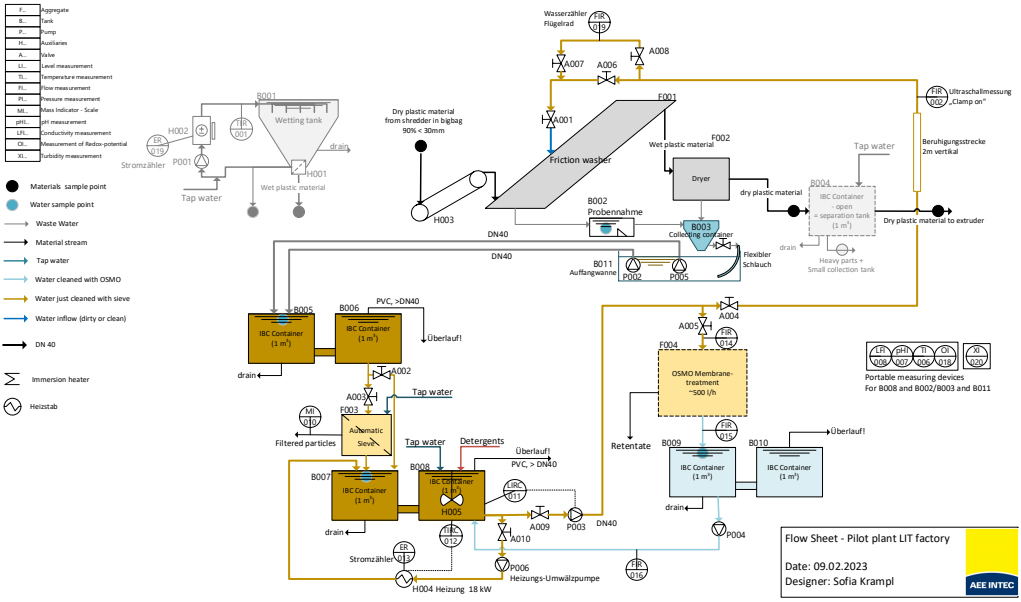


Abb. 1: Schema der Technikumsanlage Friktionswäscher an der LIT Factory, Linz

2.2 Versuchsdesign

Vor Beginn wurden Vorversuche zur Bestimmung eines geeigneten Probenahmezeitpunkts sowie zur Auswahl eines ressourceneffizienten Durchsatzes durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Anlage in sehr kurzer Zeit (< 1min) einen stabilen Betriebszustand erreicht und dass ein Durchsatz von 2300 kg·h^{-1} eine geringe Feinpartikelbildung bei gleichzeitig unveränderter Waschleistung ermöglicht.

Die Optimierung der Friktionswäsche erfolgte mittels zweifaktoriellen Versuchsdesigns. Untersucht wurden vier Wasser-Kunststoff-Verhältnisse (W:P = 0,8; 1,0; 1,25; 1,5) sowie drei Wassertemperaturen (20, 50 und 80 °C). Alle Versuche wurden mit Frischwasser durchgeführt.

Ergänzend wurden mehrstufige Waschversuche durchgeführt, um den Effekt mehrerer aufeinanderfolgender Friktionswaschstufen zu simulieren. Zusätzlich wurde der Einfluss unterschiedlicher Wasserqualitäten (Frischwasser, Prozesswasser und Permeat) untersucht.

2.3 Analytik

Die Reinigungsleistung wurde anhand der verbleibenden Oberflächenkontamination der Kunststoffflakes bewertet. Hierfür wurden die Flakes in einer 2 gew.-% NaOH-Lösung bei 85 °C über 30 min im Labor nachgewaschen. Das Wasser-Kunststoff-Verhältnis betrug 6, die Durchmischung erfolgte bei 800 min^{-1}. Nach der analytischen Laborwäsche wurden die Flakes abgetrennt und der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) der Flüssigphase bestimmt.

Die Oberflächenkontamination (Surface Contamination – SC) wurde gemäß Gleichung (1) als mg CSB pro Gramm Kunststoff berechnet:

$$SC_{CSB}\ \left[\frac{\mathrm{mg}_{CSB}\cdot}{\mathrm{g}_{Flake}}\right] = \frac{mg_{CSB}}{L} * \frac{V_{WW}\,[ml]}{m_K\,[g]} \quad (1)$$

mit CBS als photometrisch analytisch bestimmter Wert nach DIN ISO 15705:2003-01, V_{ww} Volumen des Waschwassers und m_K die Menge der Kunststoff-Flakes

Alle Analysen wurden in Doppelbestimmung durchgeführt. Die angegebenen Abweichungen entsprechen der Streuung dieser Doppelbestimmungen. Details der Entwicklung des Qualitätsparameters finden sich in Kürze in (Pane, Mauricio et al., under submission)

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Optimierung der Friktionswäsche

Abbildung 2 zeigt den Einfluss des Wasser-Kunststoff-Verhältnisses (W:P) und der Wassertemperatur auf die verbleibende Oberflächenkontamination der untersuchten PP-Flakes. Für alle drei Kontaminationsklassen konnte bereits nach einer einzigen Friktionswaschstufe eine deutliche Reduktion der Oberflächenkontamination erzielt werden.

Bei gering kontaminierten Flakes reduzierte sich die Oberflächenkontamination von 38,2 mg CSB·g⁻¹ auf 18,0 mg CSB·g⁻¹ bei 20 °C und W:P = 1,0, was einer Reduktion von 52,9 % entspricht. Auch bei stark kontaminierten Flakes konnte unter denselben Bedingungen eine Reduktion von 50,2 auf 25,1 mg CSB·g⁻¹ und damit um 50,0 % erreicht werden. Die niedrigste gemessene Oberflächenkontamination für stark verschmutztes Material von 18,9 mg CSB· g⁻¹ wurde bei den Bedingungen von 50°C und W:P von 1,0 erreicht,

Insgesamt zeigte sich, dass sowohl eine Erhöhung der Temperatur als auch eine Erhöhung des Wasser-Kunststoff-Verhältnisses nur begrenzte zusätzliche Reinigungseffekte im Firktionswäscher bewirken. Besonders für gering und stark kontaminierte Materialien erwies sich ein Betrieb bei Umgebungstemperatur (20 °C) und W:P = 1,0 als ausreichend, um das angestrebte Ziel einer Reduktion der Oberflächenkontamination um mindestens 50 % zu erreichen. Für Materialien mit einem ursprünglichen Kontaminationslevel von 40-50 mg CSB g⁻¹ wurde ein Zielkonflikt zwischen Wasser- und Energieeinsatz beobachtet: Eine 50% Reduktion der Oberflächenkontamination konnte entweder durch höhere Temperaturen oder durch erhöhte Wassermengen erreicht werden. Die Ergebnisse zeigen somit, dass ein Betrieb bei 20 °C und W:P = 1,0 den besten Kompromiss zwischen Reinigungsleistung und Ressourceneinsatz darstellt.

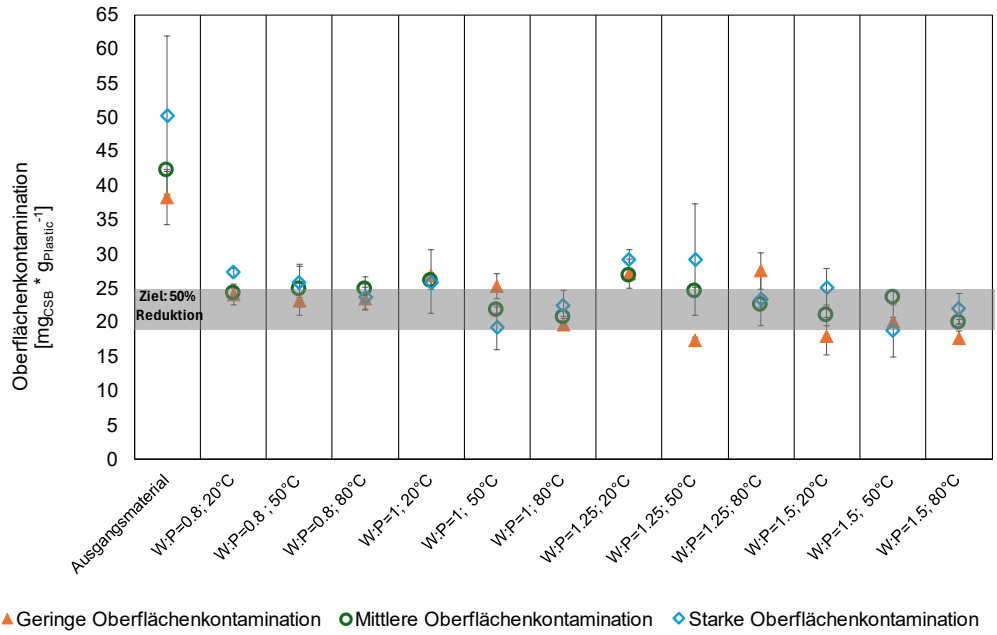


Abb. 2: Oberflächenkontamination von PP-Flakes bei unterschiedlicher Ausgangskontamination und nach Friktionswäsche bei variierenden Wasser-Kunststoff-Verhältnissen (W:P) von 0,8-1,5 und Waschwassertemperaturen von 20°C-80°C und einem Durchsatz von 2300 kg Flakes pro Stunde; n=2. Der graue Balken repräsentiert eine Reduktion der initialen Oberflächenkontamination um 50%.

3.2 Mehrstufige Friktionswäsche

Zur Bewertung mehrstufiger Waschkonzepte wurden die Kunststoffflakes mehrfach hintereinander gewaschen. Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der Oberflächenkontamination über mehrere Waschstufen. Der größte Reinigungseffekt wurde bereits innerhalb der ersten beiden Waschdurchgänge erzielt. Die Oberflächenkontamination reduzierte sich von 42,2 mg CSB·g^{-1} im Ausgangsmaterial auf 26,0 mg CSB·g^{-1} nach dem ersten Waschdurchgang und weiter auf 18,0 mg CSB·g^{-1} nach dem zweiten Waschdurchgang. Dies entspricht einer Reduktion der Oberflächenkontamination um 57,3 %. Ein dritter Waschdurchgang führte nur noch zu einer geringen weiteren Verbesserung auf 16,5 mg CSB·g^{-1}, was einer Gesamtreduktion von 60,9 % entspricht. Die Ergebnisse zeigen, dass der überwiegende Anteil der entfernbaren Oberflächenkontamination bereits innerhalb von zwei Waschstufen entfernt wird, während zusätzliche Waschstufen nur noch geringe zusätzliche Reinigungseffekte erzielen. Die auch nach mehr als zwei hintereinander geschalteten Friktionswäschen verbleibende Oberflächenkontamination wird vermutlich durch schwer entfernbaren Kontaminanten, wie Druckfarben oder Kleberreste verursacht, welche für eine vollständige Entfernung intensiverer Waschbedingungen (höhere Verweilzeit, Detergenzien, Temperatur) bedürfen (Zimmer et al., 2026, De Sommer et al., 2025).

Laborversuche zeigen, dass die verbleibende Restkontamination einer Kaltwäsche zwischen 10-15 mg CSB·g^{-1} beträgt.

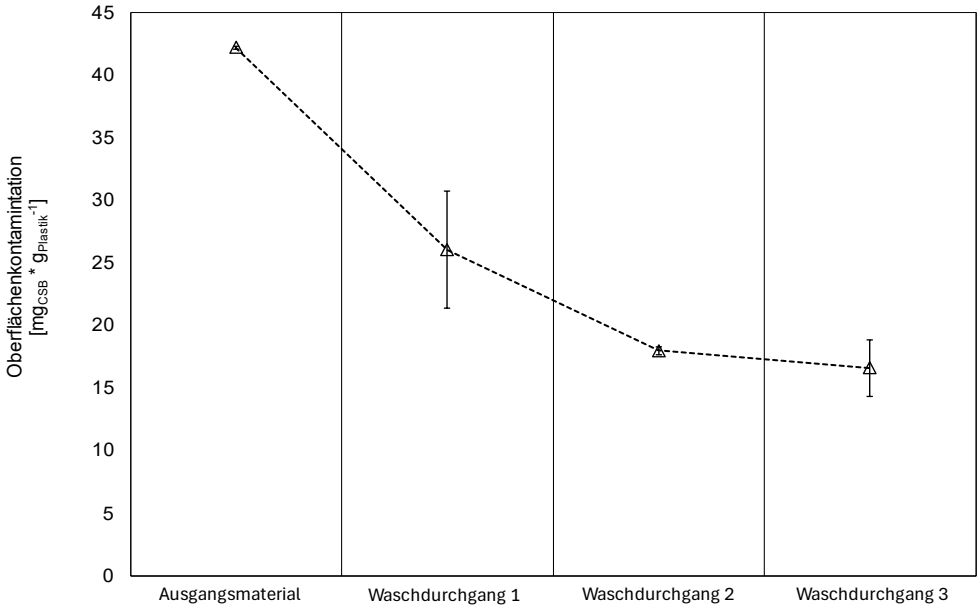


Abb. 3: Entwicklung der Oberflächenkontamination während mehrstufiger Friktionswäsche von PP Flakes bei W:P = 1 und 20 °C und einem Durchsatz von 2300 kg/h Kunststoffflakes.

3.3 Waschwasseraufbereitung und Wiederverwendung

Zur Bewertung der Wiederverwendung von Waschwasser wurden Frischwasser, verunreinigtes Prozesswasser sowie mittels Ultra- und Nanofiltration aufbereitetes Permeat hinsichtlich ihrer Reinigungsleistung verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt.

Unabhängig von der eingesetzten Wasserqualität wurde bereits nach dem ersten Waschdurchgang eine deutliche Reduktion der Oberflächenkontamination erreicht. Die Oberflächenkontamination des Ausgangsmaterials von 42,2 mg CSB·g^{-1} verringerte sich nach dem ersten Waschdurchgang auf etwa 26,0 mg CSB·g^{-1} bei Verwendung von Frischwasser, auf 21,3 mg CSB·g^{-1} bei Prozesswasser sowie auf 16,4 mg CSB·g^{-1} bei Verwendung von Permeat.

Auch nach mehreren Waschdurchgängen zeigte das aufbereitete Permeat die geringsten Restkontaminationen. Nach drei Waschdurchgängen wurde mit Permeat eine Oberflächenkontamination von rund 13 mg CSB·g^{-1} erreicht, während Frischwasser etwa 16,5 mg CSB·g^{-1} und Prozesswasser etwa 20,5 mg CSB·g^{-1} erzielte. Auffällig ist zudem, dass Prozesswasser trotz seiner höheren Belastung ebenfalls eine deutliche Reinigungswirkung zeigte. Dies könnte auf im Prozesswasser enthaltene oberflächenaktive oder dispergierende Inhaltsstoffe zurückzuführen sein, die das Ablösen von Verunreinigungen unterstützen.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass aufbereitetes Permeat sogar effektivere Reinigungsergebnisse als Frischwasser ermöglicht. Damit wird das Potenzial einer Kreislaufführung von Prozesswasser mit Hilfe von Membranelementen in Kunststoffwaschanlagen aufgezeigt, wodurch der Frischwasserbedarf und die Abwassermengen reduziert werden können.

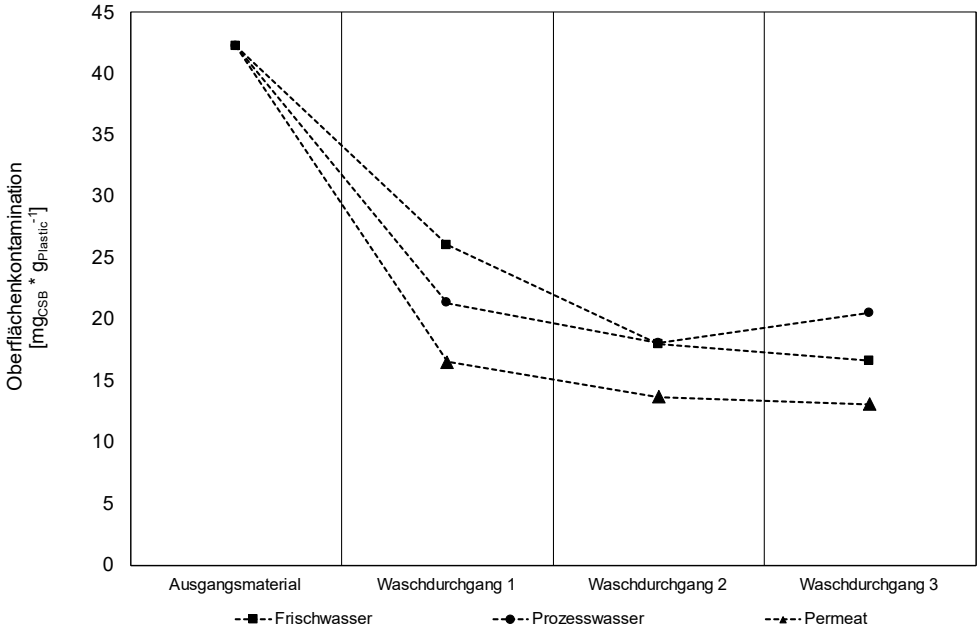


Abb. 4: Einfluss unterschiedlicher Waschwasserqualitäten (Frischwasser, Prozesswasser und mittels Ultra-/Nanofiltration aufbereitetes Permeat) auf die verbleibende Oberflächenkontamination von PP-Flakes über mehrere aufeinanderfolgende Waschdurchgänge im Friktionswäscher bei W:P=1 und einem Durchsatz von 2300 kg Flakes pro Stunde.

4 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Die durchgeführten Pilotversuche zeigen, dass die Friktionswäsche einen wirksamen Verfahrensschritt zur Entfernung von Oberflächenkontaminationen auf PP-Flakes darstellt. Bereits nach einer einzelnen Waschstufe konnten bei gering und stark verschmutzten Materialien CSB-Reduktionen von über 50 % erzielt werden. Die Untersuchungen des Wasser-Kunststoff-Verhältnisses und der Temperatur zeigen, dass ein Betrieb bei Umgebungstemperatur (20 °C) und einem Wasser-Kunststoff-Verhältnis von etwa 1,0 einen guten Kompromiss zwischen Reinigungsleistung sowie Wasser- und Energieeinsatz darstellt. Höhere Temperaturen oder größere Wassermengen führten lediglich zu begrenzten zusätzlichen Reinigungseffekten.

Die Ergebnisse der mehrstufigen Waschversuche zeigen, dass der überwiegende Anteil der entfernbaren Oberflächenkontamination bereits innerhalb von zwei bis drei Friktionswaschstufen entfernt wird. Dabei konnten Reduktionen der Oberflächenkontamination von bis zu 78 % erreicht werden. Zusätzliche Waschstufen führten nur zu geringen weiteren Verbesserungen.

Die integrierte Wasseraufbereitung mittels Ultrafiltration und Nanofiltration reduzierte die CSB-Konzentration des Waschwassers von 1816–5291 $mg \cdot L^{-1}$ auf 555–1056 $mg \cdot L^{-1}$ im Permeat und ermöglichte dessen Wiederverwendung in der Friktionswäsche. Die Ergebnisse verdeutlichen damit das Potenzial einer Kreislaufführung von Waschwasser zur Reduktion des Frischwasserbedarfs in Kunststoffrecyclinganlagen.

Zukünftige Arbeiten sollten die Langzeitstabilität der Wasseraufbereitung, die Auswirkungen einer mehrfachen Permeatwiederverwendung sowie die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere Kunststoffströme und Verschmutzungsarten untersuchen.

LITERATURVERZEICHNIS

Eriksen, M. K., Christiansen, J. D., Daugaard, A. E., & Astrup, T. F. (2019). Closing the loop for PET, PE and PP waste from households: Influence of material properties and product design for plastic recycling. *Waste Management*, *96*, 75–85. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.005

Hahladakis, J. N., & Iacovidou, E. (2018). Closing the loop on plastic packaging materials: What is quality and how does it affect their circularity? *Science of The Total Environment*, *630*, 1394–1400. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.330

Jeswani, H., Krüger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony, F., Hann, S., & Azapagic, A. (2021). Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. *Science of The Total Environment*, *769*, 144483. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483

Moritz, E., Müller, J., Schulz, J., & Rinderhofer, A. (2026, November 19). *Technologieoptimierte Nassaufbereitung im Kunststoffrecycling: Membranverfahren zur Kreislaufführung von Waschwasser*. Recy&DepoTech 2026.

Muster-Slawitsch, B., Pane, M., Quintana, A., Platzer, C., & Mager, M. (2024, November 14). *Optimierungsparameter bei der Nassaufbereitung von Kunststoff*. DepoTech, Leoben.

Pane, Mauricio, Plesch, T., Quintana, Arianna, Platzer, Christian, Mager, Moritz, Fischer, Jörg, & Muster-Slawitsch, Bettina. (under submission). A novel proposed quality parameter for evaluating flake cleanliness in plastic flake washing. *under submission*.

Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, *69*, 24–58. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044

Schyns, Z. O. G., & Shaver, M. P. (2021). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communications*, *42*(3), 2000415. https://doi.org/10.1002/marc.202000415

Vilaplana, F., & Karlsson, S. (2008). Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review. *Macromolecular Materials and Engineering*, *293*(4), 274–297. https://doi.org/10.1002/mame.200700393

Zimmer, S., Seifert, L., & Dahlmann, R. (2026). Deinking of Post-Consumer Waste Flakes—Objective Assessment of Ink Removal on Inhomogeneous Film Fractions. *Polymers*, *18*(6), 765. https://doi.org/10.3390/polym18060765

De Somer et al. (2025) "Controlling colorant staining during the de-inking of flexible plastic packaging", *Separation and Purification Technology*, 135234.
https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.135234

DANKSAGUNG

Die Autorinnen und Autoren danken der GAW technologies GmbH für die Bereitstellung der Pilotanlage zur Wasseraufbereitung, der Lindner Washtech GmbH für die Bereitstellung der Friktionswaschanlage sowie dem Team der LIT Factory der Johannes-Kepler-Universität Linz für die Betreuung und Unterstützung beim Betrieb der Pilotanlagen.

KONTAKT

DI Theresa Plesch
t.plesch@aee.at
+43 3112 5886 450xxx
Technologieentwicklung/Wissenschaftliche Mitarbeiterin
AEE INTEC
http://www.aee-intec.at

Technologieoptimierte Nassaufbereitung im Kunststoffrecycling: Membranverfahren zur Kreislaufführung von Waschwasser

Eva Moritz[1], Jürgen Müller[1], Jasmin Schluz[1] & Alexander Rinderhofer[2]
[1)] Osmo Membrane Systems GmbH, Leonberg, Deutschland
[2)] GAW technologies GmbH, Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Im Rahmen des FFG-Forschungsprojektes „circPlast-mr“ wurde ein membranbasiertes Verfahren zur Aufbereitung und Kreislaufführung von Kunststoffwaschwässern entwickelt. Durch die Kombination aus Vorfiltration, Ultrafiltration und Nanofiltration konnten Feststoffe, Mikroplastik sowie gelöste Verunreinigungen effizient entfernt werden. Nach erfolgreichen Laboruntersuchungen mit industriellen Waschwässern wurde das Verfahren in einer semi-industriellen Pilotanlage validiert. Die Versuche bestätigten die technische Machbarkeit und erzielten deutliche Reduktionen der organischen Belastung. Die robuste Membrantechnologie ermöglicht die Wiederverwendung von Prozesswasser und reduziert dadurch Frischwasserverbrauch, Chemikalienbedarf und Abwassermengen. Damit schaffen OSMO und GAW eine Grundlage für nachhaltige und wirtschaftliche Kreislaufprozesse im Kunststoffrecycling.

1 PROJEKTKONTEXT UND ZIELSETZUNG

Eine funktionierende Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe erfordert, neben effizienten Sortier- und Recyclingverfahren, insbesondere hochwertige Rezyklate. Die Waschprozesse von Kunststoffabfällen stellen dabei einen zentralen Prozessschritt im Recycling dar, sie dienen zur Dekontaminierung, Entfernung von Produkt- oder Lebensmittelresten, Ablösen von Etiketten und Klebern, teilweise Entfernen von löslichen Bestandteilen und von Druckfarben, Auswaschen von organischen Bestandteilen und Additiven etc. Die Waschprozesse beeinflussen somit maßgeblich die Produktqualität, benötigen gleichzeitig jedoch hohe Mengen an Wasser, Energie und Chemikalien. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des FFG-Forschungsprojektes „circPlast-mr“ die Entwicklung und Optimierung mechanischer Recyclingprozesse umfassend untersucht, wobei unter anderem die Kunststoffwäsche als zentraler Bestandteil der Nassaufbereitung im Fokus stand. Ziel war die Entwicklung einer skalierbaren Prozesskette, die eine hohe Rezyklatqualität mit reduziertem Ressourcenverbrauch verbindet. (JKU, 2026)

2 AUFGABENSTELLUNG

In der Nassaufbereitung von Kunststoffabfällen (vorwiegend postconsumer Verpackung) entstehen Prozesswässer, die im Betrieb kontinuierlich mit Feststoffen, Mikroplastik, organischen und gelösten Kontaminanten angereichert werden. In industriellen Recyclinganlagen werden diese Waschwässer mehrfach genutzt und durch konventionelle Verfahren wie Fällung, Flockung oder Flotation konditioniert. Erst bei stark verschlechterter Wasserqualität erfolgt ein vollständiger Austausch, wobei die Abwässer aufgrund ihrer Schmutzfracht nicht über kommunale Kläranlagen entsorgt werden können. Die zunehmende Kontamination des Waschmediums beeinträchtigt jedoch die Waschleistung und führt zu erhöhtem Chemikalien- und Frischwasserbedarf sowie steigenden Entsorgungskosten.

Als neuer, innovativer Ansatz wurden von OSMO membranbasierte Aufbereitungsverfahren konzipiert und untersucht, die sich im Vergleich zu konventionellen physikalisch-chemischen Verfahren durch einen deutlich reduzierten Chemikalieneinsatz, der Vermeidung zusätzlicher Schlammfrachten, einer hohen Stabilität der Produktwasserqualität sowie kompakt aufgebauten und modular skalierbaren Anlagenkonzepten auszeichnen. Im Fokus stehen mehrstufige Prozesskombinationen aus mechanischer Vorfiltration, Ultrafiltration zur Abtrennung kolloidaler und

partikulärer Verunreinigungen sowie Nanofiltration bzw. Umkehrosmose zur weitergehenden Entfernung gelöster Inhaltsstoffe und zur teilweisen oder vollständigen Entsalzung des Prozesswassers.

3 MACHBARKEITSSTUDIE MIT INDUSTRIELLEN WASCHWÄSSERN

Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeit lag auf der gezielten Auswahl geeigneter Membranen für die Aufbereitung industrieller Waschwässer. Durch das Know-how von OSMO im Bereich Filtrations- und Separationstechnik konnten Systeme und Membrane identifiziert werden, die hinsichtlich Robustheit, chemischer Beständigkeit, Reinigbarkeit und Trennleistung speziell für diese Anwendungen besonders geeignet sind.

In den Laborversuchen mit realen Prozesswässern aus industriellen Recyclingbetrieben konnten bereits vielversprechende Ergebnisse erzielt werden (Abb. 1). Neben ersten sehr positiven Betriebs- und Regenerierparametern konnten unter anderem hohe Abtrennleistungen gegenüber organischen Kontaminanten nachgewiesen werden. Besonders positiv zeigte sich zudem die Behandlung von Waschwasser mit erhöhtem pH-Wert bzw. Waschlaugenanteilen, welches erfolgreich filtriert werden konnten. Die Aufbereitung laugenhaltiger Prozesswässer ermöglicht die verlängerte Nutzung eingesetzter Waschchemie, was zusätzliche Potenziale zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs eröffnet.



Abb. 1 Links: Industrielles, gebrauchtes Waschwasser; Mitte: Filtrat nach Ultrafiltration; Rechts: Gereinigtes Waschwasser (Permeat) nach Nanofiltration

4 SEMI-INDUSTRIELLE VERSUCHE

Im Rahmen des Forschungsprojektes „circPlast-mr“, wurde an der LIT Factory der JKU Linz eine flexible Technikumsanlage installiert, die den mechanischen Recyclingprozess inkl. Wasser-/Abwasserkreislauf abbildet. Seitens GAW und OSMO wurden Pilotanlagen zur Waschwasser-Aufbereitung zur Verfügung gestellt, um die Kreislaufführung unter industrienahen Bedingungen zu validieren.





Abb. 2 Links: GAW Schrägsieb; Rechts: OSMO Ultrafiltrationsanlage „SINA“

Das Prozesswasser wurde zunächst über ein GAW-Schrägsieb (Abb. 2, links) vorbehandelt und anschließend mittels Ultrafiltration (Abb. 2, rechts) von ungelösten Verunreinigungen befreit. Speziell ausgewählte industrielle Tauchelemente kamen zum Einsatz, die sich durch hohe mechanische und chemische Stabilität, Temperaturbeständigkeit sowie gute Rückspülbarkeit auszeichnen. Die nachgeschaltete Nanofiltration ausgestattet mit industriellen Wickelelementen, entfernte zusätzlich gelöste organische und anorganische Belastungen (Abb. 3) Symbolbild großtechnische Anlage).


Abb. 3 Großtechnische OSMO Nanofiltration/Umkehrosmose Anlage

5 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der Pilotversuche zeigen bereits innerhalb des kurzen Betriebszeitraums eine deutliche Wirksamkeit der eingesetzten Membranverfahren. Sowohl bei der Ultrafiltration als auch bei der Nanofiltration konnten Flussleistungen und Betriebsdrücke in einem wirtschaftlichen Bereich erzielt werden. Durch einen langfristigen kontinuierlichen Betrieb ist zu erwarten, dass die Anlagenperformance zusätzlich optimiert und vertiefte Erkenntnisse zum Reinigungs-

verhalten sowie zur Langzeitstabilität gewonnen werden können. Bereits im bisherigen Betriebszeitraum konnte eine hohe Betriebsstabilität bei geringem Reinigungsbedarf nachgewiesen werden.
Im Rahmen der Untersuchungen wurden unterschiedliche Prozesswässer aus Waschversuchen mit variierenden Verschmutzungsgraden von Kunststoffflakes aufbereitet. Die Organik-Konzentrationen (CSB: Chemischer Sauerstoffbedarf) im Zulauf zur Membranstufe lagen dabei im Bereich von etwa 1.800 bis 5.300 mg/L (Abb. 4). Mittels Vorbehandlung und Ultrafiltration konnte bereits eine signifikante Reduktion der organischen Belastung von 39–73 % erreicht werden. Die nachgeschaltete Nanofiltration führte zu einer zusätzlichen Abtrennung von 20–50 % der verbleibenden organischen Fracht, sodass insgesamt eine Reduktion der organischen Kontaminanten um etwa 60–80 % erzielt wurde. Vergleichbare Untersuchungen mit industriellen Waschwässern verschiedener Recyclingpartner zeigten bereits im Labormaßstab CSB-Reduktionen im Bereich von 74–86 %, womit die Ergebnisse validiert werden konnten.

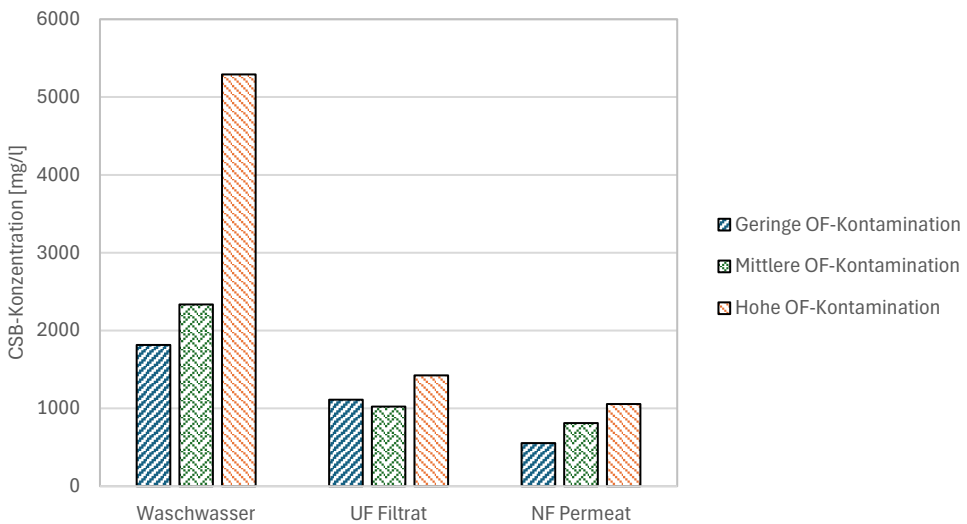


Abb. 4 CSB-Konzentrationen im Prozesswasser entlang der Wasseraufbereitung. Waschwasser, Ultrafiltrations-Filtrat und Nanofiltrations-Permeat für Prozesswässer aus Waschversuchen mit unterschiedlich stark kontaminierten Kunststoffflakes

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden u.a. mehrstufige Waschversuche seitens AEE INTEC im semi-industriellen Versuchsaufbau mit Friktionswäscher an der LIT Factory durchgeführt. Dabei wurde die Waschleistung unterschiedlicher Waschwässer (Frischwasser, verunreinigtes Prozesswasser und durch Ultra-/Nanofiltration aufbereitetes Waschwasser (Permeat) untersucht. Als messbarer Leistungsparameter wurde dafür die Oberflächenkontamination (CSB pro Gramm Kunststoff) herangezogen. Vergleiche zeigten, dass mit membrantechnisch-aufbereitetem Prozesswasser (Permeat) die effektivste Reinigungsleistung erzielt werden konnte (Abb. 5), was auf oberflächenaktive und reinigungsfördernden Restinhaltstoffe zurückzuführen sein könnte. (Muster-Slawitsch, 2024), (Plesch, 2026)

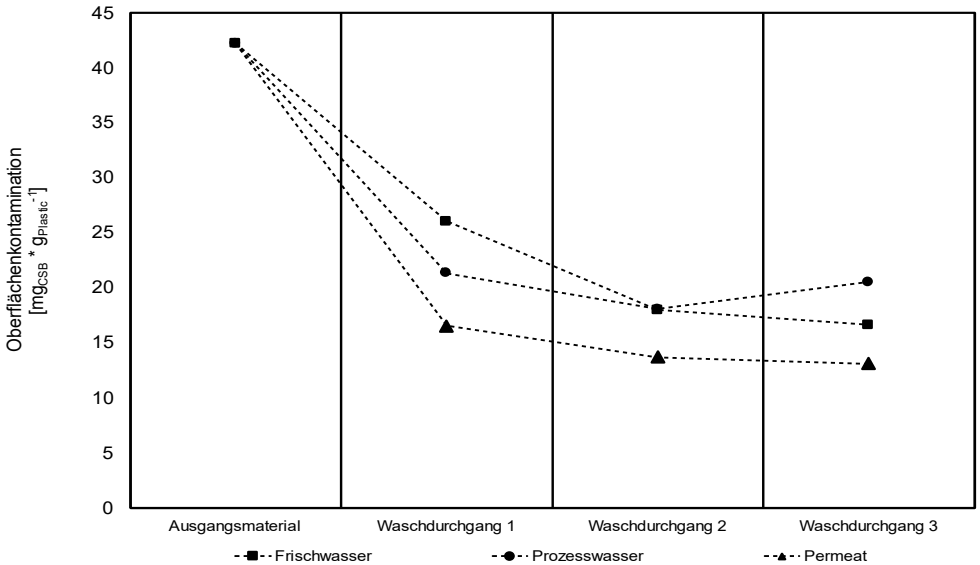


Abb. 5 Reinungunsleistung unterschiedlicher Waschwässer (Frischwasser, Prozesswasser, Permeat) gemessen anhand der verbleibenden Oberflächenkontamination (CSB pro Gramm Kunststoff) (Plesch, 2026)

6 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Die vorliegenden Arbeiten konnten erstmalig und in eindrucksvoller Weise das Potenzial membranbasierte Aufbereitungskonzepte für Prozesswasser aus dem Kunststoffrecycling erfolgreich nachweisen. Die von OSMO im Rahmen des Projektes entwickelte Prozessabfolge/Membrantechnologie wirkt durch nachstehende Effekte:

- Waschmedien können – durch kaskadierter Prozessführung- möglichst lange, mit positiver Rückwirkung auf die Reinigungseffizienz im Kreislauf gehalten werden
- Mit Chemikalien (z.B. NaOH) versetzte Waschmedien können aufbereitet und wiederverwendet werden
- Mikroplastik wird aus den Waschmedien gefiltert, bei Entsorgung durch kommunale Abwassersysteme entlastet das Klärwerke und Umwelt
- Reduktion des Sonderabfalls auf ein Minimum
- Geringerer Energieeinsatz durch Kreislaufführung

Die Ergebnisse eröffnen für OSMO ein neues Technologiefeld mit hoher industrieller Relevanz. Weiterführende F&E Aktivitäten richten sich nun auf die Möglichkeiten der Behandlung von nichtwasserbasierenden Waschmedien, bspw. organische Lösungsmittel, die im Kunststoffrecycling, aufgrund ihrer spezifischen Löslichkeit zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Die energieeffiziente Aufreinigung von organischen Lösungsmitteln die hinsichtlich ihrer Reinigungseffizienz hochattraktiv sind, vor allem im Hinblick auf Rezyklate für Food-contact, ist eine entscheidende Voraussetzung für eine wirtschaftliche Anwendung des "dissolution recyclings". (Plastic Recyclers Europe, 2025) (Rinderhofer, 2022) Auch für Prozesse zur Entfernung von Druckfarben von Kunststoffverpackungsfolien, dem sogenannten De-Inking, können Membranverfahren eine wesentliche Rolle spielen, indem Medien zur Entfernung der Druckfarben aufbereitet werden, im Kreislauf gefahren oder durch die Behandlung mittels Membranverfahren soweit vorgereinigt werden können, dass diese über kommunale Abwassersysteme entsorgbar sind. Für

derartige Anwendungen übernimmt OSMO, aufbauend auf den aktuellen Erkenntnissen und der Erfahrung aus einer Vielzahl ähnlich gelagerter Industrieprojekte, eine Vorreiterrolle.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Eva Moritz
e.moritz@osmo-membrane.de
+43 676 8870 4241
Projektentwicklung
Osmo Membrane Systems GmbH
www.osmo-membrane.de

LITERATURVERZEICHNIS

JKU (2026) www.jku.at. Abgerufen am 15. Juni 2026 von https://www.jku.at/linz-institute-of-technology/das-lit/mechanisches-recycling-von-kunststoffen-circplast-mr/arbeitspakete-ueberblick/

Muster-Slawitsch, B. (2024) Optimierungsparameter bei der Nassaufbereitung von Kunststoff-Flakes im mechanischen Kunststoffrecycling. Recy&DepoTech Konferenz.

Plastic Recyclers Europe, R. (Oktober 2025) www.plasticsrecyclers.eu. Abgerufen am 15. Juni 2026 von https://www.plasticsrecyclers.eu/wp-content/uploads/2025/10/PRE-White-paper-on-dissolution-recycling-technologies.pdf

Plesch, T. (2026) Friktionswäsche von PP-Flakes: Optimierung von Wasserverbrauch, Temperatur und Waschwasserreuse im Pilotmaßstab. Recy&DepoTech Konferenz.

Rinderhofer, A. (2022) Raffinierte Lösung für ein vielschichtiges Problem. Recy&DepoTech Konferenz.

Innovationen in der Praxis: Intelligente Anlagen und neue Stoffströme

Sabine Schlögl[1], Wolfgang Köser[2], Tom Schmitt[3], Bastian Küppers[4], Xiaozheng Chen[5] & Nils Kroell[5]
[1)] STADLER Anlagenbau GmbH, Vertrieb DACH, Graz, Österreich
[2)] STADLER Anlagenbau GmbH, Vertrieb DACH, Althausen, Deutschland
[3)] STADLER Anlagenbau GmbH, Vertrieb DACH, Leipzig, Deutschland
[4)] STADLER Anlagenbau GmbH, Verfahrenstechnik, Aachen, Deutschland
[5)] STADLER Anlagenbau GmbH, Digital Solutions, Althausen, Deutschland

KURZFASSUNG: Veränderte Stoffströme, neue regulatorische Anforderungen und dynamische Marktentwicklungen erhöhen den Innovationsbedarf der Kreislaufwirtschaft. STADLER begegnet diesen Entwicklungen mit kontinuierlicher anwendungsorientierter Forschung, sowie angepassten Anlagenkonzepten für Stoffströme wie beispielsweise Restmüll, Textilien, Batterien und Baurestmassen. Neben robuster Maschinen- und Fördertechnik gewinnt Digitalisierung zunehmend an Bedeutung. Intelligente Sortieranlagen reduzieren Personalbedarf, optimieren den Anlagenbetrieb und stellen konstante Produktqualitäten sicher. Gleichzeitig schaffen digitale Lösungen Transparenz über Anlagenzustände, Materialeigenschaften und relevante Einflussparameter im Betrieb. Mit STADLERconnect werden Maschinen- und Materialdaten für erhöhte Anlagenverfügbarkeit, adaptive Steuerung und Qualitätssicherung kombiniert. „Downtime Tracker“, „Blockage Detection“ und „Predictive Maintenance“ zeigen, wie Ursachen für Stillstände identifiziert und reduziert werden können. Die Auswertung von Sensordaten unterstützt zudem die Weiterentwicklung der Maschinentechnik. Dadurch lassen sich Betriebskosten senken, Wartungsmaßnahmen besser planen und Anlagen langfristig effizienter betreiben. Mit der Verbindung aus Anlagenbaukompetenz, Digitalisierung und Forschungsengagement schafft STADLER die Grundlage, um den Herausforderungen von „Future Waste“ erfolgreich zu begegnen.

1 NEUE STOFFSTRÖME ALS INNOVATIONSTREIBER

Die Abfallwirtschaft (heute als Teil der Kreislaufwirtschaft) ist seit jeher mit der Herausforderung konfrontiert, dass sich Stoffströme in Art und Beschaffenheit verändern. Das gilt bekanntermaßen für Fluktuationen über das Jahr hinweg, genauso wie für unterschiedliche Materialeigenschaften je nach Sammelregion. Darüber hinaus betrifft das aber auch die Auswirkungen des Konsumverhaltens verschiedener Generationen: Vor 20 Jahren waren beispielsweise Disketten, Videokassetten und Röhrenbildschirme relevante Abfälle, während aktuell im Kontext von Unterhaltungselektronik und Medientechnik vielmehr Tablets, Spielekonsolen und Smart-TVs relevant sind. Mit der Verschiebung der Konsumgüter verändern sich auch die Herausforderungen in den Sortieranlagen. Der Fokus verschiebt sich von Kassettenbändern, die in Anlagen durch Wickelungen Probleme verursachen, zu batteriebetriebenen Geräten, die durch die mechanische Belastung in Sortieranlagen eine akute Brandgefahr darstellen.
Teilweise werden die veränderten Abfalleigenschaften aber nicht ausschließlich durch Konsumänderungen getrieben, sondern entstehen primär durch Veränderungen in der Regulatorik. Dabei sind die Kriterien vielfältig: Vorgaben zur Energieeffizienz, Einschränkungen für den Einsatz von schwermetallhaltigen Produkten, Pfand-Regelungen oder auch konkrete Vorschriften zu Quoten für Sammlung und/oder Recycling von einzelnen Abfallgruppen. Besondere Bedeutung gewinnen auch EPR-Systeme (Extended Producer Responsibility), die die Hersteller in die (finanzielle) Verantwortung für die Nachnutzungsphase ziehen. Dies hat eine erhöhte wirtschaftliche Sicherheit für den Sekundärmarkt zur Folge, was wiederum ein Motor für Innovationen in diesen Sektoren ist. In der Vergangenheit konnte man dadurch eine massive Entwicklung in Hinblick auf den Stand der Technik im Bereich der Leichtverpackungen beobachten. Aktuelle EPR-Systeme betreffen darüber hinaus Textilien, Elektro- und Elektronikgeräte (WEEE), sowie

Batterien. Es ist daher zu erwarten, dass sich die Abfallwirtschaft in Hinblick auf diese Stoffströme in den nächsten Jahren stark entwickeln wird.
Die Herausforderung bei der Umsetzung von Projekten mit neuen Stoffströmen ist die Abwägung welche bewährten Technologien bei anderen Materialeigenschaften weiterhin geeignet sind und wo neue oder adaptierte Technologien eingesetzt werden müssen. Hierfür werden bei Bedarf Tests im industriellen Maßstab in unserem Technikum in Altshausen (Deutschland) und Krško (Slowenien) oder bei Zulieferern gemacht, um das Materialverhalten im Detail zu untersuchen.

1.1 Textilien

Im Kontext der Textilien wurden beispielsweise interne Tests mit NIR-Sensoren gemacht, die Dosierungseinheit optimiert, sowie die Fördertechnik angepasst. Informationen zu den Herausforderungen des Textilrecyclings aus der Perspektive der Anlagenplanung sind im Konferenzbeitrag von Annika Ludes nachzulesen (Ludes, 2026).

1.2 Batterien

Im April 2026 wurde eine der modernsten Batterie-Sortieranlagen für Haushaltsbatterien Europas in Ginsheim-Gustavsburg (Deutschland) von Saubermacher und Meinhardt Städtereinigung eröffnet (Siehe Abb.1). Die vollautomatisierte Anlage erreicht einen Durchsatz von überdurchschnittlichen 5 t/h und nutzt unter anderem mehrere Röntgensortiermaschinen. Das innovative Konzept ermöglicht dadurch eine Trennung nach Batterietypen und chemischer Zusammensetzung. Durch die erhöhte Brandgefahr beim Umgang mit Batterien wurde bei der Planung besonderes Augenmerkt auf die Auslegung und Ausführung von Aufgabe- und Übergabestellen gelegt, um eine schonende Handhabung der Batterien während des gesamten Prozesses sicherzustellen und Beschädigungen und potenzielle Sicherheitsrisiken zu vermeiden (STADLER, 2026a).



Abb. 1: Vollautomatisierte Batteriesortieranlage umgesetzt durch STADLER, weeeSwiss Technology AG, (eine spezialisierte Tochtergesellschaft der STADLER Group), sowie die METZEN Industries GmbH (verantwortlich für Recycling, Steuerungstechnik und CE-Konformität).

1.3 Baurestmassen

Auch im Bereich der Bau- und Abbruchabfälle werden die Vorgaben durch verschärfte Regulatorik angehoben. Beispiele hierfür sind das österreichische Deponierungsverbot von Gipsplatten (Recyclinggips-VO, 2025), die deutsche Mantelverordnung (MantelV, 2023) oder das französische EPR-System für Baumaterialien (Loi AGEC, 2020).


Abb. 2: Vollautomatische Sortierung von Baurestmassen

Bereits 2019 und 2021 wurden von STADLER in der Schweiz und in Finnland moderne Sortieranlagen für Baurestmassen gebaut, welche unter anderem Sortierroboter einsetzen. Im Jahr 2025 wurde für HEYDT in Deutschland eine vollautomatische Sortiereinheit als flexible, kompakte und gleichzeitig robuste Lösung umgesetzt (Siehe Abb. 2). Im Vergleich zur manuellen Sortierung ermöglicht dies auch in kleinerer Dimension eine konstant hohe Produktqualität bei deutlich höherem Durchsatz (STADLER, 2026b). Durch die regional starken Unterschiede in Anfallmengen von Baurestmassen bedarf es sowohl Lösungen für industrielle Großanlagen, sowie dezentraler, kompakter Lösungen. Um eine Langzeitnutzung der eingesetzten Anlagentechnik sicherzustellen, sind im Bereich der Baurestmassen konstruktive Anpassungen beispielsweise an der Fördertechnik erforderlich.

2 INNOVATIONEN ZUR STRATEGISCHEN KOMPETENZENTWICKLUNG

Die Globalisierung und der Fokus auf Kreislaufschließung haben die Abfallwirtschaft nicht nur in Hinblick auf Stoffströme, sondern auch in strategischer Hinsicht geprägt. Es ist ein Trend zu beobachten, dass Unternehmen von Playern in anderen Kompetenzbereichen aufgekauft oder strategische Allianzen gebildet werden. Das betrifft sowohl Start-Ups als auch etablierte Unternehmen. Als Folge ist es möglich, dass ein bisheriger Partner nun in einem kritischen Näheverhältnis zu Konkurrenzunternehmen steht. Durch diese veränderte Marktsituation, genauso wie durch die Beeinflussung von Technologieoffenheit in solchen strategischen Verbindungen, kann es erforderlich und/oder sinnvoll sein, dass andere Unternehmen der Abfallwirtschaft ihr Produktportfolio ausbauen und in-house Innovationen anstreben. Im Bereich des Anlagenbaus im Speziellen ist die Wahl der in-house Produkte auch stark von der jeweiligen lokalen Marktsituation geprägt. In den USA stellen Anlagenbauer beispielsweise oft eigene optische Sortierer her, während in Europa bislang spezialisierte Maschinenbauer dominierten und Anlagenbauer erst seit Kurzem zunehmend eigene Systeme fertigen. In den folgenden Jahren wird der Einfluss der asiatischen Stakeholder sicherlich ebenfalls Einfluss auf europäischer Abfalltechnikunternehmen haben.

3 WARUM SORTIERANLAGEN INTELLIGENTER WERDEN MÜSSEN

Neben Innovationen, die unmittelbar die Anlagentechnik betreffen, ist das Thema der „Intelligenten Anlagen“ in den letzten fünf Jahren in den Fokus von Anlagenbetreibern gerückt. Der tägliche Umgang mit Abfällen ist für viele Menschen schwierig, weshalb die Personalfluktuation in Sortieranlagen besonders hoch ist. Dadurch muss neues Personal regelmäßig neu angelernt werden, was wiederum den Betriebsablauf und – insbesondere bei falscher Bedienung – die Betriebskosten erheblich beeinflusst. Fehlende Erfahrung kann zu schlechter Wartung von Anlagenteilen oder einem nicht optimalen Anlagenbetrieb führen. Durch den Einsatz von Monitoring und Automatisierung kann der Personalbedarf, beispielsweise durch optische Sortiersysteme, reduziert werden. Gleichzeitig ermöglicht Automatisierung konstantere Produktqualitäten, da die

Performance nicht von der momentanen Verfassung eines Menschen abhängig ist. Um Abläufe effizienter zu gestalten und weniger Personal vor Ort zu benötigen, werden zunehmend Anforderungen an Remote-Steuerungen gestellt. Beispielsweise kann so in unseren Anlagen – von der Leitwarte oder mittels speziellen Tabletts – in der Software zur Anlagensteuerung (SCADA) gewählt werden, dass ein Verfahrband seine Position ändern soll, statt dies lokal am Band elektrisch über einen Knopf oder manuell durch Kurbeln ausführen zu müssen.
Neben Personaloptimierung und effizienten betrieblichen Abläufen ist die Nachfrage nach Transparenz ein weiterer wichtiger Grund für Digitalisierungsmaßnahmen. Anlagen sind oft „Black Boxen“, deren detaillierte Einflussparameter und Abläufe wenig bekannt sind. Durch das Sammeln von Daten versuchen Anlagenbetreiber relevante Einflussfaktoren zu identifizieren. Dazu zählen beispielweise Strom- und Motordaten, Vibrationsdaten, Materialeigenschaften (Farbe, Materialart, Größe, etc.), Bandbelegung/Volumenstrom und Anlagenlaufzeiten. Eine besondere Herausforderung ist, neben der Richtigkeit, auch die Vergleichbarkeit von Daten, die an verschiedenen Punkten der Anlage oder zu verschiedenen Zeiten, mit unbekannten Betriebs- und Umgebungsbedingungen aufgenommen wurden. So kann bei Reinigungs- oder Wartungsarbeiten ungewollt ein Vibrationssensor negativ beeinflusst werden, Reinigen oder Tauschen von Lichtquellen kann die Ergebnisse von optischen Sortierersystemen beeinflussen, oder es werden zufällige Auffälligkeiten von Anlagendaten als Kausalitäten statt als Korrelationen fehlinterpretiert.
Manche Anlagenbetreiber beurteilen externe Auswertungen von Anlagendaten als zu unsicher und versuchen daher eigene Systeme aufzubauen. Dies kann bei entsprechender Expertise gelingen, erfordert aber das kombinierte Fachwissen von Datenanalyse, Anlagentechnik und Anlagenbetrieb und einen enormen Zeitinvest. Statt möglichst viele Daten zu sammeln, sollten gezielt gewählte Indikationsparameter für Monitoring oder Anlagensteuerung herangezogen werden. Insbesondere im populären Bereich der Inputanalyse stoßen Sensoren durch hohe Bandbelegungen an ihre Grenzen, was nur durch eine bewusste Kombination anderer Informationen ausgeglichen werden kann.

4 DIGITALISIERUNG IN DER PRAXIS

Die Digitalisierungslösungen von STADLER kombinieren Maschinen- und Materialdaten zur Steigerung der Anlagenverfügbarkeit, für adaptive Anlagensteuerung und im Hinblick auf das Monitoring von Stoffstromeigenschaften für Transparenz und Qualitätssicherung.

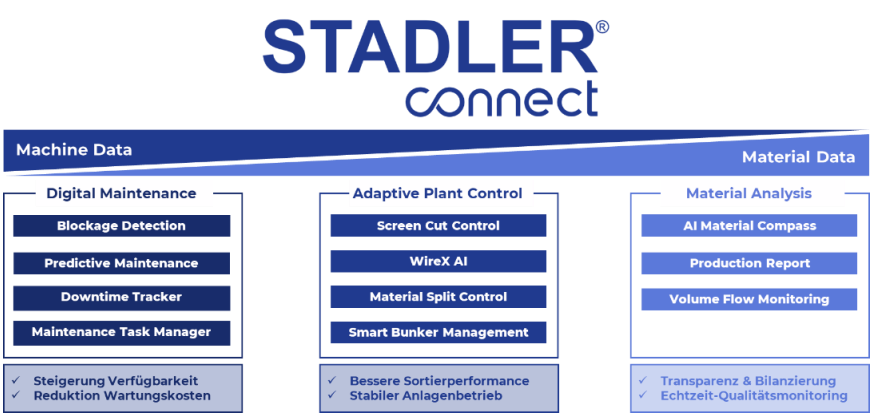


Abb. 3: Digitale Lösungen von STADLER ("STADLERconnect")

Adaptive Anlagensteuerung und Materialanalyse (z.B. Chen et al. 2023, Kroell et al. 2024, Küppers et al. 2025, Schlögl et al. 2024, Schlögl et al. 2026) sind wichtige Themen, die in anderen Publikationen bzw. Patenten nachgelesen werden können. Ein Trend der jüngeren Zeit betrifft

darüber hinaus konkrete Maßnahmen zur Steigerung der Anlagenverfügbarkeit. Eine Umfrage unter Anlagenbetreibern hat ergeben, dass in Anlagen mit >100 Förderern durchschnittlich 3– 4 Schadensereignisse jährlich auftreten, die eine Stillstandszeit von jeweils mindestens 4h verursachen. Dies entspricht laut Angaben der Anlagenbetreiber bis zu sechsstelligen Eurobeträgen. Mit dem Downtime-Tracker können die Hauptursachen von Stillständen in der Anlage über lange Zeiträume hinweg erfasst werden, wodurch relevante Handlungsfelder identifiziert werden können. Die Analyse aus zwei Beispielanlagen zeigt, dass 40 – 77% aller Stillstände durch Blockaden verursacht werden (Vgl. Abb. 4), weshalb wir dafür ein eigenes Tool („Blockage Detection“) entwickelt haben, mit dem sich gerade erst bildende Blockaden erfasst und gemeldet werden.

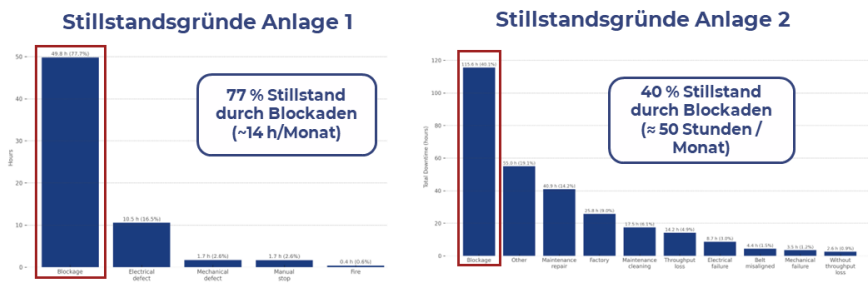


Abb. 4: Stillstandsgründe geordnet nach monatlicher Ausfallzeit zweier Beispielanlagen.

Neben Blockaden sind Schadensfälle und daraus resultierende Wartungsarbeiten ein weiterer relevanter Grund für Anlagenstillstände, wobei die Wartungskompetenz, also wie regelmäßig und gründlich proaktiv agiert wird, sehr unterschiedlich ist. Durch den Einsatz von Vibrations- und Temperatursensoren können ungewöhnliche Abweichungen an Maschinen frühzeitig erkannt werden. Wartungsarbeiten werden so planbar, zielgerichtet und nach realem Bedarf durchgeführt. Das führt dazu, dass Bauteile länger halten, da das späte Erkennen von Problemen bei vielen Maschinen zu Folgeschäden führen kann. So kann eine defekte Welle an einem Ballistikseparator beispielsweise in weiterer Folge auch zu Schäden an den Paddeln führen. Außerdem können Anlagenstillstände reduziert werden, indem Wartungsarbeiten aggregiert durchgeführt werden. In Abb. 5 sind exemplarisch zwei Fälle dargestellt, in denen das System Probleme erkannt und diese durch die passenden Maßnahmen zeitnah behoben werden konnten.
Durch die Analyse der Sensordaten, bei der höchste Standards für Datensicherheit beachtet werden, besteht auch das Potenzial zur Optimierung der Maschinentechnik. Diese Feedbackschleife fehlt häufig, weil Betreiber Reparaturen oft selbst durchführen, ohne dies Maschinen- oder Anlagenbauern rückzumelden. Durch die statistische Erfassung sind gezielte Innovationen in der Maschinentechnik möglich, was wiederum zu einer weiteren Verringerung der Stillstandszeiten führt.

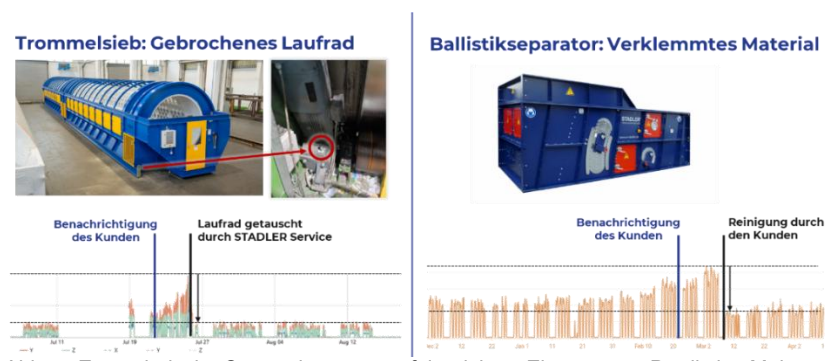


Abb. 5: Exemplarische Sensordaten von erfolgreichem Einsatz von „Predictive Maintanance“.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Gründe für Innovationen sind vielfältig, neben sich verändernden Abfallströmen und dynamischen Marktsituationen besteht aktuell ein besonderer Bedarf im Bereich der Digitalisierung von Anlagen. Dadurch wird es im Zuge von Materialdatenanalysen möglich Einflussparameter und Abläufe transparent zu machen, sich dem optimalen Betriebspunkt der Anlage durch adaptive Anlagensteuerung anzunähern und die Anlagenverfügbarkeit durch „Predictive Maintainance“ zu maximieren. Als Folge aller dieser Ansätze reduzieren sich Betriebskosten durch Reduktion von Pönalen wegen stabiler Produktqualitäten, Personaleinsparungen, reduzierter Wartungskosten und weniger Stillstandszeiten.
Neben den bewährten Kompetenzen im Bereich Anlagenplanung, Maschinenbau, Elektro- und Automatisierungstechnik, sowie Montage und Inbetriebnahme wird STADLER daher den Fokus auch weiterhin auf Digitalisierung setzen. Dieses gebündelte Know-how, ergänzt durch das kontinuierliche Engagement in Forschungsprojekten, bildet die Grundlage, um den Herausforderungen von „Future Waste“ erfolgreich zu begegnen.

LITERATURVERZEICHNIS

Chen et al. (2023) Improving drum sieve performance in lightweight packaging waste recycling by automatic parameter adjustment through 3D laser triangulation-based process monitoring. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106924

Kroell et al. (2023) Near-infrared-based determination of mass-based material flow compositions in mechanical recycling of post-consumer plastics: Technical feasibility enables novel applications. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106873

Kroell et al. (2024) Near-infrared-based quality control of plastic pre-concentrates in lightweight-packaging waste sorting plants. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107256

Küppers B. et al (2025) *Adaptive Ballistikseparatorsteuerung* (DE 10 2025 125 551.7), Deutsches Patent- und Markenamt.

LOI AGEC (2020) *Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire [Gesetz Nr. 2020-105 zur Bekämpfung der Verschwendung und zur Förderung der Kreislaufwirtschaft (Loi AGEC)]*. Online: https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041553759/

LUDES, A. (2026) Warum Textilsortierung so kompliziert ist?. Tagungsbandbeitrag Recy- und Deptotech 2026. Leoben, Österreich.

MANTELV (2023) *Mantelverordnung*. BGBl. I 2021, S. 2598, in Kraft seit 01.08.2023. Online: https://www.gesetze-im-internet.de/ersatzbaustoffvev_bbodschvneuf_depv2009ua_ndv

RecyclinggipsVO (2025) *Recyclinggips-Verordnung. BGBl. II Nr. 415/2024, geltende Fassung ab 01.01.2025*. Online: https://www.ris.bka.gv.at/eli/bgbl/II/2024/415

Schlögl et al. (2024) Developing a prediction model in a lightweight packaging waste sorting plant using sensor-based sorting data combined with data of external near-infrared and LiDAR sensors. https://doi.org/10.1177/0734242x241237184

Schlögl et al (2026) Beyond sorting: using sensor-based sorter data for real-time throughput and composition monitoring. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108570

STADLER (2026a) STADLER, weeeSwiss and Saubermacher mark the launch of one of Europe’s most advanced household battery sorting facilities. ONLINE: *https://w-stadler.de/unternehmen/default-title/detail/stadler-weeeswiss-and-saubermacher-mark-the-launch-of-one-of-europes-most-advanced-household-battery-sorting-facilities*

STADLER (2026b) C&D waste sorting done right. ONLINE: *https://www.linkedin.com/posts/stadler-sorting_stadlergroup-heydt-constructiondemolitionwaste-activity-7460280196798021632-eZgS*

KONTAKT

Dipl.-Ing. Sabine Schlögl
sabine.schloegl@w-stadler.de
Anlagenplanung und Vertrieb (DACH)
STADLER Anlagenbau GmbH
https://w-stadler.de/

Rückgewinnung von Glas aus Restmüllverbrennungsaschen für die Verpackungsglasindustrie

Christoph Schipfer[1], Gerhard Stockinger[1] & Benedikt Sonnweber[1]
[1]) Brantner green solutions, F&E, Krems, Österreich

KURZFASSUNG: Glas, das im Restmüll landet, bleibt bei der Verbrennung in Wirbelschichtöfen lose in der Asche zurück. Die Ascheaufbereitungsanlage der Firma Brantner hat bisher eine mit Glas angereicherte Fraktion produziert.
Der Artikel befasst sich mit der Erfindung und dem Betrieb einer weltweit einzigartigen und neuartigen Anlage, welche die ursprüngliche mit Glas angereicherte Fraktion auf eine Reinheit von 99,999% Glasanteil aufbereitet.
Damit werden die Qualitätsanforderungen der Behälterglaskunden erreicht und die Wiederverwendung als Glasrohstoff ist gegeben. Der bisher deponierte Glasanteil der Asche wird somit wieder in den Kreislauf zurückgebracht und die Glasrecyclingquote erhöht.

1 AUSGANGSSITUATION

Die Sammelquote von Altglas in Österreich beträgt zwischen 80 und 85% (Austria Glas Recycling GmbH, 2026). Das restliche Glas landet großteils im Restmüll. Im städtischen Bereich ist die Sammelquote bedeutend niedriger. So liegt der Erfassungsgrad in Wien im Weißglas bei nur 45% (Magistratsabteilung 48, 2023).

Wenn Glas im Restmüll in Müllverbrennungsanlagen verbrannt wird, hängt es davon ab, mit welcher Technologie das geschieht. Während in Rostfeuerungsanlagen bei Temperaturen von ca. 900°C das Glas verschlackt, bleibt das Glas in Wirbelschichtanlagen als solches intakt, da die Erweichungstemperatur von Glas nicht überschritten wird. Bettaschen aus Wirbelschichtfeuerungen bestehen bis zu 30% aus Glas (Mühl, 2025).

Brantner green solutions betreibt seit ca. 15 Jahren eine selbst entwickelte Nassaschenaufbereitungsanlage für Rost- und Wirbelschichtbettaschen. Nach der Abtrennung der Metalle wird Glas optisch aussortiert und es bleibt eine mineralische Fraktion bestehend aus Schlackestücken, Steinen, Ziegel und Fliesen. Diese mineralische Fraktion wird in der Baustoffindustrie als alternativer Rohstoff verwendet.

Die Glasfraktion besteht aus ca. 90-93% Glas, 7-10% KSP (Keramik-Steine-Porzellan) und ca. 0,5% Restmetallen.

Diese Fraktion findet jedoch keinen Kunden, da der Glasgehalt zu niedrig ist. Andere Aschenaufbereiter trennen das Glas mit einer Reinheit von ca. 97-98% Glasanteil ab und finden damit Abnehmer in der Schaumglasindustrie. Hier besteht aber der erhebliche Nachteil, dass dieser Weg eine kreislaufwirtschaftliche Sackgasse ist und keine Kreislaufführung ermöglicht.

Der Anspruch von Brantner green solutions ist es, Kreisläufe zu schließen. Logischerweise entstand daher die Idee, die vorhandene Glasfraktion zu einem für die Behälterglasindustrie geeigneten wannenfertigen Rohstoff aufzubereiten.

Als Basis dienten zahlreiche Untersuchungen zur Aschzusammensetzung von Seiten des CD-Labors für recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, an dem Brantner seit 2021 beteiligt ist.

Das Glas der Müllverbrennungsaschen hat einen Überhang an Weißglas mit einem Anteil von ca. 2/3. Der Rest ist grün und braun in gleicher Verteilung. Analysen der MA48 in Wien zeigen, dass vom Glas im Restmüll nur 7% nicht Behälterglas und 93% Behälterglas sind.

2 VERFAHRENSKONZEPT UND ANLAGENBAU

2.1. Kundenanforderungen

Die Anforderungen der Behälterglashersteller sind sehr hoch.

Die Vorgaben für Verunreinigungen sind im ppm Bereich. Metalle im einstelligen ppm Bereich, bei KSP kleiner 20ppm und Bleiglas kleiner 200ppm (Bundesverband Glasindustrie e.V et al., 2014). Die Anforderungen für organische Verunreinigungen sind kein Problem, da das Material durch die Verbrennung organikfrei ist.

2.2. Technikumsversuche und Rohgutanalyse

Basierend auf dem Wissen des CD-Labors wurden in Technika mehrerer Anlagenhersteller Sortierversuche durchgeführt. Dabei lag der besondere Fokus auf jenen Verunreinigungen, die in normalem Altglas nicht vorkommen. Es sind dies Bleiglas in ungewöhnlich hohen Mengen, Ceranfelder, Metalldrähte und natürliche Steine.

In den Technikumsversuchen wurden verschiedene grundlegende Verfahrenskonzepte abgebildet. Neben der Abtrennung der Fremdkörper galt es auch die verschiedenen Farben entsprechend der Kundenanforderung herzustellen.

Der meiste Aufwand bestand in der wochenlangen händischen Auszählarbeit aller Fraktionen aus den Technikumsversuchen. Immer wieder wurde das Verfahrenskonzept iterativ adaptiert. Es galt die Schnittmenge zwischen Kundenanforderungen, der technische Machbarkeit und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Marktpreis, Abschreibung, Betriebskosten) zu finden.

2.3. Maschinenpark

Es zeigte sich, dass die Anforderungen nur mit einer Röntgensortierung und einer mehrstufigen optischen Sortierung in Kombination mit weiteren Abtrenneinheiten erreicht werden können.

2.4. Entwicklung einer KI basierten Qualitätssicherungseinheit

In der Altglasaufbereitung werden Proben händisch ausgezählt. Um diese mühsame Arbeit zu vermeiden, wurde eine auf der Brantner HawkEye Technologie basierende, mit Handykameras ausgestattete automatische Qualitätssicherungseinheit erfunden und implementiert. Diese erkennt Glasscherben und Fremdkörper automatisch und gibt Rückmeldungen an die Anlagensteuerung. Dadurch kann die Anlage autonom betrieben werden.

2.5. Errichtung der Anlage

Die Anlage wurde im Zeitraum von April bis September 2025 am Standort Hohenruppersdorf in einer bestehenden Halle errichtet. Nach einer Inbetriebnahmephase von ca. vier Wochen ist die Anlage seit November 2025 im Betrieb.

Entsprechend ihres Rohstoffes trägt die Anlage den Namen „Glasy“.

3 ERFAHRUNGEN IM BETRIEB

Es zeigt sich, dass die Anlage die Vorgaben der Kunden erfüllt und die Glasfraktion von ca. 90% Glasanteil auf eine Reinheit von 99,999% Glasanteil aufbereitet. Es entstehen die Farben Weiß, Grün und Braun.

KSP und Metalle werden gesichert abgetrennt. Wenn Verunreinigungen auftreten, so handelt es sich um kleinste, dünne Metalldrähte. Hier wurde durch Schmelzversuche nachgewiesen, dass diese in der Glasschmelze in Lösung gehen. Der Bleigehalt beim Weißglas liegt durch die Kombination mehrerer verschiedener Verfahren bei niedrigen Werten von unter 100ppm.

Die Anlage läuft in der Nacht und am Wochenende autonom.

Von Glas aus der Aufgabe werden ca. 80-85% ins Produkt überführt. Sortierreste werden an Schaumglashersteller geliefert und der KSP-Abfall wird der unter 1. genannten mineralischen Fraktion für die Bauindustrie zugeführt. Somit hat die Anlage keine unverwertbare Fraktion.

Die Anlage wurde durch das CD-Labor einer Bilanzierung unterzogen (Reyna et al., 2026).

4 ABFALLENDE

Das Fertiggut der Anlage ist kein Abfall mehr, sondern ein Produkt. Dies wurde per Feststellungsbescheid entschieden. Es existiert eine EU-weite Abfallendeverordnung für Glas (Verordnung (EU) Nr. 1179/2012). Allerdings gilt diese nicht für Glas aus der Restmüllsammlung.

5 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Mit der Brantner Glasy Anlage ist es weltweit erstmalig gelungen, Glas aus der Restmüllverbrennung auf Behälterglasqualität aufzubereiten. Das fertige Produkt kann direkt in den Glasschmelzwannen eingesetzt werden. Die Rückmeldung der Kunden ist sehr positiv. Ein weiterer Stoffkreislauf konnte geschlossen werden.

Die Anlage kann helfen die Recyclingquote bei Behälterglas zu steigern, sofern der Restmüll in Wirbelschichtöfen verbrannt wird. Insbesondere im städtischen Bereich können so Recyclingquoten massiv gesteigert werden. Die Stadt Linz geht hier mit positivem Beispiel durch die Zusammenarbeit mit dem CD-Labor und Brantner green solutions voran.

Die Anrechnung der zurückgewonnen Glasmenge zur Glasrecyclingquote ist noch ungeklärt, da diese Technologie nun erstmalig zur Verfügung steht.

LITERATURVERZEICHNIS

Austria Glas Recycling GmbH. (2026). *Fakten rund um Glasrecycling*. https://www.agr.at/glasrecycling/fakten-rund-um-glasrecycling

Bundesverband Glasindustrie e.V, BDE Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V, & bvse-Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (2014). *Leitlinie „Qualitätsanforderungen an Glasscherben zum Einsatz in der Behälterglasindustrie": Standardblatt T 120*. https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/03-Themen_Ereignisse/FV _Glas/Standardblatt_ T _ 120_2014-08-14_2.pdf

Verordnung (EU) Nr. 1179/2012 der Kommission vom 10. Dezember 2012 mit Kriterien zur Festlegung, wann bestimmte Arten von Bruchglas gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates nicht mehr als Abfall anzusehen sind. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32012R1179

Magistratsabteilung 48. (2023). *Wiener Abfallwirtschaftsplan und Wiener Abfallvermeidungsprogramm (Planungsperiode 2025-2030): Anhang I: Ist-Zustand der Wiener Abfallwirtschaft.*

Mühl, J. (2025). *Assessment of Recovery and Utilization Options of Recyclable Components from Waste Incineration Bottom Ash* [, TU Wien]. DataCite.

Reyna, C. R., Mika, S., & Schipfer, C. (2026). Glasrückgewinnung aus Bettaschen: Bilanzierung einer Aufbereitungsanlage. https://drive.boku.ac.at/d/b84a54b734a04520945f/files/?p=%2F20_AWT26_Glasr%C3%BCckgewinnung%20aus%20Bettaschen.pdf

From Pilot-Scale Insights to Plant-Level Validation: Factors Influencing Ballistic Separator Performance

Alena Maria Spies[1], Annika Datko[1], Peter Bardenheuer[1], Abtin Maghmoumi[1], Karoline Raulf[1] & Kathrin Greiff[1]
[1)] Chair of Anthropogenic Material Cycles (ANTS), RWTH Aachen University, Aachen, Germany

ABSTRACT: Controlling the rotational speed of ballistic separators provides a potential approach for responding to changes in material composition and throughput in LWP sorting plants. Therefore, this study first investigates the influence of throughput and film content in the input on process performance in large-scale technical trials and subsequently validates the results in an operational LWP sorting plant. Trends observed at the technical-center scale were successfully reproduced at the plant scale. The results further show that rotational speed is a suitable operating parameter for influencing separator performance under varying input conditions. In the long term, these findings may support the development of adaptive operating strategies for ballistic separators.

1 INTRODUCTION

The implementation of legislative frameworks, such as Regulation (EU) 2025/40 on packaging and packaging waste (PPWR) and the Verpackungsrechts-Durchführungsgesetz in Germany (VerpackDG), poses new challenges for the packaging recycling industry. Used household packaging is often collected separately as lightweight packaging waste (LWP) and subsequently sent to LWP sorting plants. To comply with the specified requirements, the sorting depth of LWP sorting plants needs to be further increased. A relevant process optimization measure is the (pre)conditioning (Küppers et al., 2022). Ballistic separators play a key role in LWP conditioning by separating materials based on their physical properties (Küppers et al., 2022). The material is kept in continuous motion by inclined, oscillating paddles (Kranert, 2024). Differences in movement behavior result in the separation of two main product streams: flat materials (2D product stream, e.g., films and paper) and dimensionally stable, cubic objects (3D product stream, e.g., bottles and cups) (Kranert, 2024). Large-scale technical trials have already shown that process performance is strongly influenced by machine parameters such as rotational speed, paddle angle, and paddle type, as well as by material composition (Lasch et al., 2025; Spies et al., 2026; Spies et al., 2024).

In LWP sorting plants, ballistic separators are typically operated with fixed settings, so that the rotational speed of the paddles remains the same despite variations in material composition or throughput. As a result, changes in the input composition or fluctuations in throughput may increase the amount of films incorrectly discharged into the 3D product stream or lead to losses of 3D materials into the 2D product stream. Both effects reduce process performance and may also cause problems in downstream processing steps. In addition, there is a fundamental trade-off: higher purity is usually associated with material losses, whereas maximizing yield tends to reduce product quality. Adjusting the rotational speed could enable adaptive process control of ballistic separators (Küppers et al., 2025) and help identify an optimal balance between purity and yield (Spies et al., 2026). These optimizations are becoming increasingly important, given the growing requirements imposed by various legislative frameworks. Therefore, this study investigates whether changes in material composition, particularly changes in the film content, and variations in throughput can be addressed by adjusting the rotational speed of ballistic separators. For this purpose, large-scale technical trials were first conducted, and the results were subsequently validated in an operational LWP sorting plant.

2 MATERIAL UND METHODS

For both experimental series, ballistic separators type STT2000 from STADLER Anlagenbau GmbH (2026) were used, and process performance was evaluated using sensor-based process monitoring (SBPM). A methodical overview of the two experimental series is given in Figure 1. In addition to the differences in the experimental and data-acquisition setup described below, the large-scale technical trials were conducted using paddles with 45-mm mesh openings, whereas the ballistic separators in the operational plant were equipped with closed paddles. Previous studies have shown that paddle type can influence process performance (Spies et al., 2026).

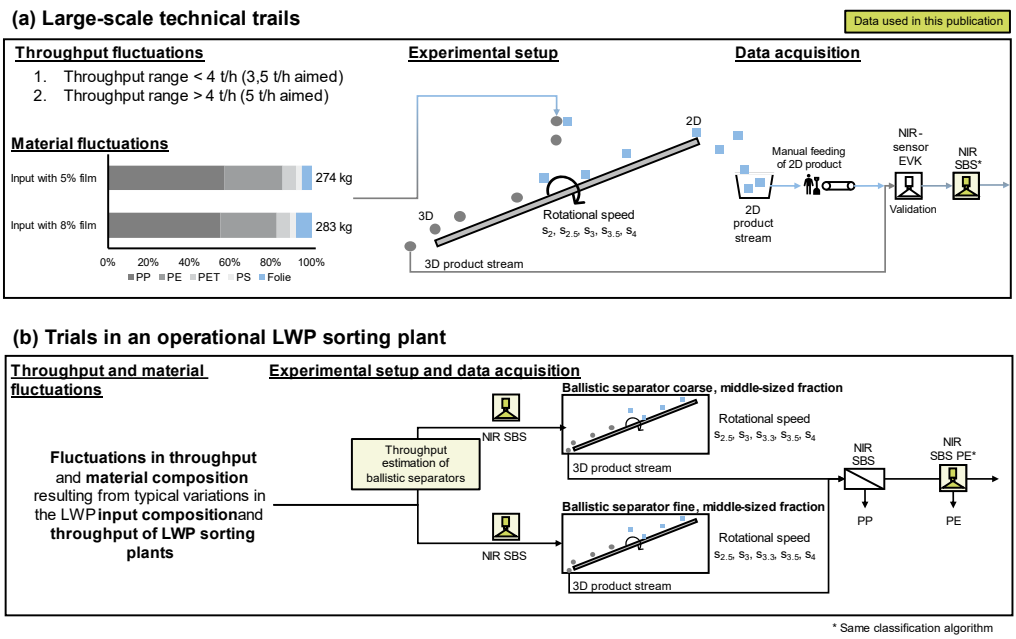


Fig. 1: Methodological overview of the trials investigating the influence of material composition and throughput fluctuations on the process performance of ballistic separators: (a) large-scale technical trials and (b) trials in an operational LWP sorting plant.

2.1 Large-Scale Technical Trials

First, trials were conducted at the technical center of STADLER Anlagenbau GmbH to investigate the effects of film content in the input and different throughputs on purity and yield of the 2D and 3D product streams. Therefore, LWP material mixtures with two film contents (5% and 8%) were prepared, and experiments were conducted within two throughput ranges (< 4 t/h and > 4 t/h). The material composition of the 2D and 3D product streams was analyzed after the trials using near-infrared (NIR) sensors (hyperspectral imaging cameras in the near-infrared range). Both output streams were passed through the same inline NIR sensor-based sorters (SBS) and additionally validated using data from a separate NIR sensor (EVK Kerschhaggl GmbH). The data from the SBS were used because its classifier distinguished PE films from rigid PE materials, and a sensor with the same classification algorithm was used during the plant trials. Based on the data from the SBS, area-based purities (cf. Equations (1) and (2)) and yields (cf. Equations (3) and (4)) were calculated. For this purpose, the area flows of 2D and 3D materials in the 2D and 3D product streams $\dot{A}_{2D/3D,2D/3D\text{-product}}$ the area flows of the 2D and 3D product streams $\dot{A}_{2D/3D\text{-product}}$, and the total areas of all 2D and 3D materials $\dot{A}_{2D/3D\text{-total}}$ were used.

$$P_{a,\mathrm{2D,2D-product}} = \frac{\dot{A}_{\mathrm{2D,2D-product}}}{\dot{A}_{\mathrm{2D-product}}} \quad (1)$$

$$P_{a,3D,3D-product} = \frac{\dot{A}_{3D,3D-product}}{\dot{A}_{3D-product}} \quad (2)$$

$$Y_{a,\mathrm{2D,2D-product}} = \frac{\dot{A}_{\mathrm{2D,2D-product}}}{\dot{A}_{\mathrm{2D-total}}} \quad (3)$$

$$Y_{a,3D,3D-product} = \frac{\dot{A}_{3D,3D-product}}{\dot{A}_{3D-total}} \quad (4)$$

2.2 Trials in an Operational LWP Sorting Plant

The results were subsequently validated in an operational LWP sorting plant. The observed fluctuations resulted from typical variations in plant input and throughput. Two ballistic separators at the beginning of the NIR cascade, downstream of two SBS for plastic separation (NIR rougher), were investigated (cf. also Figure 1). The ballistic separators, therefore, process the coarse, middle-sized, and fine, middle-sized plastic fractions, respectively. The 2D and 3D product streams from both separators are subsequently recombined. Inline NIR SBS were used for data acquisition. First, data from the two upstream SBS were used to estimate the throughput fed to the ballistic separators. In addition, data from the SBS in the recombined 3D product stream were evaluated. However, before reaching the evaluation point, the 3D product stream first passed through an NIR SBS to remove PP. The data from the subsequent NIR SBS (PE) were then used for the analysis, as this sensor applied the same classification algorithm as in the previous large-scale technical trials. Thus, the purity of the 3D product stream (cf. Equation (2)) from the ballistic separators was assessed only indirectly. Moreover, slightly adjusted rotational speeds were tested in the LWP sorting plant compared to the large technical trials to avoid disrupting plant operation.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Large-Scale Technical Trials

The results of the large-scale technical trials are presented in Figure 2 and demonstrate the effect of rotational speed on the ballistic separator's process performance. As the rotational speed increases, the purity of the 3D product stream slightly increases, while its yield decreases. For the 2D product stream, the opposite trend is observed. This confirms the fundamental trade-off between product purity and yield and is consistent with previous experimental findings (Lasch et al., 2025; Spies et al., 2026).

The investigated process indicators do not show a linear trend, but rather exhibit asymptotic behavior, approaching a limiting range from medium rotational speeds onwards. Further increases in rotational speeds lead to only minor changes in process performance. This is also consistent with existing results (Spies et al., 2026). However, at a film content of 8%, this asymptotic behavior can already be observed from a rotational speed of s2.5, whereas at a film content of 5%, it partly occurs from a rotational speed of s3. Within the investigated parameter range, the results show only a minor influence of changes in throughput on the ballistic separators' process performance, despite substantial variations in target throughput (3.5 t/h vs. 5 t/h). The influence of the different throughputs was slightly more pronounced at lower rotational speeds (up to approx. $s_{2.5}$

and s_3). However, the film content proved to be a significant influencing factor. An increase in film content led to decreases in both 3D purity and 3D yield. Thus, material composition influenced process performance, particularly the 3D yield in the 3D product stream, partly stronger than moderate changes in rotational speed.

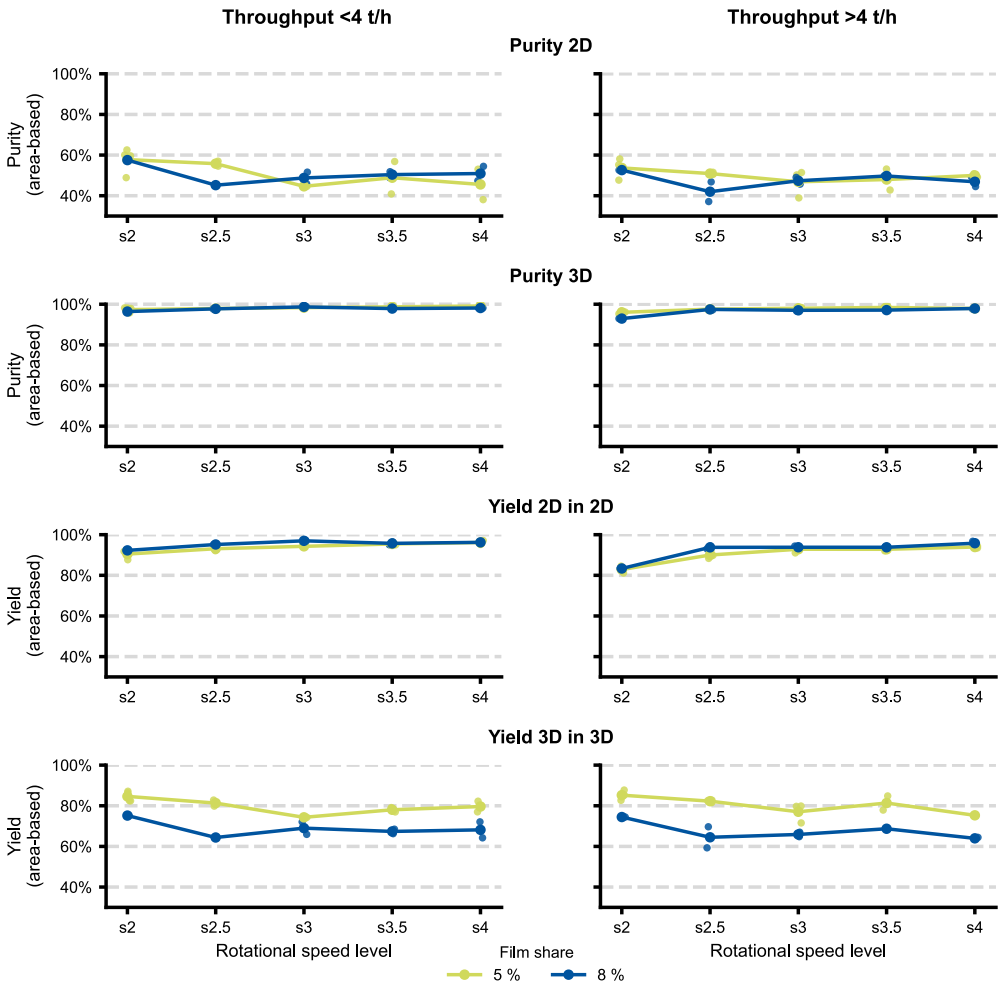


Fig. 2: Results of the large-scale technical trials showing the influence of film content in the input and different throughputs on the process performance of a ballistic separator.

3.2 Trials in an Operational LWP Sorting Plant

To validate the results, additional trials were conducted in an operational LWP sorting plant. The results are shown in Figure 3, where the indirect purity of the 3D product stream is plotted against the throughput fed to the ballistic separators (cf. also Figure 1). A particularly high number of data points is observed at a rotational speed of s3.3, as this represents the standard operating point of the investigated LWP sorting plant.

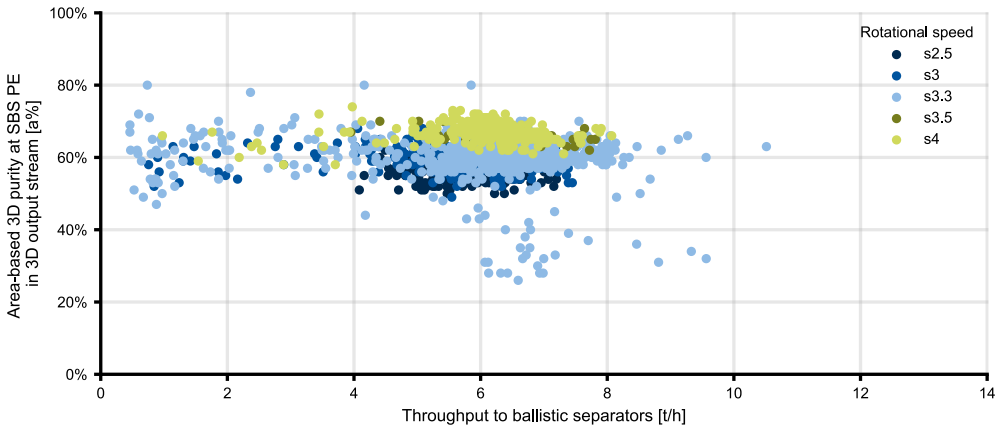


Fig. 3: Results of the trials on adjusting the rotational speed in an operational LWP sorting plant to optimize the process performance of two ballistic separators.

Despite differing boundary conditions, such as fluctuating and unknown input compositions, varying plant configurations, and the indirect determination of performance indicators, the results show that the trends identified in the large-scale technical trials were maintained during industrial plant operation especially regarding the following points: (1) Figure 3 indicates that throughput in the investigated range has only a minor influence on the purity of the 3D product stream. (2) As rotational speed increased, the relative share of the 3D product stream from the total stream decreased. At the same time, the 3D purity in the 3D product stream showed a relevant increase with increasing rotational speed (approx. 8–10% over the investigated rotational speed range). However, the 3D purities obtained in the two experimental series were in different ranges. This may be attributed to the measurement point used for the 3D product stream during plant trials and to differences in the overall input composition of the LWP sorting plant. In addition, it can be assumed that process indicators derived from area data across different NIR sensors are not directly comparable, even when the same classification algorithm is used. (3) The asymptotic behavior of process indicators was also reproduced, although it occurred at higher rotational speeds in the LWP sorting plant. Overall, the findings from the large-scale technical trials were successfully validated under real plant operating conditions.

4 CONCLUSION

The results of this study confirm the findings of previous investigations (Spies et al., 2026), demonstrating reproducibility despite the relatively new SBPM approach. In addition, trends identified in large-scale technical trials could be successfully transferred to experiments conducted during the ongoing operation of an LWP sorting plant. The results show that rotational speed can serve as a suitable parameter for responding to fluctuations in the plant input, with material composition appearing to affect process performance more strongly than throughput variations within the tested parameter range. However, to achieve real process optimization and adaptive control, the question of an optimal operating point remains. If sufficient data are available for both output streams, existing optimization approaches can be applied (Lasch et al., 2025; Spies et al., 2026). However, when using inline sensor data from SBS, this is often not the case. One possible approach is therefore to define settings based on empirical values and subsequently operate and control the process within this range, with adjustments made when defined thresholds are exceeded. In the long term, adaptive control of ballistic separators can contribute to improved process performance of entire LWP sorting plants and increase the associated sorting depth. It can therefore support improved circularity of packaging waste and help meet the more stringent requirements arising from current legislative frameworks, such as the PPWR and the VerpackDG.

REFERENCES

Kranert, M. (Ed.), 2024. Einführung in die Kreislaufwirtschaft: Planung - Recht - Verfahren, 6th ed. Springer Vieweg, Wiesbaden.

Küppers, B., Emmerich, M., Ludes, A., 2025. Adaptive Ballistikseparatorsteuerung: German patent application DE 10 2025 125 551.7.

Küppers, B., Schlögl, S., Kroell, N., Radkohl, V., 2022. Relevance and challenges of plant control in the preprocessing stage for enhanced sorting performance, in: Greiff, K., Wotruba, H., Feil, A., Kroell, N., Chen, X., Gürsel, D., Merz, V. (Eds.), 9th sensor-based sorting & control 2022. Shaker Verlag, Aachen, pp. 17–33.

Lasch, T., Enengel, M.J., Kandlbauer, L., Khodier, K., Pomberger, R., Sarc, R., 2025. Parameter study of a ballistic separator in waste treatment for optimized mechanical processing and improved recovery of valuable materials from mixed commercial waste. Waste Management 203, 114864. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114864.

Spies, A.M., Scherling, T., Ludes, A., Kroell, N., Küppers, B., Kaufeld, S., Raulf, K., Greiff, K., 2024. Abtrennung von Papier aus Kunststoffgemischen: Parameterstudie mittels kontinuierlicher Stoffstromüberwachung zur optimierten Einstellung eines Ballistikseparators, in: Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V. (Ed.), 13. Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft am 15. und 16. Februar 2024 an der Technischen Universität Wien. innsbruck university press, Wien, pp 71-76.

Spies, A.M., Scherling, T., Ludes, A., Küppers, B., Kroell, N., Raulf, K., Greiff, K., 2026. Assessing the process performance of ballistic separators in packaging waste sorting plants using sensor-based process monitoring. Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, 734242X261433694. https://doi.org/10.1177/0734242X261433694.

STADLER Anlagenbau GmbH, 2026. STT2000. https://w-stadler.com/components/ballistic-separators/stt2000 (accessed 14 January 2026).

ACKNOWLEDGEMENT

This work was funded by the German Research Foundation (DFG) within the framework of TRR 402/1-525069572 DediGrad. The data were provided to ANTS by STADLER Anlagenbau. The authors gratefully acknowledge STADLER Anlagenbau and, in particular, Dr. Bastian Küpper, Marvin Emmerich, and Annika Ludes for providing the data and for their excellent support.

Optimizing Preprocessing Pipelines for Near-infrared Hyperspectral Images to Enhance Classification Accuracy in Post Consumer Lightweight Plastic Packaging Waste Stream

Abtin Maghmoumi[1], Luz Alejo Alvarez[1], Alexander Feil[1] & Kathrin Greiff[1]
1) Department of Anthropogenic Material Cycles, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

ABSTRACT: Near-infrared (NIR) spectroscopy has emerged as a key non-contact analytical tool across multiple industries, such as agriculture, food, textiles and recycling (especially plastic recycling). In plastic recycling, raw recorded data from an NIR sensor/camera can rarely be used directly for analysis. Several factors inherent to NIR spectroscopy, which are also intensified in plastic recycling settings undermine NIR sensor effectiveness, such as scattering, sensor noise or overlapping absorption bands. To resolve these effects the data is often preprocessed in a pipeline consisting of steps like standard normal variate (SNV) for baseline correction, Savitzky-Golay filter for smoothing and derivation. However, defining this pipeline is not straightforward. A good example is the postconsumer plastic packaging waste stream. Due to its heterogenous nature, determining the best preprocessing pipeline is challenging. In this work we present a framework that selects an interpretable preprocessing pipeline by optimizing a dataset intrinsic class separability. This approach was validated with different machine learning models, this is, after separability score was maximized, the models were trained on both raw and optimally preprocessed data to evaluate performance of this approach. The results indicate that the optimized preprocessing improves classification accuracy of the model pool by up to 12% percentage points compared to no pre-processed data.

1 INTRODUCTION

Post-consumer plastic packaging is produced in large volumes and recycled at low rates, and mechanical recycling — the dominant route — requires feedstock that is sorted by polymer type, because mixing incompatible polymers degrades the quality of the recyclate. Automated sorting of commingled lightweight-packaging (LWP) waste is thus a central step in the recycling chain, and its throughput and purity requirements make it a demanding classification problem at industrial scale (Feil & Pretz, 2020).

The sensor that is widely used to fulfill this sorting task is near-infrared (NIR), typically deployed as line-scan hyperspectral imaging over a conveyor. NIR-HSI is non-destructive, operates per object, is largely shape-agnostic, and distinguishes the common packaging polymers: polyethylene (PE), polyethylene terephthalate (PET), polypropylene (PP) and others, by their characteristic overtone and combination bands; a modern LWP plant may contain on the order of twenty NIR sorters arranged in cascades (Feil & Pretz, 2020; Kroell et al., 2022). NIR sensors enable non-contact analysis of plastic streams; however, extracting actionable material classifications from the resulting spectra demands robust machine learning algorithms capable of pattern recognition and decision-making. Due to the harsh conditions of recycling plants, the data usually presents high levels of noise and scattering effects among others. This is where; the machine learning models aka. classifiers, face challenges. Diffuse-reflectance NIR spectra of solid plastics are affected by multiplicative scatters, additive baselines and particle-size effects that vary from object to object and can deform the raw spectra. To this end, preprocessing of the data is a key component of the overall model development.

Common pre-processing methods for spectral data are the standard normal variate (SNV), Savitzky–Golay (SG) smoothing and derivatives (Barnes et al., 1989; Rinnan et al., 2009; Savitzky & Golay, 1964). However, the most effective preprocessing depends on the material, the instrument and the classifier, and no single pipeline is universally best; choosing it is a recognized and non-trivial step that is too often performed ad hoc (Engel et al., 2013). These preprocessing steps are evaluated only after classification model performance has been optimized. This approach creates inefficiencies, as model training is computationally intensive and time-consuming. (Babatunde et al., 2025; Ezenarro et al., 2024; Torniainen et al., 2020; Gerretzen et al., 2015). Therefore, enhancing the efficiency of this workflow and looking for other optimization targets that require less resources but still manages to find preprocessing pipelines which enhance the downstream classification performance is a gap which should be researched.

In this work we examine a deliberately simpler and cheaper alternative. Instead of training models to find the optimal preprocessing pipeline, we find it by calculating the class separability of the preprocessed spectrums of the material classes, which is a statistical distance between the polymer classes. Class-separability measures are established tools, widely used for band and feature selection in hyperspectral imaging (Sun & Du, 2019), and they relate directly to classification error: statistical distances such as the Bhattacharyya distance provide a closed-form upper bound on the Bayes error (Nielsen, 2014). Our aim is therefore narrower and empirical: to test whether an inexpensive, model-independent separability objective is an acceptable substitute for costly classification-driven preprocessing selection. The research questions in this work are:

- Is using the separability score as optimization objective to find the optimal preprocessing pipeline a feasible approach?
- Which of several established separability measures best predicts downstream accuracy?
- What is the most achievable improvement of the classification performance when using the optimal preprocessing pipeline found with this method?

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 Framework's input and output

The framework takes a matrix of labelled spectra (rows = spectra; columns = wavelength intensities; one label column) and returns a recommended preprocessing configuration, a recommended classifier and diagnostic plots.

2.2 Preprocessing operators and search space

We consider per-spectrum SNV for multiplicative scatter and SG smoothing/derivatives (window, polynomial order, derivative order), plus the in which order the two steps should be applied to spectrum (Barnes et al., 1989; Savitzky & Golay, 1964). We deliberately keep the full spectrum and apply no PCA or band selection, so the recommendation stays interpretable and transferable. The following ranges were used to create the search space Table 1:

Tab. 1: Investigated parameters

Parameter	Investigated Range
Window size for SG	[7, 47]
Polynomial order for SG	[2, 4]
Derivation order for SG	[0, min (2, polynomial order)]
SNV	[true, false]
Order of SNV & SG	[first SNV then SG, first SG then SNV]

2.3 Separability objective and search

Each candidate pipeline is scored by a cross-validated class-separability metric on the training folds. The metric calculated were Jeffries–Matusita distance (JM), Bhattacharyya, transformed divergence, a regularized Fisher trace, N2 & N3 neighborhood-based data-complexity measures, DSI (Distance-based Separability Index) and mean pairwise RBF-kernel Maximum Mean Discrepancy (MMD) (Bruzzone et al., 1995; Gretton et al., 2012; Guan & Loew, 2022; Lorena et al., 2020). Because the space is small and discrete, every pipeline can be scored exactly. Then for each metric the pipeline, which led to highest score is stored as the suggested pipeline by that metric.

2.4 Metric comparison, real-time score and sample efficiency

Running the search once per separability metric yields one best pipeline per metric; we then benchmark every classifier on each of these pipelines and rank the metrics by the average boost to the downstream accuracies of the classification models. The models used for comparison are PLS-DA, logistic regression (LogReg), Nearest mean, Multilayer Perceptron (MLP), Random Forest, k-NN, Histogram-based Gradient Boosting (HGB), support vector machine (SVM) with RBF kernel. To assess the models for a real-time deployment we define a real-time score against a target line rate, so an accurate-but-too-slow model is demoted (throughput is measured based on a real use case, 500 frames per second and each frame consisting of 312 spectra).

2.5 Dataset acquisition and experimental setup

A dataset of NIR hyperspectral images (HSIs) of real light weight plastic packaging (LWPP) sampled from a post-consumer LWPP sorting plant in Germany was used for this analysis. The dataset used here consists of 8 different classes; Beverage carton (FKN), High-density polyethylene (HDPE), Low-density polyethylene (LDPE), Polyethylene terephthalate (PET) bottle, PET tray, Polypropylene (PP), Paper, board, cardboard (PPK), Polystyrene (PS). The recording of HSIs was in technical center of ANTS institute of RWTH Aachen university. The NIR-Sensor used for recording was an EVK HELIOS NIR G2-320; 990nm-1678nm wavelength range. The sensor was installed on conveyor belt with 800mm width operating at a speed of 0.25 m/s. The computer used for optimization had an Intel(R) Core (TM) i9-14900, 128 GB of RAM and was running windows 11.

3 RESULTS

3.1 Separability metric used to improve classification performance

As shown in the figure below (Figure 1) to find the best separability metric, the average boost to the classification accuracies of the models is calculated for each optimized pipeline. The results indicate that the N3 metric achieves the highest boost for the classification with 12%. Other metrics like Fisher Trace (FT), Bhattacharyya, DSI are also promising, but for other metrics like JM and MMD we see an almost 2% difference. Concluding that N3 is the best metric and is used for further analysis. The pipeline resulting from optimizing this metric use SG with window size of 35, polynomial order of 2 and derivation order of 2, then applies the SNV.

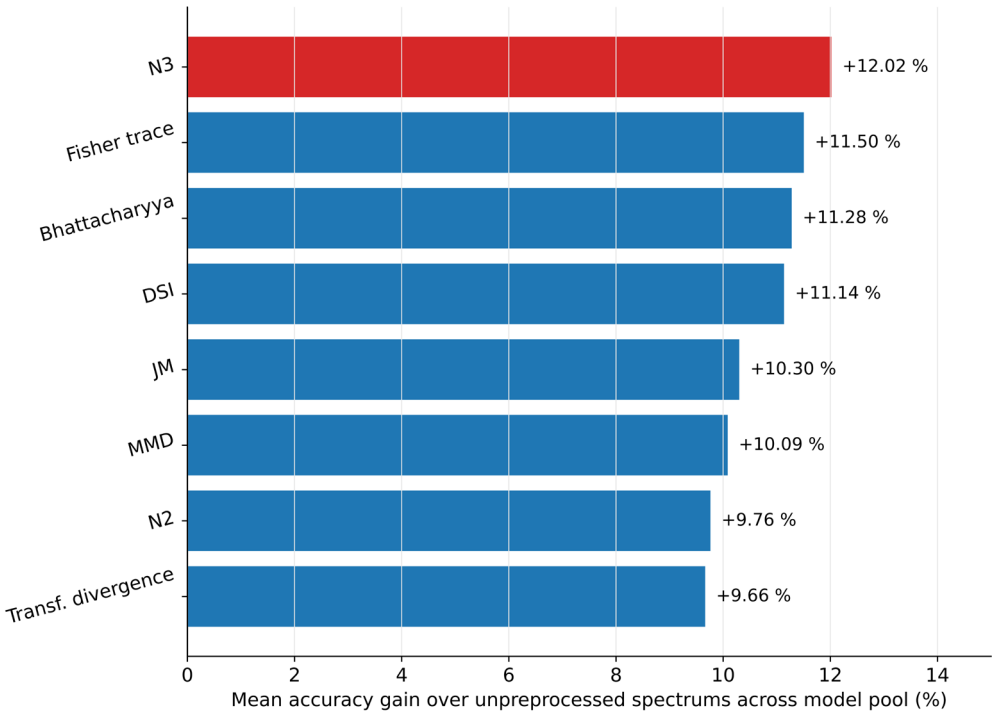


Fig. 1: Comparison of average accuracy boosts over the model pool for different separability metric (red bar indicates the best metric, here N3)

3.2 Classification boost for different models and real time performance

In Figure 2 the individual performance boost for each model is illustrated. We see that the simplest model here nearest mean (L2) gains the highest boos in performance with 54.2% from the optimized preprocessing pipeline, the k-NN model also gains a substantial 14.5% boost. MLP, LogReg, and PLS-DA gains the least from the optimized preprocessing, however MLP with 97.6% and LogReg with 95.4% show promising results. The highest accuracy is for the HBG model with 98%. However, it is important to consider the throughput of the models as well, as we can have a model with the highest accuracy, but its throughput is too low. In Figure 3 we have the maximum throughput of each model. Looking at these results, we can conclude that only MLP and LogReg can be both accurate and fast enough for industrial use cases.

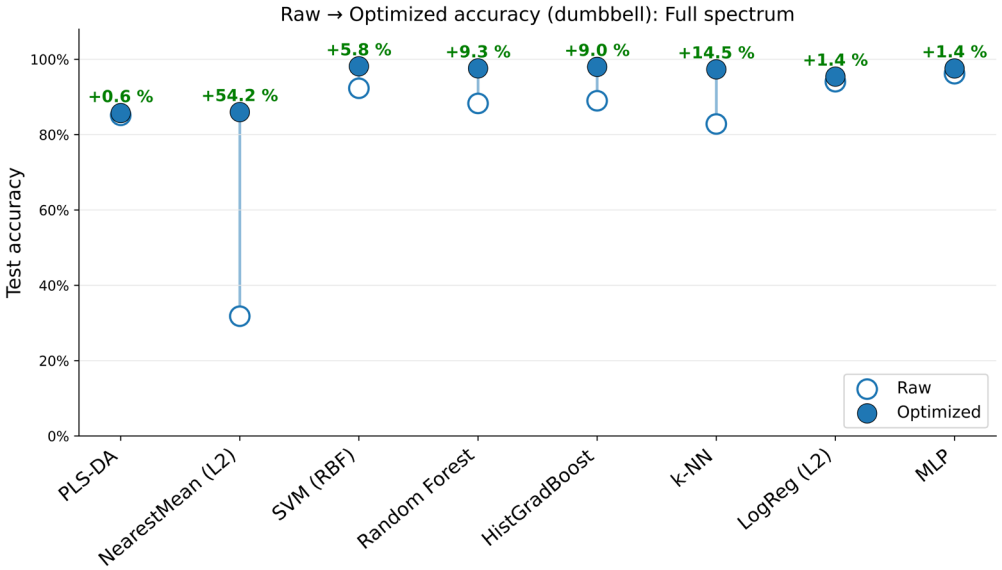


Fig. 2: Boost classification accuracy for all the investigated models. Filled circles indicate the classification performance on preprocessed data using the optimal pipeline

3.3 In depth analysis of performance boost

For the two best models MLP and LogReg their confusion matrix is plotted in Figure 4. Looking at the figure an interesting observation is that for LogReg the optimized preprocessing decreases the accuracy of sum classes but in total leads to 1.4% higher accuracy specially in challenging chase of differentiating between PET bottle and PET Tray the accuracy decreases meanwhile by separating HDPE and LDPE, less HDPE spectrums are falsely classified as LDPE. For MLP model only in case of PPK a decrease is observed and for all the other classes the accuracy improves and in the case of PET bottle vs PET tray the misclassification rate drop by an average of 2.3%.

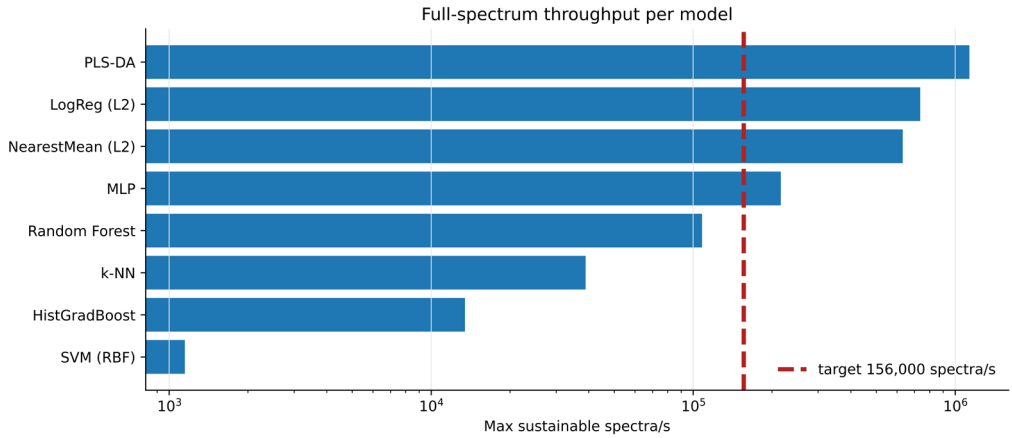


Fig. 3: Maximum sustainable classification speed for each model, the red line indicates the minimum speed needed for real-time implementation

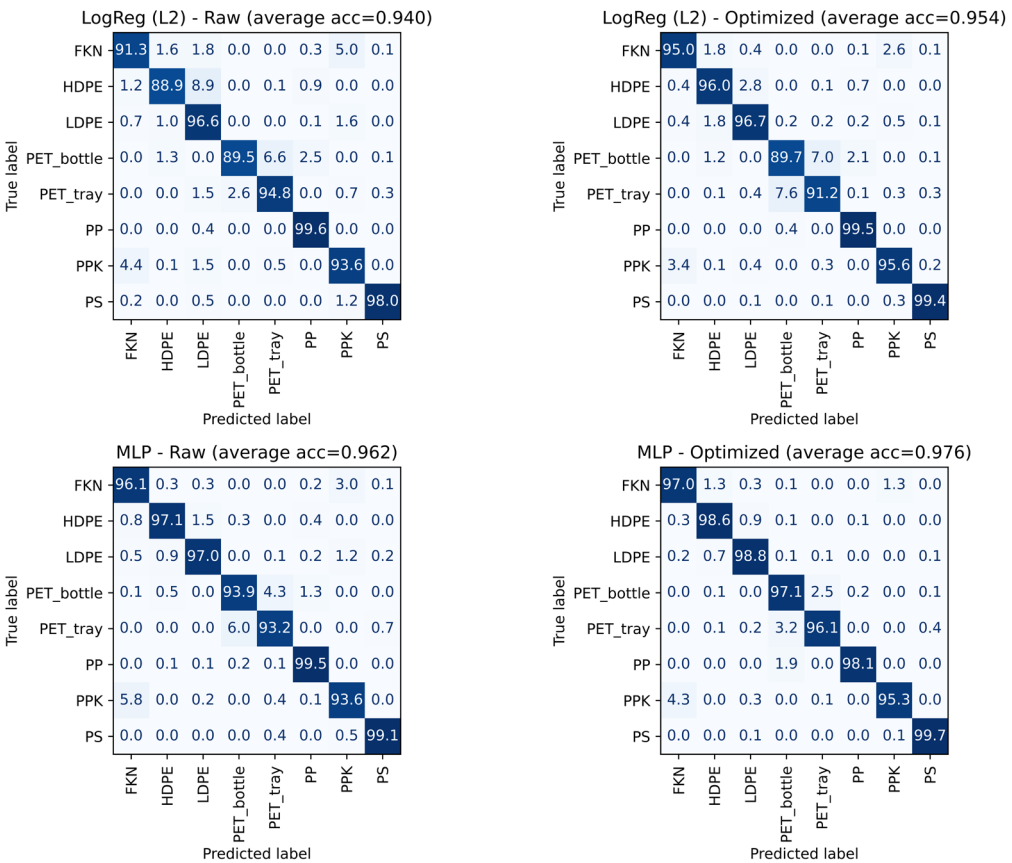


Fig. 4: The confusion matrix for the best two models MLP and logistic regression. The darker the color the higher the precision is for that class.

4 CONCLUSION

We assessed class-separability optimization as a low-cost substitute for classification-driven preprocessing selection for NIR hyperspectral imagery of light weight plastic packaging and found that this can be used an objective to find the optimal preprocessing pipeline leading to better classification performance (RQ1). Selecting preprocessing by maximizing a model-free separability score avoids training a classifier for every candidate pipeline, saving substantial computation, and yields a clear improvement in polymer-classification accuracy across a range of models. To answer (RQ2) we compared different separability metrics based on the average gained accuracies of the selected models, we concluded that N3 neighborhood-based data-complexity measure delivers the highest increase to the average classification performance of selected models. Looking deeper into gains of the classification performances, an average of 10% better accuracies is observed for the separability metrics investigated with N3 leading with 12% (RQ3).

Delivering the highest accuracy is not always enough, therefore we also investigated classification speed of the models and found that MLP and logistic regression both would be eligible for real-time implementation. An in-depth analysis of the improvements in classification for all classes indicates that for edge cases like differentiating between HDPE and LDPE (as their spectrums are similar) optimizing the pipeline doesn't guarantee a boost in classification.

Future work should investigate how well the boost in classification on spectral level will transfer to a material flow analysis where the composition of polymers in the material flow is measured over time for purposes like quality monitoring and control. Further on this approach should be tested on more datasets to determine its transferability.

5 ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the program "Resource-efficient circular economy - plastic recycling technologies (KuRT)" under the project ReVise-UP (grant no. 033R390A). We thank Peter Bardenheuer for his assistance in recording the data set used in this work. His contributions were essential in ensuring the data was collected effectively and accurately.

REFERENCES

Babatunde, H. A., McDougal, O. M., & Andersen, T. (2025). Automated spectral preprocessing via Bayesian optimization for chemometric analysis of milk constituents. *Foods*, *14*(17), 2996. https://doi.org/10.3390/foods14172996

Barnes, R. J., Dhanoa, M. S., & Lister, S. J. (1989). Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra. *Applied Spectroscopy*, *43*(5), 772–777.

Bruzzone, L., Roli, F., & Serpico, S. B. (1995). An extension of the Jeffreys-Matusita distance to multiclass cases for feature selection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *33*(6), 1318–1321.

Engel, J., Gerretzen, J [Jan], Szymańska, E [Ewa], Jansen, J. J [Jeroen J.], Downey, G., Blanchet, L., & Buydens, L. M. (2013). Breaking with trends in pre-processing? *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *50*, 96–106. https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.04.015

Ezenarro, J., Schorn-García, D., Busto, O., & Boqué, R. (2024). ProSpecTool: A MATLAB toolbox for spectral preprocessing selection. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *247*, 105096. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2024.105096

Feil, A., & Pretz, T. (2020). Chapter 11 - Mechanical recycling of packaging waste. In T. M. Letcher (Ed.), *Plastic Waste and Recycling* (pp. 283–319). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00011-6

Gerretzen, J [J.], Szymańska, E [E.], Jansen, J. J [J. J.], & et al. (2015). Simple and effective way for data preprocessing selection based on design of experiments. *Analytical Chemistry*, *87*(24), 12096–12103.

Gretton, A., Borgwardt, K. M., Rasch, M. J., Schölkopf, B., & Smola, A. (2012). A kernel two-sample test. *J. Mach. Learn. Res.*, *13*(null), 723–773.

Guan, S., & Loew, M. (2022). A novel intrinsic measure of data separability. *Applied Intelligence*, *52*(15), 17734–17750. https://doi.org/10.1007/s10489-022-03395-6

Kroell, N., Chen, X., Greiff, K., & Feil, A. (2022). Optical sensors and machine learning algorithms in sensor-based material flow characterization for mechanical recycling processes: A systematic literature review. *Waste Management (New York, N.Y.)*, *149*, 259–290. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.05.015

Lorena, A. C., Garcia, L. P. F., Lehmann, J., Souto, M. C. P., & Ho, T. K. (2020). How Complex Is Your Classification Problem? *ACM Computing Surveys*, *52*(5), 1–34. https://doi.org/10.1145/3347711

Nielsen, F. (2014). Generalized Bhattacharyya and Chernoff upper bounds on Bayes error using quasi-arithmetic means. *Pattern Recognition Letters*, *42*, 25–34. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2014.01.002

Rinnan, Å., van den Berg, F., & Engelsen, S. B. (2009). Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *28*(10), 1201–1222.

Savitzky, A., & Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, *36*(8), 1627–1639.

Sun, W., & Du, Q. (2019). Hyperspectral Band Selection: A Review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, *7*(2), 118–139. https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2911100

Torniainen, J., Afara, I. O., Prakash, M., Sarin, J. K., Stenroth, L., & Töyräs, J. (2020). Open-source python module for automated preprocessing of near infrared spectroscopic data. *Analytica Chimica Acta*, *1108*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.02.030

Quality monitoring of recycled plastics – automatic inline prediction of plastics composition using Near-infrared spectroscopy

Jutta Geier[1,2], Katarina Marković[1,2], Márton Bredács[1], Mithun Goswami[3], Elisabeth Dippold[3], Juan Torres[3], Michael Jerabek[3] & Gernot Oreski[1,2]
[1)] Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, Austria
[2)] Chair of Materials Science and Testing of Polymers, Technical University of Leoben, Leoben, Austria
[3)] Science and Engineering, Borouge International, Linz, Austria

ABSTRACT: The performance and thus use of recycled plastics is often limited by contaminants, as even low concentrations of foreign materials can negatively affect recyclate quality. Conventional off- or at-line analyses are usually too slow for continuous process monitoring. This study investigates the feasibility of using a contactless near-infrared (NIR) analyzer for inline detection and quantification of contaminants in polypropylene (PP) pellets. Virgin PP was compounded with defined contaminant concentrations, including formulations with multiple contaminants, to create a controlled proof-of-concept dataset. Spectral data were acquired from the produced pellets and evaluated using partial least squares regression. The developed models showed high prediction accuracy, even at contaminant concentrations below 1 wt.%. Importantly, the approach enabled the simultaneous prediction of several contaminant concentrations within the PP matrix. These results demonstrate the potential of NIR spectroscopy for real-time quality monitoring and future inline assessment of recycled PP material streams.

1 INTRODUCTION

The transition from a linear to a circular plastics economy is increasingly driven by European Union legislation and policy initiatives (European Comission, A European Strategy for Plastics in a Circular Economy, 2018; European Comission, A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe., 2020; European Union, 2025). These measures aim to reduce the use of primary raw materials, improve the recyclability of plastic products and increase the use of recycled plastics. In particular, the Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) sets requirements for the use of recycled content in new plastic packaging products (European Union, 2025). Similar targets or requirements in other industrial sectors can be expected in the future, further increasing the demand for recycled plastics of high and consistent quality.

This is particularly relevant for recyclates intended for higher-value applications, where recycled plastics must be incorporated into new products without compromising product performance. However, despite advances in sorting and recycling technologies, the quality of many mechanically recycled plastics remains insufficient for such applications. One major reason is the presence of contaminants, which can negatively affect mechanical, optical and processing properties (Ragaert, Delva, & Van Geem, 2017; Messiha, et al., 2025).

Contaminants can be polymeric or non-polymeric and may originate from different sources. A key challenge is the inherent heterogeneity of plastic waste streams, which usually consist of mixtures of different polymer types, product types, additives and fillers, but also non-plastic materials (Geier, Bredács, Witschnigg, Vollprecht, & Oreski, 2024). In addition to this initial material heterogeneity, contaminants can stem from the original product itself, for example from multi-material components, from the product use phase, such as residues or adhering contents, or from collection and storage, where foreign particles such as sand, dust, metals or organic residues can be introduced (Ragaert, Delva, & Van Geem, 2017).

The mechanical recycling chain includes several process steps intended to remove or reduce contaminants, including sorting, density separation, washing, drying and melt filtration. Sorting systems, such as near-infrared (NIR) sorting lines, are used to separate different polymer types, while metallic contaminants can be removed by magnetic or eddy current separators (Ragaert, Delva, & Van Geem, 2017; Hopewell, Dvorak, & Kosior, 2009). Washing and drying systems aim to remove adhering dirt, product residues, labels, adhesives and other surface contaminants as effectively as possible (Hopewell, Dvorak, & Kosior, 2009; Ragaert, Delva, & Van Geem, 2017). As a final contaminant reduction step, melt filtration is commonly applied during extrusion or compounding. The selected filter or mesh size depends on the material, contamination level, processability, and can affect the final recyclate and product quality. (Schyns & Shaver, 2021; Ragaert, Delva, & Van Geem, 2017)

However, these process steps are generally not capable of completely removing all contaminants. In addition, the availability and efficiency of contaminant removal technologies can differ considerably between recycling facilities. Not all facilities are equipped with advanced sorting systems, intensive washing steps, or fine melt filtration, and process conditions may vary depending on the waste stream, material throughput and economic constraints. Residual contaminants can therefore remain in the recyclates due to insufficient sorting accuracy, inadequate, washing and constraints in melt filtration. The relevance of such residual contamination is particularly high because even low contaminant concentrations can influence recyclate performance and processability (Ragaert, Delva, & Van Geem, 2017; Messiha, et al., 2025).

A dedicated quality assessment of recycled plastics is therefore necessary. Conventional offline or at-line analytical methods are often too slow or impractical for continuous monitoring of the contaminant levels during recyclate production, particularly during the conversion of flakes into pellets. This limits their suitability for real-time quality control. Real-time inline monitoring would enable material quality to be assessed directly during production and would allow immediate corrective actions. Depending on the detected material quality, processing parameters could be adjusted, additives, stabilizers, or virgin material could be added, or material of insufficient quality could be redirected to less-demanding applications. For this reason, the present study investigates an inline system for the detection and quantification of contaminants in recycled plastics, focusing on polypropylene (PP).

2 EXPERIMENTAL

This study focusses on a proof of concept of the detection of low contaminant concentration in PP. The investigation was performed using virgin PP with defined contamination concentration. For this purpose, PP was compounded with seven selected contaminant types at known concentrations, and the resulting pellets were used for spectroscopic measurements. The focus was placed on low contaminant concentrations (≤ 5wt.%), including compounds containing both single contaminants and mixtures of multiple contaminants.

To investigate the feasibility of inline detection, spectral data were acquired from the produced pellets using a contactless NIR analyzer suitable for inline installation. From each produced material 10 – 20 spectra were recorded. The recorded spectra were pre-processed by normalization and derivation before further analysis. Prediction models were developed using partial least squares regression (PLS-R). Since repeated spectra were recorded from the same compounds, model validation was performed using leave-one-group-out (LOGO) cross-validation combined with PLS regression. In this LOGO-PLS approach, all spectra belonging to one group were excluded from calibration and predicted by a model trained on the remaining groups. This validation strategy prevents data leakage by ensuring that repeated measurements of the same material are not present in both the calibration and test sets. As a result, the risk of overly optimistic prediction performance was reduced.

3 RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 1 summarizes the performance of the LOGO-PLS regression model for predicting the PP content and the concentrations of the seven investigated contaminants. Overall, a very good agreement between actual and predicted values was obtained for all targets. The models achieved coefficients of determination (R^2) above 0.96 for all materials, demonstrating that the spectral information acquired by the NIR sensor contains sufficient information for reliable quantification, even in the low concentration range. In particular, the contaminant concentrations were predicted with low errors, with mean absolute error (MAE) values below 0.04 wt.% for all contaminants.

Although the overall model performance was strong, a slightly increased scatter can be observed in the low concentration range of some contaminants, especially close to zero concentration. For contaminants 4 and 5, this behavior is likely related to their high chemical similarity, which makes a full spectral differentiation more challenging, particularly at very low concentrations. As a result, some overlap or cross-sensitivity between both contaminants may occur in the model response. For contaminants 6 and 7, the increased scatter may be influenced by slight inhomogeneities in the distribution of the contaminants within the PP matrix, as these contaminants were more difficult to disperse homogeneously during compounding. Such local concentration differences can affect the measured spectra and thus contribute to the observed variation in predictions.

Nevertheless, the results clearly show that the LOGO-PLS approach provides robust predictive performance, confirming the general feasibility of NIR spectroscopy for inline monitoring of contaminant levels in PP compounds.

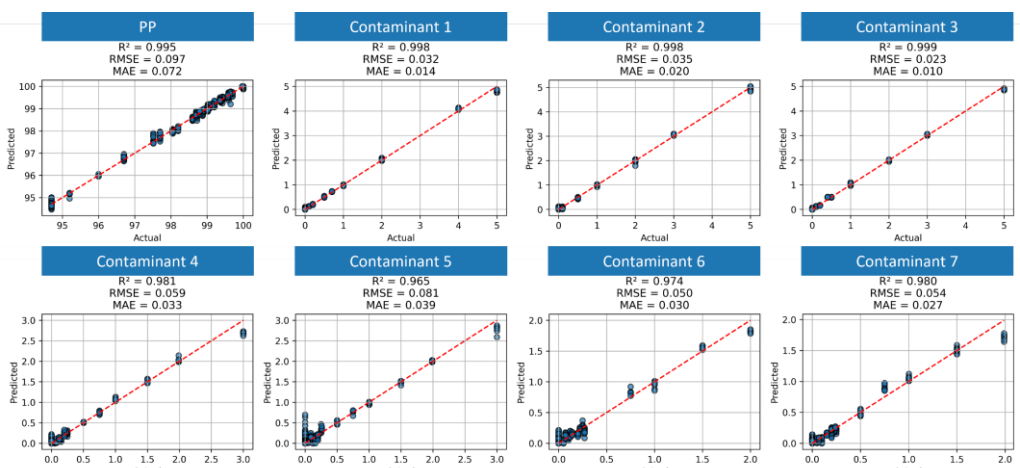


Fig. 1: LOGO-PLS regression results for PP and the investigated contaminants, with concentrations given in wt.%.

4 CONCLUSION AND OUTLOOK

The results demonstrate the feasibility of using a contactless NIR analyzer for the detection and quantification of low contaminant concentrations in PP. High prediction accuracies were achieved for all contaminants investigated, including concentrations below 1 wt.%. This indicates that NIR bulk spectroscopy combined with PLS regression is a promising approach for inline quality control of PP material streams.

As a proof of concept, the study was performed using virgin PP compounds with defined contaminant types and concentrations. Further work will focus on expanding the dataset by including additional contaminants, more complex mixtures with multiple contaminants, and different PP grades. In addition, trials on real recyclates will be carried out to evaluate the robustness of the approach on realistic and heterogeneous material conditions.

REFERENCES

European Comission. (2018). A European Strategy for Plastics in a Circular Economy.

European Comission. (2020). A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe.

European Union. (2025). Regulation (EU) 2025/40 of the European Parliament and of the Council of 19 December 2024 on Packaging and Packaging Waste, Amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and Repealing Directive 94/62/EC: PPWR.

Geier, J., Bredács, M., Witschnigg, A., Vollprecht, D., & Oreski, G. (2024). Analysis of different polypropylene waste bales: Evaluation of the source material for PP recycling. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*.

Gundupalli, S., Hait, S., & Thakur, A. (2017). A review on automated sorting of source-separated municipal solid. *Waste Management*.

Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*.

Messiha, M., Geier, J., Barretta, C., Bredács, M., Oreski, G., Kratochvilla, T., . . . Pinter, G. (2025). How impurities affect the lifetime of plastic products - A circularity case study on polymer pipes. *Polymer Testing*.

Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*.

Schyns, Z. O., & Shaver, M. P. (2021). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular rapid communications*.

CONTACT

Jutta Geier
jutta.geier@pccl.at
Polymer Competence Center Leoben GmbH
www.pccl.at

Fast on-site asbestos detection for construction and demolition waste using a miniaturized handheld near-infrared sensor

Felix Kronenwett[1], Georg Maier[1], Thomas Längle[1], Norbert Leiss[2] & Volker Thome[2]
[1)] Fraunhofer IOSB, Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation, Karlsruhe, Germany
[2)] Fraunhofer IBP, Institute for Building Physics, Valley, Germany

ABSTRACT: With the enforcement of the German Substitute Building Materials Ordinance, the responsibility for certifying recycled aggregates as “asbestos-free” has shifted to the processing companies. However, conventional laboratory methods (SEM/PLM) are time-consuming, costly and unsuitable for frequent on-site testing. This paper presents a sensor-based rapid screening method based on near-infrared (NIR) spectroscopy that has been implemented in a mobile, miniaturized handheld spectrometer. Through laboratory-based SWIR hyperspectral imaging of real and reference samples, two characteristic asbestos absorption bands were identified at approximately 1385 nm and 2320 nm. To adapt this to a cost-effective handheld point spectrometer, the measurement range was limited to the region around 1370 nm. Automated signal analysis is performed via a knowledge-based pipeline and integrated into a mobile app. In initial tests, all asbestos-free reference materials were correctly classified (true-negative rate of 100%). The detection limit for real samples depends heavily on the fiber content (with limitations at concentrations below 0.5%), the surface condition and the sample preparation. The system thus shows great potential as a fast, cost-effective quality assurance tool that can be used directly at the demolition site.

1 INTRODUCTION

Asbestos was used on a large scale as a reinforcing and insulating material in buildings until its application was banned in Germany in 1991 for structural engineering and in 1994 for civil engineering. According to estimates by the Federal Ministry of Labor and Social Affairs (BMAS), around 20 % of the German building stock still contains asbestos-bearing materials, which have to be removed selectively during refurbishment and demolition work. In 2016 alone, roughly 11.5 million tons of demolition waste contaminated with asbestos-containing materials had to be disposed of in hazardous-waste landfills (Federal Statistical Office, 2009).
The economic relevance of fast asbestos screening increased sharply with the German Substitute Building Materials Ordinance (Ersatzbaustoffverordnung), in force since 1 August 2023. Responsibility for declaring recycled products as “asbestos-free” shifted from the suppliers of demolition waste to the Construction and Demolition Waste (CDW) processors before the material may re-enter circulation. Reliable assurance that a recycled aggregate is free of asbestos has therefore become a critical quality criterion and recycling companies have a strong interest in an efficient and inexpensive detection method.
Asbestos fibers are difficult to detect with the naked eye, as they are often bound within building materials such as fiber-cement products. However, using laboratory methods such as PLM or SEM, they can be clearly distinguished from the surrounding cement matrix both visually and chemically. The objective of the work presented here was to investigate spectroscopic methods that allow fast, low-cost and operator-independent screening of demolition waste directly on site and to implement these findings in a portable demonstrator.

2 STATE OF THE ART

For typical asbestos products such as sprayed asbestos, asbestos cement, cardboard and cords, the established analysis methods are highly standardized and reliable. Asbestos is identified in material samples using scanning electron microscopes (SEM) or specially equipped polarized-

light microscopes (PLM), often supported by polarizing filters that make the birefringence of the fibers visible. These methods are reliable above an asbestos content of about 1%, below this value only incidental findings are obtained unless the sample is prepared by ashing the binder and dissolving lime and gypsum fractions with diluted hydrochloric acid. All of these procedures share the disadvantage that they have to be carried out manually in an external laboratory by trained personnel, which makes them time-consuming and expensive and limits the number of samples that can realistically be taken at a demolition site.
Hyperspectral imaging in the short-wave infrared range has been proposed as a faster, less expensive alternative that is suitable for non-expert operators and high throughputs. Several studies have demonstrated the identification of asbestos fibers with line-scanning hyperspectral sensors and classification approaches (Bonifazi et al., 2018, 2019; Marzini et al., 2025; Serranti et al., 2019; Serranti & Bonifazi, 2020; Zholobenko et al., 2021). However, the available datasets are often small and do not allow general statements about the detectability of real demolition waste consisting of many different materials with varying fiber contents.
Earlier handheld implementations relied on expensive sensors that, despite being called “handheld”, had an unwieldy form factor. Newer compact asbestos detection devices offer a wide measurement range, at the expense of high spectral resolution in the asbestos-relevant and specific wavelength ranges. Recent developments in the field of miniaturized spectrometers have made it feasible to develop a truly compact device with high resolution in the required wavelength ranges, which is the gap addressed in this work.

3 MATERIALS AND METHODS

3.1 Sample Material and Datasets

Three groups of samples were compiled to develop and evaluate the method: pure asbestos minerals, real asbestos-containing CDW samples taken from demolition sites and an asbestos-free reference dataset. The real samples cover a wide range of materials and asbestos contents from below 1% on gypsum and adhesive products up to fiber-cement components. The composition is summarized in Tab. 1. Example samples can be seen in Fig. 1.

Tab. 1: Overview of the sample material used for method development and evaluation.

Dataset	Content
Asbestos minerals	Reference minerals: white asbestos, green asbestos, serpentine, crocidolite and chrysotile.
Real CDW samples	22 samples taken from demolition sites, e.g. gypsum plaster (0.1 %), tile adhesive (0.3 %), gypsum filler (0.5 %), machine plaster (1 %), several fiber-cement products, roof and facade panels, cardboard, PVC flooring, tar paper and sealing cord.
Asbestos-free reference (CDW)	Construction and demolition waste without asbestos: brick, (aerated) concrete, gypsum and basalt.



Fig. 1: Examples of actual CDW samples containing asbestos.

3.2 Hyperspectral Sensor Systems

To localize the spectral feature of asbestos and to determine the minimum wavelength range required for detection, two laboratory hyperspectral line-scanning sensors with different spectral coverage were used: a Specim FX17 (900-1700 nm, 224 channels) and a HySpex SWIR-640 camera (960-2500 nm, 640 spatial pixels, 360 channels). With these instruments, two-dimensional images are generated by moving the sample orthogonally underneath the sensor on a linear stage.

Based on the line-scanner results, a miniaturized point spectrometer (SpectralEngines NIRONE Scanner S1.7) covering 1350-1650 nm was selected for the handheld demonstrator. The sensor uses a tunable filter that scans the relevant wavelength range and communicates via Bluetooth and USB. The demonstrator has ring-mounted LEDs as illumination under a transparent cover plate, onto which the sample is placed. The complete handheld unit measures approximately 8 x 8 x 2 cm. A self-developed Android application initiates the measurement, averages several consecutive acquisitions to reduce noise, analyzes the spectra using a self-developed algorithm and displays the classification result, enabling operation without expert knowledge.

3.3 Spectral Data Evaluation

The limited and highly specific dataset makes purely data-driven classifiers such as support vector machines or linear discriminant analysis unsuitable, because they require large amounts of reliably labelled data and risk learning features that are not characteristic for asbestos. Furthermore, the presence of asbestos in a sample is not necessarily reflected in its surface spectrum, so reliable labels cannot always be assigned. A knowledge-based evaluation pipeline was therefore implemented that utilizes the known position of the characteristic absorption bands:

- Averaging of several acquisitions to increase the signal-to-noise ratio (SNR)
- Normalization of the spectral information
- Smoothing of the spectrum with a Savitzky–Golay filter to reduce noise
- Peak detection using the continuous wavelet transform based pattern-matching approach
- Interpretation of the peaks: if a peak is found between defined wavelength ranges, asbestos is assumed to be present in the sample.

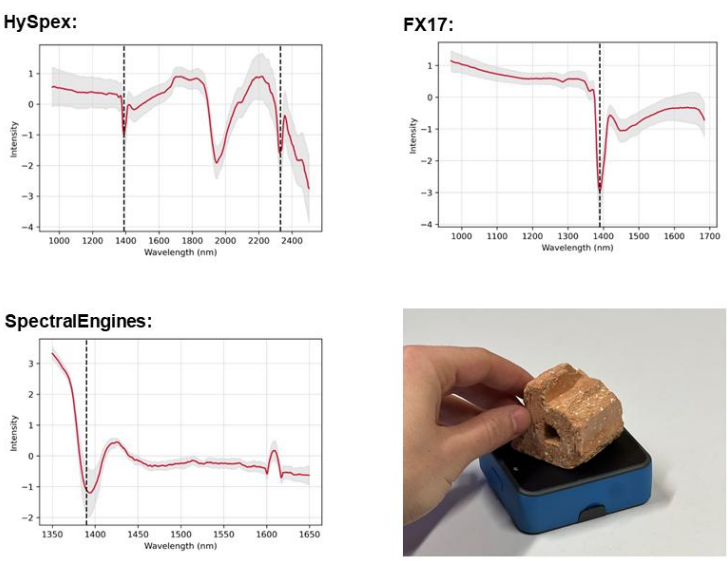


Fig. 2: Spectra of pure asbestos samples, recorded using three different hyperspectral cameras. Bottom right: Miniaturized handheld spectrometer.

4 RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Identification of Characteristic Absorption Bands

First, the spectra from the hyperspectral cameras were visually inspected and analyzed qualitatively (see Fig. 2). With the Specim FX17, a characteristic asbestos absorption band at approximately 1370-1385 nm was clearly identified, in agreement with the literature. The HySpex SWIR-640, which covers an extended spectral range, confirmed this band and additionally revealed a second characteristic absorption band at approximately 2320-2325 nm. Both bands were observed regardless of the cement or building-waste matrix in which the asbestos fibers were contained, making their detection a robust criterion for the presence of asbestos. Furthermore, the results demonstrated that the method is applicable to different types of asbestos. An exploratory principal component analysis (PCA) supported this qualitative evaluation, showing a clear separation between samples with and without the characteristic absorption bands.

The diagnostic absorption features of asbestos in the short-wave infrared (SWIR) spectrum are determined by the vibrational overtones of hydroxyl groups (O-H) bonded to cations like magnesium (Mg^{2+}) and iron (Fe^{2+}) within the crystal lattice. Due to these chemical differences, the exact peak positions vary between the two main asbestos groups:

- **Serpentine Group (Chrysotile):** Chrysotile (white asbestos), a magnesium silicate, exhibits a sharp Mg-OH stretching overtone at approximately 1385 nm and a secondary, distinct combination feature around 2325 nm.
- **Amphibole Group (Crocidolite, Amosite):** In contrast, amphibole asbestos varieties like crocidolite (blue asbestos) exhibit significant iron substitutions. This chemical shift pushes their primary absorption bands toward longer wavelengths (typically between 1390 nm and 1400 nm) while altering the peak profiles and reducing the intensities in the 2300–2320 nm region.

While these subtle spectral shifts allow for a mineralogical differentiation between individual asbestos types, both the regions at approx. 1385 nm and approx. 2325 nm remain highly robust, collective indicators for automated detection, as these specific narrow-band absorbers do not occur in standard cementitious matrices. However, not all asbestos-containing samples exhibited these bands. The main limitations were low asbestos content, as well as asbestos fibers that were covered or embedded within the material and therefore remain undetected at the surface.

4.2 Wavelength Range Reduction and Sensor Selection

Sensors covering wavelengths above 1700 nm are significantly more expensive due to the requirement of extended InGaAs materials and integrated cooling systems to mitigate thermal noise. Because the first absorption band of asbestos at around 1385 nm remained clearly recognizable in the 900-1700 nm range despite a lower SNR and resolution in the compact device, the detection task could be reduced to the region around this band. Restricting the acquisition to this specific wavelength range avoids excessive data volumes, shortens the measurement time and allows for a smaller, more cost-effective sensor form factor than previous handheld devices. This finding directly motivated the selection of the 1350-1650 nm point spectrometer for the demonstrator.

4.3 Handheld Sensor Classification Result

The signal quality of the miniaturized sensor, despite a lower signal-to-noise ratio (SNR) and spectral broadening introduced by the compact optics, is sufficient to clearly identify the characteristic asbestos absorption band around 1385 nm. Applying the knowledge-based algorithm to the 22 real-world CDW samples, all of which contain asbestos, yields the classification results

summarized in Tab. 2. The asbestos-free reference materials were reliably classified as asbestos-free in all cases, resulting in a true-negative rate (specificity) of 100%. For the actual waste samples containing asbestos, the sensitivity (true-positive rate) was noticeably lower, as samples with low fiber contents or unfavorable surface conditions did not exhibit a detectable band.

Tab. 2: Detection result for the 22 real CDW samples. All samples contain asbestos. Owing to low fiber contents and difficult surface conditions, not all samples are classified correctly.

Sample	Result	Sample	Result
01: Gypsum plaster 0.1%	False	12: Sprayed asbestos	True
02: Tile adhesive 0.3%	False	13: Cardboard	True
03: Gypsum filler 0.5%	True	14: Cushion vinyl	True
04: Machine-applied plaster 1%	True	15: PVC flooring	True
05: Fiber cement	True	16: LitraFlex	False
06: Spacer plate, fiber cement	True	17: Tar paper	True
07: Spacer, fiber cement	False	18: Glass connection kit	False
08: Roofing panel	True	19: Sealing/insulating cord	True
09: Facade panel	True	20: Wall cladding	True
10: Window sill, building panel	True	21: Filler	True
11: Clamping sleeve	False	22: Mortar, crocidolite	True

4.4 Influencing Factors and Limitations

The investigations consistently demonstrated that the detection performance depends on a small number of key factors. The primary determinant is the overall asbestos content: powder-like samples with low concentrations of 0.1% and 0.5% asbestos did not exhibit a detectable absorption band. Due to the limited number of samples in these low-concentration ranges, it has not yet been possible to reliably determine the exact detection limit of the system. Furthermore, the surface condition is highly critical, since this optical method strictly relies on the fibers being exposed at the surface. Consequently, smooth, weathered or soiled surfaces interfere with the measurement, whereas freshly fractured surfaces are significantly more suitable. Implementing a minimal mechanical pre-treatment, such as scraping or breaking the sample on-site, could therefore substantially improve the detection rate. In addition to asbestos content and surface texture, sample moisture and the type of mechanical surface preparation were found to influence the measurement success of the handheld device.

5 CONCLUSION

The results demonstrate that near-infrared spectroscopy is a promising approach for the rapid, on-site screening of asbestos in construction and demolition waste (CDW). Two diagnostic asbestos absorption bands at approximately 1385 nm and 2325 nm were successfully localized using high-resolution line-scanning hyperspectral sensors, allowing the detection task to be reduced to the cost-effective wavelength region below 1700 nm. On this basis, a truly miniaturized handheld point spectrometer (approximately 8 x 8 x 2 cm) equipped with a dedicated mobile application was implemented and tested. While asbestos-free reference materials were classified with 100% reliability, the detection of real, asbestos-containing waste samples heavily depended on the total asbestos content, surface texture, and mechanical sample preparation. Supported by an enlarged dataset, optimized data processing pipelines and extensive field validation, this device has the clear potential to become a practical, low-cost screening tool that significantly supports the safe and sustainable recycling of demolition waste.

REFERENCES

Bonifazi, G., Capobianco, G., & Serranti, S. (2018). Asbestos containing materials detection and classification by the use of hyperspectral imaging. *Journal of Hazardous Materials*, *344*, 981–993. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.11.056

Bonifazi, G., Capobianco, G., & Serranti, S. (2019). Hyperspectral Imaging and Hierarchical PLS-DA Applied to Asbestos Recognition in Construction and Demolition Waste. *Applied Sciences*, *9*(21), Artikel 21. https://doi.org/10.3390/app9214587

Federal Statistical Office in Wiesbaden, report to the BBSR/BBR in Berlin: Entsorgung
asbesthaltiger Abfälle 2002–2007; Herkunft der Abfallmengen in der Bundesrepublik
Deutschland, die dem Überwachungsverfahren unterliegen, Kennziffer VII B/33215100 (2009)

Marzini, L., Osticioli, I., Ciofini, D., Agresti, J., Bellagamba, S., Paglietti, F., Mencaglia, A. A., & Siano, S. (2025). Identification, mapping, and quantification of asbestos minerals in ACM and NOA using NIR-SWIR hyperspectral scan imaging: Preliminary study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *333*, 125893. https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.125893

Serranti, S., & Bonifazi, G. (2020). 20—Detection and classification of asbestos and other contaminants in C&DW by advanced technologies. In F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, F. Colangelo, R. Tuladhar, & A. Koutamanis (Hrsg.), *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling* (S. 407–437). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819055-5.00020-6

Serranti, S., Bonifazi, G., Capobianco, G., Malinconico, S., & Paglietti, F. (2019). Hyperspectral imaging applied to asbestos containing materials detection: Specimen preparation and handling. *Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XV*, *11007*, 124–132. https://doi.org/10.1117/12.2517070

Zholobenko, V., Rutten, F., Zholobenko, A., & Holmes, A. (2021). In situ spectroscopic identification of the six types of asbestos. *Journal of Hazardous Materials*, *403*, 123951. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123951

CONTACT

M.Sc. Felix Kronenwett
felix.kronenwett@iosb.fraunhofer.de
+49 721 6091-411
Visual Inspection Systems (SPR)
Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation IOSB, Fraunhoferstrasse 1, 76131 Karlsruhe, Germany
www.iosb.fraunhofer.de

Detection and Sensor-Based Sorting of Tar containing Road Debris using Mid-Wave-Infrared Hyperspectral Imaging

Paul Bäcker[1], Georg Maier[1] & Thomas Längle[1]
[1)] Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation (IOSB), Karlsruhe, Germany

ABSTRACT: Tar-containing road debris can contain high concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and must therefore be separated from recyclable mineral material. However, PAH-contaminated fractions are often only sparsely characterized by chemical laboratory analysis, which makes selective sorting difficult. In this work, we investigate whether mid-wave infrared (MWIR) hyperspectral imaging can be used for sensor-based sorting of PAH-contaminated road debris. Since destructive chemical analysis is not available for each individual particle, we use the reaction of a PAH indicator spray as a proxy label. Samples are measured before and after spray application using aligned VNIR and MWIR hyperspectral imaging. From the VNIR data, we derive a yellowness-change metric representing the spray response and train a lightweight multilayer perceptron to predict this response from MWIR spectra. Spectral analysis shows pronounced differences between high and low spray-response pixels, particularly around 3300 nm. The trained model is deployed on a real-time sensor-based sorting system and evaluated in sorting experiments with subsequent chemical laboratory analysis of the output fractions. The results show that MWIR-based sorting can substantially reduce the PAH concentration in the accepted material fraction, demonstrating the practical potential of the proposed approach for recycling road debris.

1 INTRODUCTION

Tar-containing road debris generated during road maintenance can contain high concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Due to their carcinogenic properties, contaminated fractions cannot be directly recycled and are often landfilled or thermally treated, resulting in substantial downcycling of valuable mineral material.

In current practice, contamination assessment is typically performed using sparse chemical laboratory analysis (*Managing Reclaimed Asphalt*, 2019; Zhang et al., 2022). Since only a limited number of samples can be analyzed destructively, entire material batches are frequently classified as contaminated once elevated PAH concentrations are detected. This conservative handling significantly reduces recycling efficiency.

Sensor-based sorting systems offer the potential to separate contaminated and uncontaminated material streams on a particle level (Maier et al., 2024). Hyperspectral imaging is particularly promising due to its ability to capture material-specific spectral signatures. In this work, we investigate whether mid-wave infrared (MWIR) hyperspectral imaging can be used for real-time sorting of PAH-contaminated road debris.

A major challenge is the generation of ground-truth labels. Direct chemometric analysis is destructive and cannot be performed for each individual particle. Instead, we utilize the reaction of an established PAH indicator spray as a proxy signal. The spray changes its visible appearance when reacting with PAH-containing material. By combining aligned VNIR and MWIR measurements before and after spray application, we derive proxy labels describing the spray response and train a lightweight regression model to predict this response directly from MWIR spectra.

The contributions of this work are:

- Development of a multi-sensor acquisition pipeline for aligned before/after measurements of PAH spray application.
- A weakly supervised proxy-label approach based on VNIR yellowness change.
- Demonstration that MWIR spectra contain information correlated with spray response.
- Deployment on a real-time sensor-based sorting system.
- Experimental validation showing substantial reduction of PAH concentration in the accepted material fraction.

2 ACQUISITION AND LABEL GENERATION

2.1 Multi-Sensor Acquisition Pipeline

To generate aligned measurements across multiple sensing modalities, we developed a dedicated acquisition pipeline. Samples were fixed to a rigid carrier plate that could be repeatedly mounted onto different linear stage systems with reproducible positioning.

Each sample was first measured using VNIR and MWIR hyperspectral imaging. Afterwards, PAH indicator spray was applied and the measurements were repeated. The rigid mounting enabled highly consistent positioning before and after spray application.

Remaining spatial misalignments between sensors were compensated using homography-based image registration based on manually selected reference points.

The MWIR measurements were acquired using a Specim FX50 camera and infrared illumination using two 1 kW thermal emitters. VNIR measurements were only used for proxy-label generation, whereas MWIR data served as the primary sensing modality for later sorting experiments.

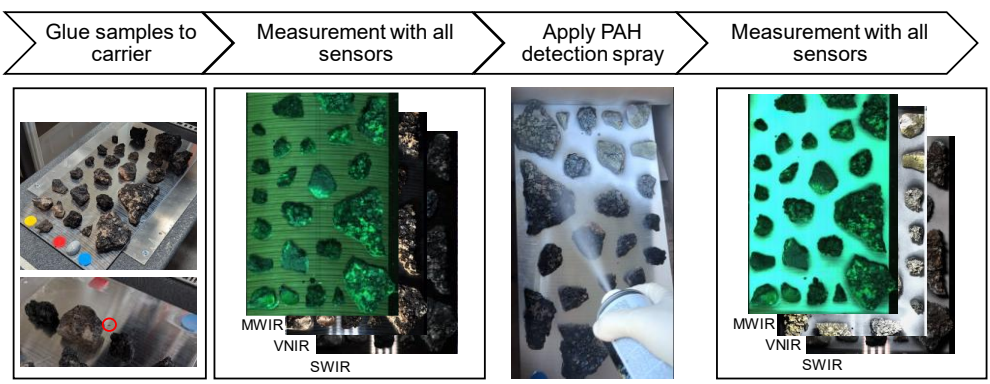


Fig. 1: Data Aquisition Pipeline. From left to right: Sample carriers with highlighted connection pin, Example data after first data capture, application of PAH detection spray, Example data capture with PAH detection spray.

2.2 Proxy Label Generation using PAH Spray

Direct determination of PAH concentration requires destructive chemical analysis and is therefore unsuitable for dense pixel-wise labeling. Instead, we utilize the reaction of a commercially available PAH indicator spray as a proxy signal.

The spray changes its visible appearance from white to yellow in the presence of PAH-containing material. To quantify this effect, RGB visualizations were generated from the VNIR hyperspectral data before and after spray application. Both measurements were transformed into HSV color space and a yellowness metric was computed based on hue values in the yellow spectral range weighted by saturation.

The final proxy label was defined as the difference in yellowness before and after spray application. This difference isolates the visual response caused by the spray reaction.

It should be noted that the proposed yellowness score is not a direct measurement of PAH concentration but rather a proxy for spray reaction intensity.

3 SPECTRAL ANALYSIS AND MODEL TRAINING

3.1 Spectral Analysis

For an initial analysis, all foreground pixels were separated according to their spray-response intensity. Pixels with high and low proxy response were separated at the median value and their mean MWIR spectra were analyzed.

Fig. 2: Spectral comparison for pixels with different responses to PAH spray. High response corresponds to a strong change in color. For reference, the spectrum of naphtalene is plotted as an example of a PAHFig. 2 shows the resulting spectra. Pronounced spectral differences can be observed around 3250 nm, where high-response pixels exhibit a stronger absorption feature compared to low-response pixels. This wavelength region corresponds to known absorption characteristics of aromatic hydrocarbons and PAH-related compounds.

Spectral regions at the boundaries of the sensor range were excluded due to reduced signal-to-noise ratio. Additionally, wavelengths between 4100 nm and 4500 nm were removed because they overlap with atmospheric CO_2 absorption bands.

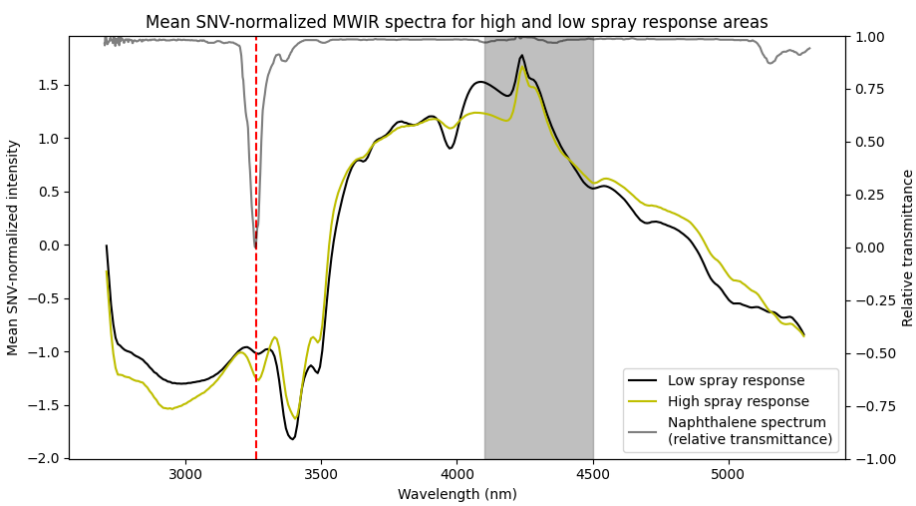


Fig. 2: Spectral comparison for pixels with different responses to PAH spray. High response corresponds to a strong change in color. For reference, the spectrum of naphtalene is plotted as an example of a PAH. The range between 4200nm and 4500nm is ignored due to the uncontrolled influence of CO2 in this wavelength region.

3.2 Regression Model

To predict spray response directly from MWIR spectra, we trained a lightweight multilayer perceptron (MLP) consisting of two hidden layers with ReLU activations. We intentionally selected a compact architecture to enable deployment on real-time industrial sorting hardware. As a baseline, we additionally evaluated linear regression. The MLP achieved a lower prediction error than linear regression, indicating that nonlinear relationships between MWIR spectra and spray response exist.

4 REAL-TIME SORTING SYSTEM

The trained regression model was deployed on a sensor-based sorting system operating on a conveyor belt. To achieve real-time capability, the spectral range was reduced to the most relevant wavelength bands identified during spectral analysis.

Measurements were acquired using a reduced region of interest consisting of 48 spectral bands (corresponding to a range from 3101nm to 3495nm) and 200 spatial pixels, enabling acquisition rates of up to 500 fps with an exposure time of 1.5 ms.

The inference pipeline included hot/cold referencing, threshold-based foreground masking, and ONNX-based model inference. Objects exceeding a configurable spray-response threshold were deflected using pneumatic valve arrays, yielding separate accepted and rejected material fractions.

5 EXPERIMENTS AND RESULTS

5.1 Laboratory Regression Experiments

Laboratory experiments were performed using separate train and test sample sets.
We used 64.000.000 individual spectra in our train set and 25.000.000 samples for validation.
We compared linear regression against the proposed lightweight MLP.

The MLP achieved lower prediction error compared to linear regression, suggesting that nonlinear spectral relationships contribute to the prediction task while remaining computationally feasible for real-time deployment. Fig. 3 qualitatively shows the model performance. The samples that react strongest to PAH detection spray can be clearly recognized in the model prediction, which is solely based on the pre-spray MWIR data.

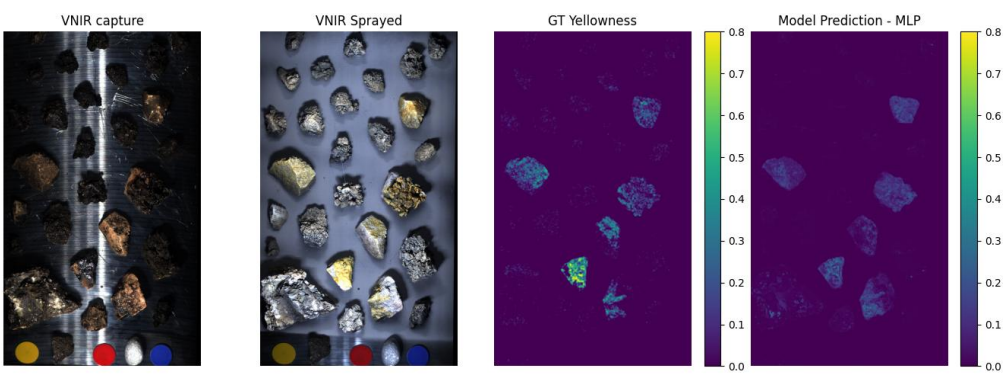


Fig. 3: Qualitative analysis of model performance. The samples that react strongly to the detection spray can easily be recognized in the model prediction (based on raw MWIR data)

5.2 Sensor-Based Sorting Experiments

The trained model was subsequently evaluated in real sorting experiments. We used our in-house modular sorting system FlexSort for implementing the tests. Fig. 4 shows the setup used for the sorting experiments. The FX50 was enclodes in an air-conditioned enclosure with a germanium glass window, which is transparent in the required spectral region. We restricted the sorting width to 15cm in this preliminary experiment, which allowed us to use an available valve array with increased throughput. The sensor and processing pipeline is, however capable of scanning the entire width of the conveyor belt (1m). We used 5bar pressure input.

Three sorting thresholds were investigated. For each threshold, both output fractions were chemically analyzed for their PAH concentration.

Fig. 5 Shows the outputs of the sorting experiments both qualitatively and quantitively. The experiments show that the proposed system can substantially reduce PAH concentration in the accepted material fraction. For the highest sorting threshold, the accepted fraction achieved PAH concentrations below 60 mg/kg, while highly contaminated fractions were successfully concentrated in the rejected stream. Tab. 1 shows the full results including the overall masses of the output fractions.

These results demonstrate that MWIR hyperspectral imaging can provide sufficient information for practical sensor-based sorting of PAH-contaminated road debris.

The results further suggest, that parameter tuning can influence rejection rates of output fractions, although the output suffers from significant noise.

6 CONCLUSION

We presented a methodology for sensor-based sorting of PAH-contaminated road debris using MWIR hyperspectral imaging.

A proxy-label approach based on PAH spray response enabled the generation of dense supervision signals without requiring destructive chemical analysis for every sample. Spectral analysis revealed characteristic differences between low and high spray-response regions, particularly around 3300 nm.

A lightweight regression model was successfully deployed on a real-time industrial sorting system and demonstrated substantial reduction of PAH concentration in the accepted material fraction. The presented approach demonstrates the practical potential of MWIR hyperspectral imaging for improving recycling efficiency of road demolition material.



Fig. 4: Sorting Setup. From left to right: Material input via vibrational feeder, Sensor examination using FX50 MWIR camera and heating module, sorting stage with pneumatic valve array and separation edge (arrows indicate possible material trajectories).

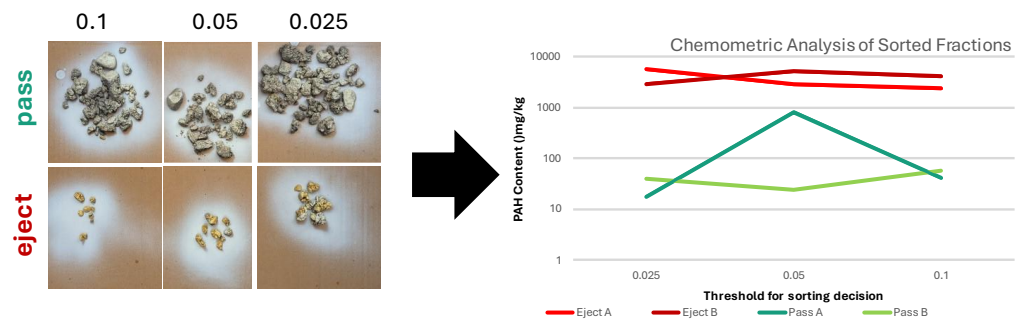


Fig. 5: Results of Sorting experiments. Left: Qualitative results (samples not used for chemometric analysis). Right: PAH content of output fractions.

Tab. 1 Full analysis of output fractions

	Threshold	Eject A	Eject B	Pass A	Pass B
PAH content (mg/kg)	0.025	5543.3	2886.3	17.5	39.9
	0.05	2848.7	5100.3	806.5	24.3
	0.1	2358.1	4076	40.8	55.6
Mass (g)	0.025	59.2	44.7	347.3	235.3
	0.05	72.9	39.9	366.6	297.5
	0.1	22.6	24.3	292.9	198.9

REFERENCES

Maier, G., Gruna, R., Längle, T., & Beyerer, J. (2024). A Survey of the State of the Art in Sensor-Based Sorting Technology and Research. *IEEE Access*, *PP*, 1–1. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3350987

Managing Reclaimed Asphalt. (2019). Association of Directors of Environment, Economy, Planning and Transport (ADEPT). https://adeptnet.org.uk/documents/managing-reclaimed-asphalt-2019

Zhang, Y., Yuan, L., He, S., Tao, H., Xie, W., Zhang, X., Ren, X., Jiang, T., Li, L., & Zhu, Z. (2022). Contemporary Research Progress on the Detection of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(5). https://doi.org/10.3390/ijerph19052790

Detektion von Holzschutzmitteln mit XRF-Sensorzeile - Implikation für die Inline-Sortierung von Altholzstoffströmen

Moritz Ottenweller
Fraunhofer Institut für integrierte Schaltungen IIS, Entwicklungszentrum Röntgentechnik EZRT, Fürth, Deutschland

KURZFASSUNG: Die Arbeit untersucht den Einsatz der Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) zur sensorbasierten Sortierung von Altholz. Ziel ist es, kontaminierte Holzfraktionen mit Holzschutzmitteln bereits vor der energetischen Verwertung sicher zu erkennen. Dafür wurde ein Laboraufbau mit Röntgenröhre, drei energiedispersiven SDD-Detektoren und einem Förderbandsystem eingerichtet. Die Messgeometrie mit Winkeln und Abständen wurde systematisch variiert, um ihren Einfluss auf Signal und Streuprozesse zu untersuchen. Als Proben dienten präparierte Nadelholzstücke mit definierten Konzentrationen von Kupfer, Chrom, Blei, Cadmium und Chlor sowie unbehandeltes Referenzholz. Es wurden statische Messungen mit Integrationszeiten bis zu 1 Sekunde sowie mit Integrationszeiten von 20 Millisekunden bei bewegtem Förderband durchgeführt. In den statischen Messungen konnten die Kα-Peaks bzw. Lα-Peaks von Kupfer, Chrom, Blei und Cadmium eindeutig nachgewiesen und von unbehandeltem Holz unterschieden werden. In den schnellen Inline-Messungen blieben diese für die meisten Konzentrationen weiterhin erkennbar, während Chlor nur unter günstigsten Geometrien sicher detektierbar war. Insgesamt zeigt sich, dass XRF grundsätzlich für die Inline-Sortierung von Altholz geeignet ist, jedoch eine robuste Geometrie und leistungsfähige Auswertealgorithmen erfordert.

1 EINLEITUNG

Holz und Holzwerkstoffe sind als nachwachsende Rohstoffe ein wichtiger Bestandteil einer ressourcenschonenden und nachhaltigen Wirtschaft. Im Sinne der Kaskadennutzung kommt der stofflichen Verwertung von Altholz eine zentrale Bedeutung zu, da sie eine mehrfache Nutzung des Rohstoffs vor der energetischen Verwertung ermöglicht (Besserer, Troilo, Girods, Rogaume, & Brosse, 2021).

Eine wesentliche Herausforderung stellt die Identifikation und Abtrennung von kontaminierten Holzfraktionen dar. Die Altholzverordnung in Deutschland definiert Grenzwerte für bestimmte Inhaltsstoffe, deren Überschreitung eine stoffliche Wiederverwendung ausschließt (Bundesministerium der Justiz, 2002). Holzschutzmittel auf Basis von Kupfer-, Chrom-, Blei-, Cadmium- oder chlorhaltigen Verbindungen können sowohl ökologische als auch gesundheitliche Risiken darstellen und müssen daher sicher erkannt werden.

Konventionelle Sortierverfahren, insbesondere optische Sensorsysteme wie RGB- oder NIR-basierte Ansätze, stoßen bei der Detektion dieser Kontaminanten an ihre Grenzen, da die relevanten Elemente häufig nur in geringen Konzentrationen vorliegen und keine eindeutigen optischen oder molekularen Signaturen aufweisen. (Mancini & Rinnan, 2023)

Die Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) bietet hingegen die Möglichkeit, Elemente direkt und zerstörungsfrei anhand ihrer charakteristischen Fluoreszenzstrahlung nachzuweisen. Während XRF in zahlreichen industriellen Anwendungen etabliert ist, wurde ihr Einsatz zur Detektion von Holzschutzmitteln unter Inline-Bedingungen bisher kaum untersucht (Jenkins, 1999).

Ziel dieser Arbeit ist es, die Eignung der XRF-Technologie in Form einer XRF-Sensorzeile für die sensorbasierte Sortierung von Altholz zu bewerten. Aufbauend auf experimentellen

Untersuchungen mit einem prototypischen Messsystem wird analysiert, inwieweit eine Detektion relevanter Elemente unter realitätsnahen Randbedingungen möglich ist.

2 METHODIK

2.1 Versuchsaufbau

Für die Untersuchung wurde ein Laboraufbau mit einer Röntgenröhre (CometHP-225), einem Detektionssystem mit drei energiedispersiven Silizium-Drift-Detektoren (SDD) und einem Förderbandsystem realisiert.

Die geometrischen Randbedingungen, welche je nach Objektgeometrie und Röhrenspektrum einen vor- oder nachteiligen Einfluss haben können, wurden durch Variation der Winkel zwischen Strahlquelle, Probe und Detektor als auch die Abstände zur Förderbandoberfläche systematisch untersucht und optimiert. Ziel war es, den Einfluss von Streuprozessen sowie die resultierende Photonenstatistik zu untersuchen.

Für die in dieser Arbeit vorgestellten Messergebnisse wurden gemäß Abb.1 ein Winkel von $\alpha = 75°$, ein Abstand $d_2 = 45cm$ und ein Abstand $d_1 = 12cm$ gewählt. Der Abstand d_1 ergibt zusammen mit dem vor den XRF-Spektrometern angebrachten Kollimatoren jeweils ein Field Of View mit der Breite von $5\ cm$. Die einzelnen Sichtfelder sind analog zu einem Zeilensensor nebeneinander angeordnet.

Durch das Förderband konnten neben statischen Messungen auch Untersuchungen unter quasi-inline Bedingungen durchgeführt werden, bei denen sich die Proben relativ zum Messsystem bewegen.

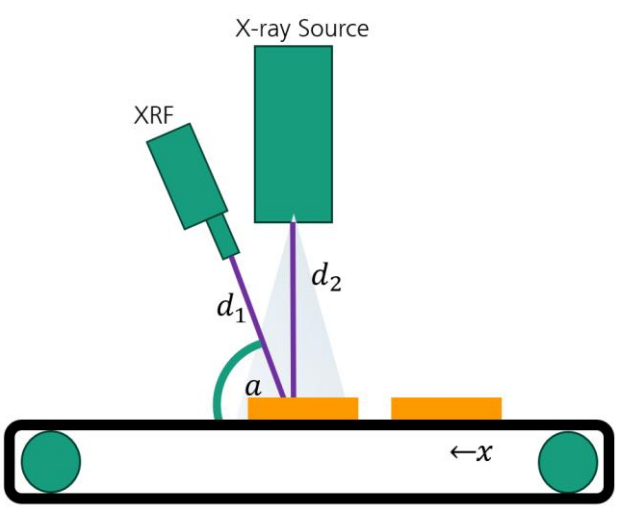


Abb. 1: Schematischer Aufbau mit den für die XRF-Messungen wichtigen Parametern.

2.2 Probenmaterial

Für die experimentellen Untersuchungen wurden präparierte Holzproben mit definierten Konzentrationen typischer Holzschutzmittelbestandteile verwendet. Als Referenzmaterial diente unbehandeltes Nadelholz.

Die Proben wurden mit Verbindungen der Elemente Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer und Chlor dotiert. Diese Elemente repräsentieren sowohl historische als auch moderne Holzschutzmittel und decken einen Großteil der laut Altholzverordnung relevanten Stoffklassen ab.

Für die Proben wurden Lösungen mit verschiedenen Konzentrationen der Holzschutzmittel/Verbindungen hergestellt (Tab. 1), in welche die Holzplättchen dann jeweils zur Hälfte getaucht wurden.

Dies ermöglicht eine Untersuchung der Nachweisgrenzen sowie der Signalstabilität unter kontrollierten Bedingungen. Die Leistungsfähigkeit des Sensorsystems konnte so unabhängig von der natürlichen Heterogenität realer Altholzströme bewertet werden.

Tab. 1: Übersicht über die Holzproben.

Element	In Verbindung	Konzentration [% der Verbindung in Lösung]
Blei	Bleiweiß	2% - 5%
Cadmium	Cadmiumsulfid	2% - 20%
Chrom	Kaliumdichromat	0,0005% - 0,5%
Kupfer	Kupfersulfat	0,01% - 2%
Chlor	Pentachlorphenol	0,0005% - 0,5%

2.3 Messstrategie und Datenerfassung

Die Messungen wurden in zwei Stufen durchgeführt, um sowohl die grundlegende Detektionsfähigkeit als auch die Eignung für Inline-Anwendungen zu untersuchen.

Zunächst erfolgten statische Messungen mit Integrationszeiten t_{int} im Bereich von 100 Millisekunden bis 1 Sekunde. Diese Referenzmessungen dienten der Bestimmung charakteristischer Spektren und der Bewertung der Nachweisbarkeit der untersuchten Elemente.

Darauf aufbauend wurden Messungen mit reduziertem t_{int} durchgeführt, um Bedingungen sensorbasierter Sortieranlagen zu simulieren. Hierbei wurden Integrationszeiten von $t_{int} = 20\ ms$ realisiert, was bei einer effektiven Messfläche von etwa 5 cm Durchmesser je SDD einer Förderbandgeschwindigkeit von 2,5 m/s entspricht.

Die spektralen Daten wurden mit einem Energiekanalbreite von etwa 25 eV im Energiebereich bis 30 keV aufgenommen. Die anschließende Datenverarbeitung umfasste eine Baseline-Korrektur, Rauschunterdrückung sowie die Identifikation charakteristischer Elementpeaks.

Für die Auswertung wurden einfache Intensitätsvergleiche und Schwellwertvergleiche der relevanten Peaks eingesetzt. Eine weitergehende Optimierung der Auswertealgorithmen war nicht Gegenstand dieser Arbeit, sondern ist Teil zukünftiger Untersuchungen.

3 ERGEBNISSE

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen die grundsätzliche Eignung der XRF-Sensorzeile zur Identifikation von mit Holzschutzmitteln behandelten Holzproben.

3.1 Statische Messungen

Bei den statischen Messungen mit $t_{int} = 100\,ms$ bis $t_{int} = 1\,s$ konnten charakteristische Elementpeaks der untersuchten Proben eindeutig detektiert werden. Insbesondere für Kupfer, Cadmium, Blei und Chrom zeigten sich deutlich ausgeprägte Kα/Lα-Peaks, während unbehandelte Referenzproben diese Peaks nicht aufwiesen. Abb. 2 zeigt XRF-Spektren von mit Kupfersulfat behandeltem Holz (Rot) und sauberem Holz (Grün) bei $t_{int} = 1\,s$. Mit steigender Konzentration nimmt die Intensität der charakteristischen Kupferpeaks erwartungsgemäß zu. Zusätzlich sind Beiträge des Förderbands im Spektrum sichtbar, die jedoch eindeutig von den elementspezifischen Signalen unterschieden werden können. Diese Ergebnisse belegen die prinzipielle Nachweisbarkeit relevanter Holzschutzmittelbestandteile unter idealisierten Messbedingungen.

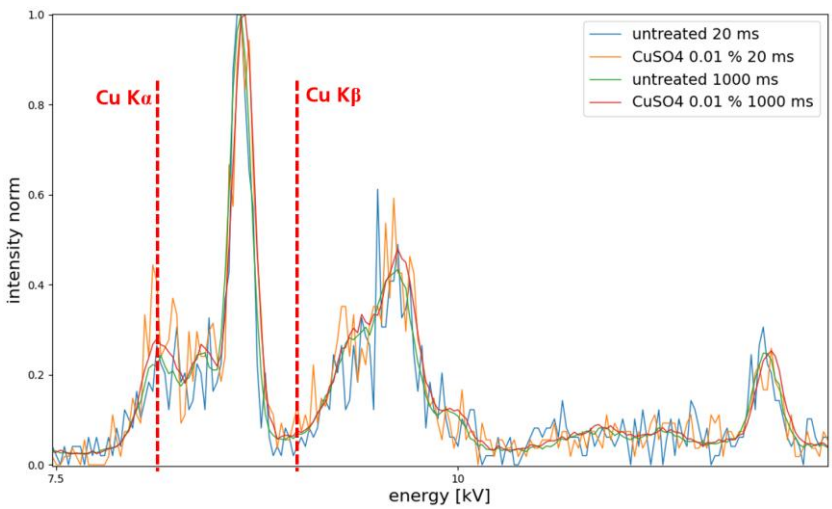


Abb. 2: XRF-Messungen von mit Kupfersulfat behandelten und unbehandelten Proben jeweils bei $t_{int} = 20\,ms$ und $t_{int} = 1000\,ms$ im Vergleich. Besonders relevant ist die in rot markierte Energie für Kupfer.

3.2 Messungen mit reduzierter Integrationszeit

Zur Bewertung der Inline-Tauglichkeit wurde die Integrationszeit schrittweise reduziert. Für $t_{int} = 20\,ms$ zeigte sich erwartungsgemäß eine deutliche Abnahme des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) infolge der reduzierten Photonenstatistik (Abb. 2 blaue und orangefarbene Kurve). Dennoch bleiben die charakteristischen Peaks von Kupfer, Blei und Cadmium für alle Konzentrationen in Tab. 1 identifizierbar und somit eine Differenzierung von unbehandeltem Holz möglich. Für Chrom war die Probe mit 0,5% Kaliumdichromat von unbehandeltem Holz unterscheidbar. Die kleineren Konzentrationen waren jedoch nicht mehr feststellbar. Für Chlor zeigte sich grundsätzlich eine deutlich geringere Signalqualität. Eine eindeutige Unterscheidung war hier nur bei geringstem Abstand möglich, was auf die Fluoreszenzausbeute sowie verstärkte Absorptionseffekte im Material und der Umgebungsluft zurückzuführen ist.

3.3 Bewertung und inline-Bedingungen

Die Messungen mit reduzierter Integrationszeit entsprechen bei einer Messfläche von etwa 5 cm Durchmesser einer Förderbandgeschwindigkeit von 2,5 m/s und stellen somit eine Annäherung an reale Sortierbedingungen dar. Die Ergebnisse zeigen, dass trotz eingeschränkter Zählstatistik eine ausreichende Trennung zwischen Signal und Rauschen für relevante Elemente möglich ist. Damit konnte nachgewiesen werden, dass die Detektion typischer Holzschutzmittelbestandteile prinzipiell auch unter Inline-Bedingungen realisierbar ist. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Signalqualität stark von den geometrischen Randbedingungen sowie von materialspezifischen Eigenschaften beeinflusst wird.

4 DISKUSSION

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Röntgenfluoreszenzanalyse in der Lage ist, Holzschutzmittelbestandteile wie Kupfer, Chrom, Cadmium und Blei auch bei kurzen Integrationszeiten nachzuweisen. Für diese Elemente blieben die zugehörigen Kα/Lα-Peaks auch bei $t_{int} = 20\ ms$ über eine schwellwertbasierte Auswertung detektierbar, sodass behandelte und unbehandelte Proben klar unterschieden werden konnten. Damit ist eine Voraussetzung für den Einsatz in sensorbasierten Sortierprozessen erfüllt.

Für eine Übertragung in die industrielle Anwendung sind jedoch mehrere Randbedingungen zu beachten. Die verfügbare Messzeit wird durch die Förderbandgeschwindigkeit und gewünschte räumliche Auflösung festgelegt und begrenzt die Photonenzahl. Eine Abnahme des SNR bei $t_{int} = 20\ ms$ verdeutlicht, dass die Auswertemethoden robust mit schwachen Signalen umgehen müssen. Klassifikationsverfahren müssen folglich auf eine erhöhte Varianz in der Zählstatistik ausgelegt werden.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Geometrie der Messanordnung. In der Laborumgebung können Winkel und Abstände gezielt optimiert werden, während reale Altholzströme variierende Partikelgrößen, -formen und -lagen aufweisen. Dies beeinflusst sowohl die Anregung als auch die Detektion der Fluoreszenzstrahlung. Für eine industrielle Umsetzung ist daher eine Messgeometrie erforderlich, die gegen diese Variabilität unempfindlich ist oder deren Auswirkungen in der Auswertung explizit berücksichtigt werden.

Im Kontext sensorbasierter Sortiersysteme ist die XRF-Technologie nicht als punktuelles Messverfahren, sondern als flächenhaftes Sensorsystem zu betrachten. Eine XRF-Sensorzeile ermöglicht die parallele Erfassung breiter Materialströme und ist damit ein Ansatz für die Integration in kontinuierliche Sortieranlagen. Dabei ergeben sich Anforderungen an Detektordichte, Synchronisation mit der Materialbewegung sowie Datenrate und Echtzeitverarbeitung, die bereits im Anlagenlayout zu berücksichtigen sind.

Im Vergleich zu etablierten Sensortechnologien ergänzt XRF vorhandene Systeme. Optische Verfahren wie NIR und RGB liefern Informationen zu Form, Oberfläche und organischen Strukturen, während XRT-Systeme Dichte- und Absorptionskontraste abbilden. XRF stellt dagegen direkt elementare Informationen bereit und ist dort sinnvoll, wo definierte Grenzwerte für bestimmte Elemente einzuhalten sind. Die eingeschränkte Sensitivität gegenüber leichten Elementen wie Chlor macht deutlich, dass eine Kombination mit anderen Sensorprinzipien sinnvoll ist.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass weniger die elementare Detektierbarkeit, sondern die stabile Umsetzung unter realen Prozessbedingungen die größte Herausforderung darstellt. Die Ergebnisse liefern eine Grundlage für die Auslegung einer XRF-Sensorzeile und ihre Einbindung in bestehende Sortierinfrastrukturen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die XRF-Technologie ein hohes Potenzial für die Erweiterung bestehender sensorbasierter Sortiersysteme besitzt. Die Ergebnisse dieser Arbeit bilden eine wichtige Grundlage für die weitere Entwicklung hin zu einem industrienahen Sensorsystem. Die größten Herausforderungen liegen dabei weniger in der grundsätzlichen Detektierbarkeit, sondern vielmehr in der robusten Umsetzung unter realen Prozessbedingungen sowie in der Integration in bestehende Sortierinfrastrukturen.

LITERATURVERZEICHNIS

Besserer, A., Troilo, S., Girods, P., Rogaume, Y., & Brosse, N. (2021). Cascading recycling of wood waste: A review. *Polymers, 13*(11), S. 1752. doi:https://doi.org/10.3390/polym13111752

Bundesministerium der Justiz. (2002). *Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV).* Bonn: Bundesanzeiger Verlag.

Jenkins, R. (1999). *X-ray fluorescence spectrometry.* New York: Wiley.

Mancini, M., & Rinnan, Å. (2023). Classification of waste wood categories according to the best reuse using FT-NIR spectroscopy and chemometrics. *Analytica Chimica Acta, 1275*. doi:https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341564

KONTAKT

Moritz Ottenweller
moritz.ottenweller@iis.fraunhofer.de
+49 911 58061-7689
Sortier- und Laborsysteme
Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
Flugplatzstr. 75 | D-90768 Fürth

Alignment von Sensordaten für die Sensorfusion in der Echtzeit-Abfallanalytik und sensorgestützten Sortierung

Karim Khodier[1], Martin Leitgeb[2] & Rainer Saga[2]
[1)] axtesys GmbH, Prozessdigitalisierung, Graz, Österreich
[2)] axtesys GmbH, Systemintegration, Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Die digitale Transformation der Abfallwirtschaft ist ein wesentlicher Motor verbesserter mechanischer Aufbereitung und damit qualitätsgesicherter Konzentrate als Beitrag zu erhöhten Recyclingraten wie von der EU vorgeschrieben. Eine wesentliche Komponente digital optimierter, intelligenter Abfallaufbereitung ist die Zurverfügungstellung hochwertiger Sensordaten, insbesondere auch über den Stoffstrom. Die Arbeit behandelt die hierbei entstehende Herausforderung der Fusion multimodaler Daten verschiedener Sensoren unterschiedlicher Positionierung, Auflösung und Abtastrate anhand des Ansatzes elliptischer Approximation.

1 EINLEITUNG

Die Transformation von einer linearen Wirtschaft hin zu einer echten Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) gehört zu den drängendsten ökologischen und technologischen Herausforderungen unserer Zeit. Die Bedeutung der Transformation spiegelt sich auch in entsprechenden rechtlichen Rahmenbedingungen wider. So verlangt beispielsweise das Kreislaufwirtschaftpaket der europäischen Union (European Union, 2018) graduell steigende Recyclingraten für Siedlungsabfälle und weitere Abfallgruppen.

Im Bereich der Siedlungsabfälle ist hier beispielsweise eine Recyclingrate von 55% seit 2025, 60% ab 2030 und 65% ab 2035 vorgeschrieben – in jedem einzelnen Mitgliedsstatt individuell betrachtet. Zugleich zeigen die aktuellsten verfügbaren Daten von 2024 (Eurostat, 2026) eine durchschnittliche Recyclingrate von nur 48,1% im Jahr 2024, während einzelne Mitgliedsstaaten deutlich darunter liegen: z.B. Bosnien und Herzegowina mit 1,1% oder Zypern mit 15,8%.

Was sich zeigt ist ein enormer Bedarf weiterer Maßnahmen zur Steigerung der Recycling-Raten. Dies betrifft aber nicht nur Staaten mit derzeit niedrigen Raten, bei denen etablierte Maßnahmen aus hier fortgeschritteneren Staaten noch viel Potential innehaben, sondern auch die Staaten oberhalb des derzeitigen EU-Durchschnitts.

Hochwertiges Recycling braucht dabei hochwertige Konzentrate. Diese entstehen im ersten Schritt der Verarbeitungskette: in der mechanischen Behandlung. Dieser Schritt, der hoch fluktuierende, heterogene, kaum definierte Eingangsmaterialien verarbeitet um diese dann zu möglichst definierten, qualitätsgesicherten Konzentraten zu verarbeiten birgt große Potentiale in der Steigerung von Qualität und Effizienz durch Anwendung von Digitalisierungspotentialen für die Umsetzung einer sogenannten Smart Waste Factory (Khodier, 2021). Gemeint ist damit eine Anlage, die basierend auf Daten, Algorithmen und ansteuerbaren Aktuatoren dynamisch auf den sich veränderlichen Eingangsstrom in die Anlage reagiert. Diese Vision wird mittlerweile seit einigen Jahren beforscht (z.B. Sarc et al., 2019).

2 PROBLEMSTELLUNG

Eine Kernkomponente intelligenter Aufbereitung ist die Bereitstellung hochwertiger Daten – Daten über Maschinenzustände zum einen, vor allem aber (und hier liegt eine Kernherausforderung) hochwertige Daten über den Stroffstrom.

Stroffstromdaten werden mit diversen Sensoren gewonnen. Erst die Kombination mehrerer Sensoren erlaubt tiefgehende Einblicke in den Abfallstrom, die zum einen in Monoschichten in der sensorgestützten Sortierung angewandt werden, zum anderen aber auch zur Überwachung von Stroffströmen für eine dynamische Anlagenregelung.

Diese Sensoren, etwa Nah-Infrarot(NIR)-Sensorik für die Materialart oder Laser-Sensoren für das von oben betrachtete scheinbare Volumen, weisen unterschiedliche Detektionsfrequenzen und Auflösungen (räumliche Ausdehnung in mm pro Pixel) auf und müssen größtenteils versetzt angebracht werden, weil zum Beispiel die Beleuchtungsbedingungen für NIR-Sensorik, Sensoren für sichtbares Licht und Laser-Sensoren jeweils andere sein müssen.

Betrachtet man rein die entstehenden Daten, jeweils Datenzeilen, die in den Spalten zum Beispiel die Höhe oder die Materialklassifizierung enthalten, so sieht ein und dasselbe Partikel auf dem Förderband schlussendlich wie drei Partikel die zu einer unterschiedlichen Zeit (Sensorversatz) erscheinen und eine unterschiedliche Geometrie aufweisen (aufgrund von Auflösung und Frequenz) aus (siehe Abb. 1).

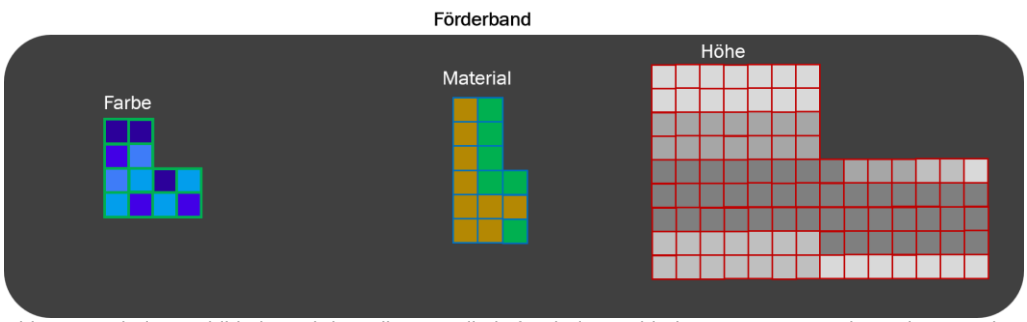


Abb. 1: Erscheinungsbild ein und desselben Partikels für drei verschiedene Sensoren entlang eines Förderbands.

Thema diese Arbeit ist daher schlussendlich die Untersuchung der Zusammenführung dieser Datensätze in einer Art, sodass auf der echten Partikelgeometrie je das Messergebnis jedes der Sensoren zugeordnet werden kann (siehe Abb. 2)

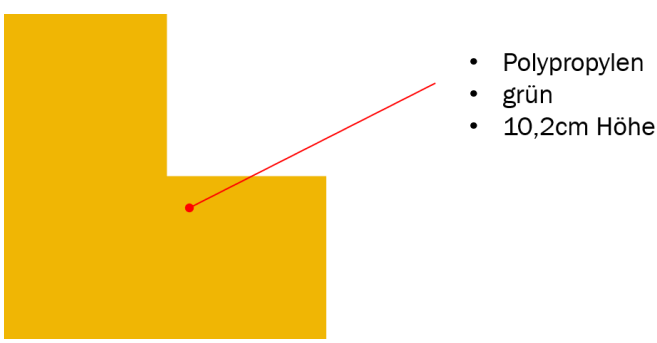


Abb. 2: Zuordnung der Messdaten mehrerer Sensoren zu einem Oberflächenpunkt eines Partikels.

3 SENSORIK

3.1 Farben (RGB-Sensorik)

Optische RGB-Sensoren erfassen die Farbwerte und Oberflächenstrukturen der Objekte im sichtbaren Spektrum. Dies ermöglicht die Differenzierung von Partikeln nach Farbchargen sowie die Erkennung von Transluzenz oder Etikettenrückständen, was ein wesentliches Qualitätskriterium für das finale Rezyklat darstellt.

3.2 Molekulare Identifikation (NIR-Sensorik)

Die quantitative Materialbestimmung der Polymere erfolgt über Nahinfrarotspektroskopie (NIR). Da unterschiedliche Kunststoffe (wie PET, PE-HD oder PP) spezifische molekulare Schwingungsbanden im Infrarotbereich aufweisen, erlaubt die Auswertung der reflektierten NIR-Spektren eine exakte chemische Identifikation in Millisekunden.

Sensordaten:
- Line Camera
- 4-bit Integer -> 16 Klassen
- Jeder Wert repräsentiert eine Klasse

3.3 Geometrische Vermessung (Tiefensensorik 3D)

Ergänzend wird ein kombinierter 3D-Sensor eingesetzt:
- Die 3D-Sensorik (z. B. via Time-of-Flight oder Lasertriangulation) erfasst das Volumenprofil und die Materialdicke, um die Masse der Objekte abzuschätzen und die Flugbahn beim späteren Ausblasprozess zu berechnen.

3.4 Elektromagnetische Detektion (Metallsensorik)

Um Fehlwürfe und Schäden an den Mahlwerken nachgelagerter Recyclingstufen zu verhindern, detektiert ein induktiver Metallsensor im Verbund metallische Verunreinigungen (z. B. Aluminiumfolien oder Verbundkronkorken) innerhalb des Kunststoffstroms.

Sensordaten:
- Line Camera
- 1-bit Boolean -> 2 Klassen
- 0 = kein Metall, 1 = Metall

4 ANSATZ

In der modernen Umfelderfassung ist die Fusion komplementärer Sensordaten essenziell, um robuste Objektmodelle zu generieren. Eine der zentralen Herausforderungen der Sensor-Fusion liegt in der recheneffizienten und mathematisch präzisen Repräsentation von Objektgeometrien im dreidimensionalen Raum. Während klassische Bounding Boxes bei unvollständigen Punktwolken oder Verdeckungen oft instabile Schätzungen liefern, bietet die geometrische Approximation mittels Ellipsen (siehe Abb. 3) signifikante Vorteile.

Das mathematische Prinzip beruht darauf, die räumliche Ausdehnung und Orientierung eines Objekts über seine Kovarianzmatrix zu beschreiben. Durch den Einsatz von Algorithmen wie der Hauptkomponentenanalyse oder erweiterten Kalman-Filtern lassen sich unstrukturierte Sensordaten direkt in eine elliptische Form überführen. Diese Repräsentation spiegelt die inhärente

Messunsicherheit der Sensoren perfekt wider: Die Halbachsen der Ellipse korrespondieren direkt mit den Varianzen der Positionsbestimmung entlang der Objektachsen.

In der Fusionsarchitektur ermöglicht dieser Ansatz eine hochgradig performante Datenassoziation. Mittels Distanzmaßen wie der Mahalanobis-Distanz, die die geometrische Form und Ausrichtung der Ellipsen berücksichtigt, können Messpunkte verschiedener Sensoren weitaus präziser einem bereits bestehenden Track zugeordnet werden als durch rein euklidische Metriken.

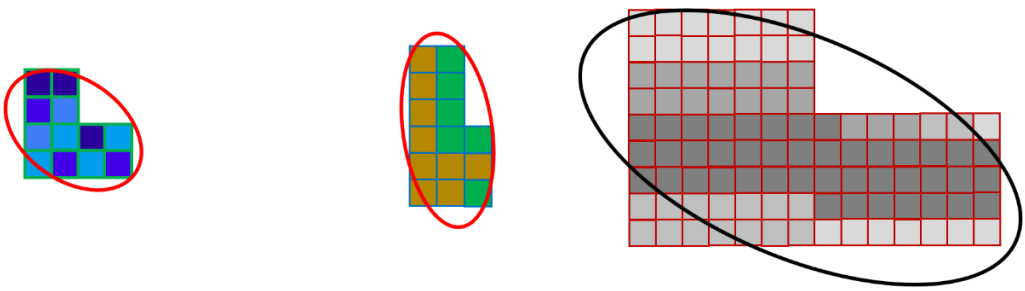


Abb. 3: Elliptische Approximation

5 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Fusion multimodaler Sensordaten ist essentiell für die sensorbasierte Charakterisierung von Abfallströmen in Anlagen. Der vorliegende Beitrag beschreibt einen Ansatz dafür mittels elliptischer Approximation, an dessen praktischer Untersuchung im Rahmen eines industriellen Entwicklungsprojekts axtesys GmbH mitgewirkt hat.

LITERATURVERZEICHNIS

Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management - A review. Waste Management 95, 476–492. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.035.

Europäische Union (2018). Directive 2018/851 of the European parliament and oft he council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste

Eurostat (2026). Recycling rate of municipal waste. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_11_60/default/table zuletzt geprüft: 02.07.2026

Khodier (2021). Empirical modeling fort he optimized operation and real-time control of coarse shredders for mixed commercial waste. Dissertation an der Montanuniversität Leoben.

Sarc, R., Curtis, A., Kandlbauer, L., Khodier, K., Lorber, K.E., Pomberger, R. (2019).

KONTAKT

DI Dr.mont. Karim Khodier
karim.khodier@axtesys.at
+43 660 1052621
Project Owner
axtesys GmbH
www.axtesys.at

PFAS-Eliminierung durch kombinierte Prozesstechnologie von Flotation und elektrochemischer Oxidation im Feldmaßstab

Josefine Pfeiffer[1], Peter Müller[1], Robert Mischitz[1], Florian Klapal[2] & Mark Hlawitschka[2]
[1)] ferroDECONT GmbH, Leoben/Niklasdorf, Österreich
[2)] JKU Linz, Institut für Verfahrenstechnik, Linz, Österreich

KURZFASSUNG: Bevor die mit PFAS verbundenen Toxizitätsrisiken bekannt wurden und ins öffentliche sowie regulatorische Bewusstsein gelangten, fanden sie aufgrund ihrer vielseitigen Eigenschaften breite Anwendung in zahlreichen industriellen Prozessen sowie in Feuerlöschmitteln. Unter anderem durch Großbrandereignisse und Löschübungen gelangten sie in die Umwelt und in das Grundwasser. Eine der ausgewiesenen Altlasten mit PFAS-Kontamination in Österreich befindet sich in Lebring in der Steiermark. Dort entstand infolge von Löschübungen mit dem Speziallöschschaum AFFF eine etwa 5 km lange Schadstofffahne. Zur Sanierung PFAS-belasteter Wässer wird häufig Aktivkohle eingesetzt. Diese muss nach der Beladung entweder aufwendig regeneriert oder entsorgt werden. Zusätzlich sind häufig große Wasservolumina mit vergleichsweise geringen Schadstoffkonzentrationen zu behandeln, wodurch das Verfahren an Effizienz verliert. Die ferroDECONT GmbH entwickelte im Rahmen des KPC-geförderten Projekts „PFASolve“ eine innovative Verfahrenskombination, die einen anreichernden mit einem zerstörenden Verfahrensschritt verbindet. Dabei werden PFAS zunächst mittels Flotation aufkonzentriert und anschließend durch elektrochemische Oxidation zerstört. Ohne den Einsatz von Additiven oder zusätzlichen Schaummitteln konnte eine Aufkonzentrierung auf rund das 3.000-fache der Zulaufkonzentration erreicht werden. Durch die anschließende elektrochemische Behandlung wurde die Schadstoffkonzentration um etwa 99,1 % reduziert.

1 EINLEITUNG

Poly- und perfluorierte Alkylsubstanzen, kurz PFAS, wurden aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften in der Vergangenheit in zahlreichen industriellen Anwendungen eingesetzt. Aufgrund ihrer hohen Mobilität können sie sich schnell in der Umwelt verbreiten. Gleichzeitig sind sie äußerst persistent, weshalb sie treffend als „Ewigkeitschemikalien“ beziehungsweise „forever chemicals“ bezeichnet werden.
Wegen ihrer filmbildenden Eigenschaften wurden PFAS insbesondere in AFFF-Feuerlöschschäumen verwendet, vor allem im Zeitraum zwischen 1970 und 2000. Durch Großbrandereignisse sowie Feuerlöschübungen gelangten sie in die Umwelt. Häufige Belastungsschwerpunkte für PFAS-bedingte Boden- und Grundwasserschäden sind daher Flugplätze und Feuerwehrschulen. Die Sanierung entsprechender Grundwasserschäden erfolgt derzeit häufig durch den Einsatz von Aktivkohle, die nach ihrer Beladung regeneriert oder entsorgt werden muss.
Im KPC-geförderten Forschungsprojekt PFASolve wird ein innovatives Gesamtverfahren entwickelt, bei dem die Aufkonzentrierung mittels Flotation mit der anschließenden Zerstörung durch elektrochemische Oxidation kombiniert wird. Dabei bringen als Projektpartner das Institut für Verfahrenstechnik der Johannes Kepler Universität Linz (JKU) ihre Erfahrungen in der Auslegung und Betriebsweise der Reaktorgeometrie ein und die RM Umweltkonsulenten ZT GmbH ihre Expertise für Probenahmen und die Grundwasserbeweissicherung.

2 STANDORTBESCHREIBUNG

Die Feuerwehrschule Lebring befindet sind in der Gemeinde St.Margarethen-Lebring in der Südsteiermark. Auf dem Gelände führten langjährige Löschübungen mit fluorhaltigen Feuerlöschschäumen im zentralen Arealbereich zu einer erheblichen PFAS-Belastung des Untergrundes. Die Kontamination betrifft vor allem Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) und umfasst nach

vorliegenden Angaben ein Untergrundvolumen von bis zu 200.000 m³. Von diesem belasteten Bereich ausgehend bildete sich im Grundwasserabstrom eine mehr als 5 km lange Schadstofffahne aus. Da die Grundwasserverunreinigung kommunale und private Trinkwassernutzungen betrifft, ergibt sich gemäß den Kriterien der Prioritätenklassifizierung eine Einstufung des Altstandortes in Priorität 1 (Umweltbundesamt, 2024).
Der Standort wurde sowohl durch Rammkernsondierungen und Baggerschürfe, also auch durch die Beprobung von Grundwassermessstellen untersucht. Die Konzentrationen der Grundwasserproben der Untersuchungskampagnen im Jahr 2023 lagen zwischen 20 µg/L und 50 µg/L.
Die Versuchsanlage der ferroDECONT GmbH wurde am nordöstlichen Teil des Geländes in der Nähe des Löschwasserauffangbeckens aufgestellt, wo auch die Maximalkonzentrationen in den Grundwassermessstellen festgestellt wurden (siehe Abb. 1). Das Grundwasser wurde aus der Grundwassermessstelle (GW) 05 zur Anlage gefördert und nach der Behandlung in die GW 06 eingeleitet.

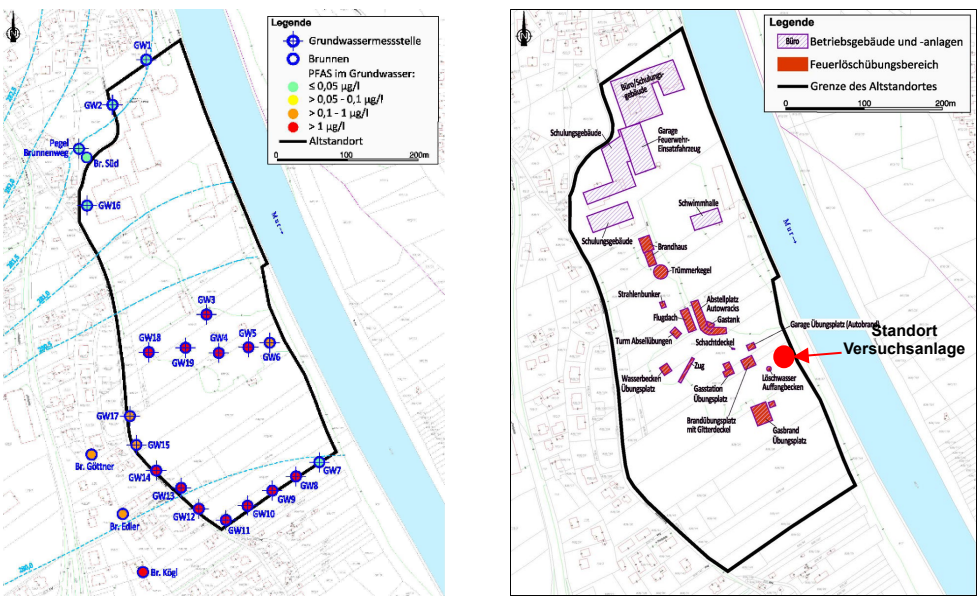


Abb. 1: Links: jeweiliger Maximalwert aller Probenahmetermine der PFAS Konzentrationen; Rechts: Lage von Anlagen und Betriebsgebäuden der Feuerwehrschule Lebring, sowie Lage der PFAS-Versuchsanlage der ferroDECONT (Umweltbundesamt, 2024)

3 VERFAHRENSKOMBINATION UND ANLAGENBESCHREIBUNG

Die Verfahrenskombination, die von der ferroDECONT GmbH mit ihren Projektpartnern zur Behandlung von PFAS-belasteter Wässer entwickelt wird, besteht aus einem aufkonzentrierenden und einem zerstörenden Schritt. Um ein großes Wasservolumen mit kleiner Konzentration in ein verringertes Volumen mit erhöhter Konzentration zu überführen, wird das Prinzip der Schaumfraktionierung angewendet. Das dabei entstehenden Konzentrat wird mittels elektrochemischer Oxidation behandelt und der Schadstoff somit zerstört.

3.1 Schaumfraktionierung/Flotation

PFAS sind anionische Tenside, die dazu neigen, aufgrund ihres Tensidcharakters sich an Luft-Flüssigkeits-Grenzflächen anzureichern. Genau dieses Prinzip nutzt die Schaumfraktionierung bzw. Flotation.

In der PFAS-Anlage ist die Aufkonzentrierung mittels Flotation zweistufig ausgeführt. Die erste Stufe besteht aus fünf Schaumfraktionierungs-Reaktoren, in welchen Luft fein zerstäubt in das Grundwasser eingedüst wird. Die wissenschaftliche Begleitung dieses Verfahrensschritts erfolgt durch das Institut für Verfahrenstechnik der JKU Linz, das als Projektpartner insbesondere die Reaktorauslegung sowie den Prozess der Anreicherung untersucht. Durch eine spezielle Konstruktion wird die Verweilzeit in den Reaktoren erhöht und somit eine höhere Kontaktzeit zwischen dem kontaminierten Wasser und Luft ermöglicht. PFAS haften sich an der Grenzfläche der Blasen an und steigen an die Oberfläche der Reaktoren auf. Es bildet sich somit ein Konzentrationsgradient innerhalb der Reaktoren, wobei sich der Schadstoff an der Oberfläche anreichert. Durch eine unterdruckgesteuerte Absaugung wird die Oberfläche der Reaktoren abgesaugt und das Vorkonzentrat in einen Vorkonzentratbehälter überführt. Die zweite Aufkonzentrierungsstufe besteht aus einem Schaumfraktionierungsreaktor, der mit dem Vorkonzentrat beschickt wird und dient der weiteren Aufkonzentrierung. Auch hier wird das Konzentrat abgesaugt und in einen Behälter überführt.
Das hierbei entstandene Konzentrat wird anschließend elektrochemisch oxidiert.

3.2 Elektrochemische Oxidation

Die elektrochemische Oxidation, auch als *electrochemical oxidation* (ECO) bezeichnet, dient dem Aufbrechen der C-C bzw. der C-F-Bindungen und damit der Mineralisierung der PFAS. In der Pilotanlage erfolgt die elektrochemische Oxidation mittels einer bordotierten Diamant-Elektrolysezelle. Zusätzlich wird die Leitfähigkeit des Konzentrats erhöht, um den elektrischen Widerstand zu verringern und dadurch den Wärmeeintrag zu minimieren. Zur weiteren Temperaturkontrolle ist nach der Elektrolysezelle ein wassergekühlter Wärmeübertrager installiert, der die Wärme aus dem Konzentrat ableitet.

Im Zuge der elektrochemischen Behandlung wurde das Konzentrat mit einem Volumenstrom von rund 0,4 L/s im Kreislauf geführt.

3.3 Gesamtanlage

Die Verfahrenskombination aus Schaumfraktionierung und elektrochemischer Oxidation wurde in einem 20-Fuß-Container realisiert.
Abbildung 2 beschreibt das Grundschema der Verfahrenskombination aus Flotation und elektrochemischer Oxidation. Der Zulauf der Anlage wird aus dem Grundwasserpegel GW 05 in den Pufferbehälter gefördert. Die Pumpe der ersten Stufe pumpt das Grundwasser durch fünf Reaktoren. Hier findet die erste Flotationsstufe statt und es wird ein Teil durch die Absaugung in den Vorkonzentratbehälter überführt, der andere Teil wird über den Anlagenablauf abgeleitet. Die Pumpe der zweiten Flotationsstufe fördert aus dem Vorkonzentratbehälter das Vorkonzentrat zum Reaktor der zweiten Stufe, von wo das Konzentrat in den Konzentratbehälter gefördert wird. Das gesammelte Konzentrat wird mittels ECO behandelt. Dazu ist eine weitere Pumpe verbaut, die das Konzentrat über die Elektrolysezelle und den Wärmeübertrager im Kreislauf führt.
Abbildung 3 zeigt die CAD-Innenansicht der PFASolve-Reinigungsanlage.

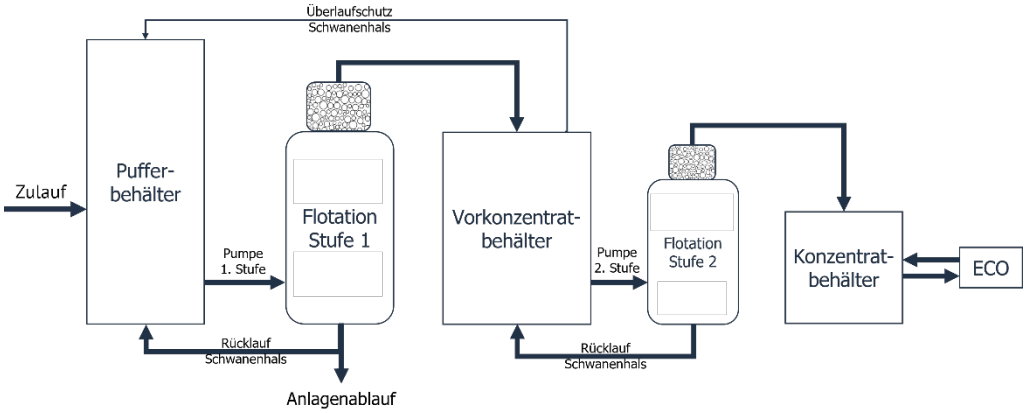


Abb. 2: Grundkonzept der Verfahrenskombination aus Flotation und elektrochemischer Elektrolyse

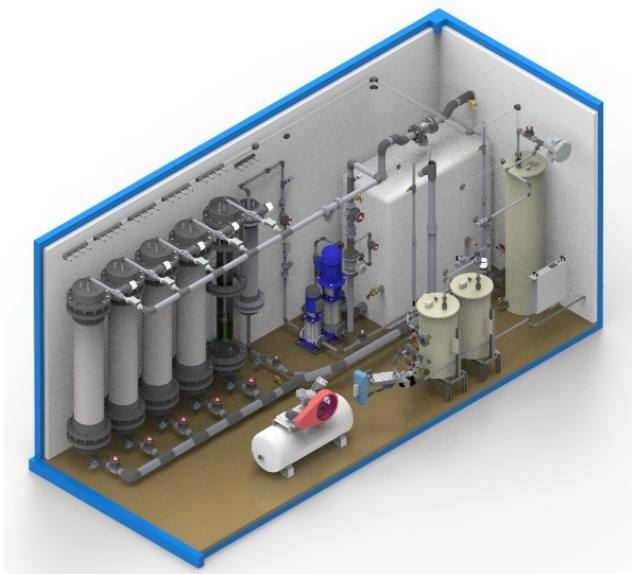


Abb. 3: CAD-Innenansicht des PFASolve-Containers

4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND PROBENAHME

Im Rahmen der Versuche wurden betriebsrelevante Parameter systematisch variiert, während andere Stellgrößen, wie z.B. die Luftzufuhr und der Durchfluss der zweiten Stufe, konstant gehalten wurden.
Nach der Befüllung eines Konzentratbehälters wurde der jeweilige Versuch beendet. Noch während des laufenden Anlagenbetriebs wurden Proben aus dem Anlagenzulauf, dem Anlagenablauf, dem Vorkonzentratbehälter, dem Konzentratbehälter sowie teilweise aus dem Pufferbehälter entnommen. Für die entnommenen Proben wurden die Einzelparameter der „Summe der PFAS“ sowie die daraus resultierende Summe ∑PFAS-20 gemäß der Richtlinie (EU) 2020/2184 bestimmt (Europäisches Parlament und Rat, 2020/2184).

Erste ausgewählte Versuche sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Parameter der durchgeführten Versuche im Projekt PFASolve

Versuch	Start	Ende	Dauer	Durchfluss Stufe 1	Durchfluss Anlage
			[h]	[L/s]	[L/s]
V01-1	21.01.2026 13:45	25.01.2026 11:45	94,0	3,4	0,6
V01-3	02.02.2026 11:00	07.02.2026 20:56	129,9	3,4	0,6
V02-1	09.02.2026 11:00	17.02.2026 09:00	190,0	4	0,8
V03-1	17.02.2026 11:00	26.02.2026 09:13	214,2	2,5	0,4
V04-1	17.03.2026 13:30	25.03.2026 10:45	189,2	4	0,6
V05-1	25.03.2026 12:00 27.03.2026 07:30	25.03.2026 22:04 31.03.2026 09:30	108,1	3,4	0,7

Das gewonnene Konzentrat wurde anschließend über eine Elektrolysezelle geführt.

5 ERGEBNISSE

Die relative Konzentration (c/c_0) wurde als Verhältnis der Ablaufkonzentration zur Zulaufkonzentration berechnet. Die Gesamtaufkonzentrierung ergibt sich aus dem Verhältnis der Konzentration im Konzentratbehälter zur Konzentration im Zulauf. Die Wiederfindungsrate wurde auf Basis der Massenbilanz zwischen Input- und Outputströme berechnet, wie in Abbildung 4 dargestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Ergebnisse der im Projekt PFASolve durchgeführten Versuche der Aufkonzentrierung

Versuch	$c/c_{0(Anlage)}$	Gesamtaufkonzentrierung	Wiederfindungsrate
		[-fach]	[%]
V01-1	1	36.667	1.042
V01-3	X[1]	633	X[1]
V02-1	0,92	4.797	X[2]
V03-1	0,83	127	84
V04-1	0,67	2.852	104
V05-1	0,82	3.824	150

[1)] Anlagenablauf wurde aufgrund einer Störung nicht beprobt; [2)] Analysefehler im Labor

Die beobachteten Schwankungen der Aufkonzentrierungsfaktoren und Wiederfindungsraten sind sowohl auf die anspruchsvolle PFAS-Analytik als auch auf den noch nicht vollständig etablierten Anlagenbetrieb zurückzuführen. Da sich das Verfahren während der Versuchsphase noch in der Entwicklung befand, sind Abweichungen zwischen den einzelnen Versuchen zu erwarten. Eine weitere Optimierung der Betriebsführung wird zu einer höheren Prozessstabilität und einer geringeren Ergebnisstreuung führen.

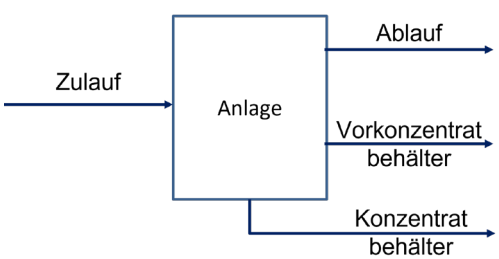


Abb. 4: Zur Massenbilanz verwendete In- und Outputströme der Anlage

Nach Abschluss des Versuchs wurde das gesammelte Konzentrat mittels elektrochemischer Oxidation behandelt. Die Behandlungsdauer sowie die daraus resultierende Konzentrationsabnahme sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tab. 3: Werte und Ergebnisse der Behandlung des Konzentrats mittels elektrochemischer Elektrolyse

Versuch	Volumen	Behandlungsdauer	$c/c_{0(ECO)}$
	[L]	[h]	[-]
V01-1	52,2	95	0,03
V01-3	62,5	98	0,05
V02-1	48,5	138,5	0,008
V03-1	55,28	187	0,009
V04-1	52,2	96,5	0,009

6 SCHLUSSFOLGERUNG

Wie an der Gesamtaufkonzentrierung ersichtlich, funktioniert das Verfahren der Flotation zur Aufkonzentrierung der PFAS in Grundwasser ohne jegliche Additive. Es konnte bei einer Wiederfindungsrate von rund 100 % eine gemittelte Aufkonzentrierung um das ca. 3.000-fache der Zulaufkonzentration erreicht werden.
V01-1 war der erste mit der Anlage durchgeführte Versuch. Obwohl die Konzentration des Ablaufes der Anlage im Verhältnis zum Zulauf gleichblieb, konnte dennoch eine ca. 40.000-fache Aufkonzentrierung gemessen werden, weshalb dies eine Wiederfindungsrate von 1.042 % ergab. Die Gründe für die Auffälligkeiten in den Ergebnissen konnten im Rahmen der Auswertung nicht eindeutig identifiziert werden. Das Ergebnis wurde wegen fraglicher Plausibilität nicht weiter berücksichtigt.
Die Reduktion durch die Behandlung des Konzentrats mittels elektrochemischer Oxidation betrug bis zu 99,1 %. Obwohl die Konzentrationen nach dem elektrochemischen Behandlungsschritt zum Teil noch oberhalb des Grenzwerts der EU-Trinkwasserrichtlinie 2020/2184 (Europäisches Parlament und Rat, 2020/2184) von 0,10 µg/L lagen, lässt das Ergebnis erkennen, dass die Unterschreitung dieses Wertes bei einer weitergehenden Auslegung des Verfahrens grundsätzlich möglich erscheint.

LITERATURVERZEICHNIS

Europäisches Parlament und Rat. (2020/2184). Richtlinie (EU) 2020/2184 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2020 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch.
Umweltbundesamt. (22. 06 2024). ALTSTANDORT „FEUERWEHRSCHULE LEBRING“: Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung. Von Altlasten GIS: https://altlasten.umweltbundesamt.at/altlasten/?servicehandler=publicgis&UBAIDS=80626 abgerufen

KONTAKT

Dipl.-Ing. Josefine Pfeiffer
josefine.pfeiffer@ferrodecont.at
+43 670 4080780
ferroDECONT GmbH
https://www.ferrodecont.at/

Gefördert aus den Mitteln:

Bundesministerium
Land- und Forstwirtschaft,
Klima- und Umweltschutz,
Regionen und Wasserwirtschaft

KOMMUNAL
KREDIT
PUBLIC CONSULTING

Mikrobielle Sanierung von mit LCKW belastetem Grundwasser mit lebensmitteltauglichen Biotensiden

Roman Prantl[1], Daniel Ruech[2] & Thomas Reichenauer[3]
[1)] blp GeoServices GmbH, Wien, Österreich
[2)] Sensatec GmbH, Ulm, Deutschland
[3)] AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Tulln, Österreich

KURZFASSUNG: Im Forschungsprojekt „MISABI - Mikrobielle Sanierung von LCKW-Grundwasserbelastungen mit lebensmitteltauglichen Biotensiden“ wurde der Einsatz von Tensiden als Lösungsvermittler für den mikrobiellen Schadstoffabbau von LCKW untersucht. Dabei wurden Laborversuche durchgeführt, um die mobilisierende Wirkung der Tenside, aber auch deren mögliche inhibierende Wirkung auf die Mikroorganismen zu untersuchen. Diese Erkenntnisse mündeten in einem Feldversuch am Standort einer ehemaligen chemischen Reinigung. Dabei erfolgte im Schadenszentrum zunächst die Zugabe von Melasse, um die Milieubedingungen einzustellen und zeitversetzt wurde eine Lösung mit dem Tensid „Faliten“ zugegeben, um die vorhandene LCKW-Belastung zu mobilisieren und für den Abbau zur Verfügung zu stellen. Durch die Stoffeingaben konnten die LCKW-Konzentrationen im Grundwasser teilweise um den Faktor 10 erhöht werden und der mikrobielle Abbau bis zum cis-1,2-Dichlorethen wurde nachgewiesen. Aufgrund der mikrobiellen Aktivität kam es jedoch zu Betriebsstörungen an der Sanierungsanlage, infolge stark belegter Filter. Daher wurde auf die Bioaugmentation verzichtet und der vollständige Abbau bis zu Ethen und Ethan konnte nur im Labor nachgewiesen werden. Die mobilisierende Wirkung der Stoffzugaben zeigte sich jedoch auch im Feldversuch sehr gut.

1 EINLEITUNG UND PROJEKTSTRUKTUR

Primäres Ziel des Projektes war es den Einsatz von lebensmitteltauglichen Tensiden als Lösungsvermittler für den mikrobiellen Schadstoffabbau von LCKW zu untersuchen. Da die Schadstoffe von Mikroorganismen meist nur metabolisiert werden können, wenn sie in gelöster Form vorliegen, stellt die Lösung der Schadstoffe einen geschwindigkeits-limitierenden Schritt beim mikrobiellen Abbau dar. Daher soll der anaerobe mikrobielle Abbau von CKW-Phasen im Grundwasser durch den Einsatz von Tensiden beschleunigt und verbessert werden. Die Tenside sollen einerseits Lösungsvermittler für die Schadstoffe und anderseits Co-Substrat für die LHKW-reduzierenden Mikroorganismen sein.
Um die Projektziele zu erreichen, wurden zunächst mögliche Standorte für die Durchführung eines Feldversuches identifiziert und untersucht, sowie umfangreiche Laborversuche durchgeführt, um die Auswirkungen einer Tensid-Zugabe auf die Einlösung und den mikrobiellen Abbau von LHKW zu untersuchen und auch um geeignete Tenside und deren optimalen Konzentrationen zu ermitteln.
Aufbauend auf den Laboruntersuchungen und den Standorterkundungen wurde im letzten Teil des Projektes ein Feldversuch am Standort der Altlast O43 „Putzerei Lengauer“ in Schwertberg in Oberösterreich durchgeführt. Der Feldversuch wurde im April 2025 gestartet und dauerte ein Jahr bis März 2026.

2 AUSWAHL GEEIGNETER STANDORTE UND STANDORTERKUNDUNG

Im AP 1 wurde einerseits ein geeigneter Standort für die Feldversuche in AP3 identifiziert und dessen (hydro)geologische und schadstoffchemische Verhältnisse erkundet sowie andererseits geeignete Proben für die Laborversuche in AP2 gewonnen.

Nach der Festlegung von Auswahlkriterien und Vorauswahl von 14 Standorten, wurden vorhandene Daten von fünf Standorten ausgewertet und konkrete Erkundungsmaßnahmen an drei Standorten durchgeführt. Dabei wurden die folgenden Erkundungsmethoden eingesetzt:

- Kleinrammbohrungen zur Gewinnung von Feststoff- und GW-Proben
- MIP-Sondierungen zur Schadstoffdetektion
- HPT-Sondierungen zur Hydro(geologischen) Erkundung
- Linerbohrungen zur Probengewinnung für die Laborversuche
- Errichtung von Rammpegeln zur Gewinnung von Grundwasser-Pumpproben
- Schadstoffanalytik und mikrobielle Charakterisierung der Standorte

Es wurden an den dreiStandorten Feststoff- und Grundwasserproben aus kontaminierten und aus nicht-kontaminierten Bereichen genommen, um damit die Laborversuche für die unterschiedlichen Fragestellungen durchführen zu können.

Hinsichtlich Standortauswahl für den Feldversuch zeigte sich der Standort „Putzerei Lengauer“ in Schwertberg als am besten geeignet. Er weist zwar nur mehr relativ geringen LHKW-Konzentrationen im Schadenszentrum auf, aufgrund früherer Untersuchungen war jedoch davon auszugehen, dass sich noch ein relevantes Schadstoffpotential im Untergrund befindet, welches durch die geplanten Maßnahmen mobilisiert werden soll und es somit zu einer beschleunigten Reduktion des Schadstoffpotentials kommen kann.

3 LABORUNTERSUCHUNGEN

Zunächst wurden von den drei Standorten Proben entnommen, um eine Kultivierung der am Standort vorliegenden Mikroorganismen durchzuführen. Ziel dieser Untersuchungen war die Ermittlung des standortspezifischen Dehalococcoides-Kultivierungspotentials. Dabei zeigten die Mikroorganismen vom Standort Schwertberg sehr gute Ergebnisse. Die Kultivierungsansätze wurden nach 14, 39, 60 und 90 Tagen auf LCKW, Ethen und Ethan analysiert. Bereits nach 14 Tagen wurde Vinylchlorid nachgewiesen und Ethen und Ethan als finale Abbauprodukte konnte nach 60 Kultivierungstagen in relevanten Konzentrationen nachgewiesen werden. Die qPCR-Analytik zeigte eine hohe Dichte an Mikroorganismen, insbesondere für die Dehalogenase tceA (bis zu 2,8E+07 Kopien/ml), sowie die 16S-rDNA (bis zu 2,6E+07 Kopien/ml).
Die vom Standort Schwertberg gewonnene Dehalococcoides-Kultur wurde somit auch für die weiteren Laborversuche eingesetzt. Dabei wurden Batch- und Säulenversuche durchgeführt, um die Mobilisierung und den Abbau von Tetrachlorethen (PCE) bei 4 verschiedenen Tensiden (Tween 80, GlyCoBo, IveySol und Faliten) in unterschiedlichen Konzentrationen und in Kombination mit verschiedenen Dehalococcoides-Kulturen zu untersuchen.
Dabei wurde nicht nur die mobilisierende Wirkung der Tenside untersucht, sondern auch ob und ab welchen Konzentrationen die Tenside eine inhibierende Wirkung auf die Mikroorganismen zeigen. Alle vier untersuchten Tenside zeigten bei Konzentrationen unterhalbe der CMC (Critical Micelle Concentration) keine inhibierende Wirkung, bei Konzentrationen oberhalb der CMC führten dagegen alle Tenside zu einer Inhibierung der Dechlorierung ab cis-1,2-Dichlorethen. Wesentliche Unterschiede zwischen den Tensiden zeigten sich bei Tensid-Konzentrationen im Bereich der CMC. Hier wies das Tensid „Faliten“ die besten Ergebnisse auf, weshalb es schlussendlich auch als Tensid für den Feldversuch ausgewählt wurde.
In weiterer Folge wurden Abbauversuche mit der Anreicherungskultur vom Standort Schwertberg, mit Bodenmaterial von der Standortumgebung und mit dem Tensid Faliten in unterschiedlichen Konzentrationen durchgeführt. In den Ansätzen erfolgte auch bei einer relativ hohen Tensidkonzentration von 0,5 g/L eine vollständige Dechlorierung des Terachlorethen, über das cis-1,2-Dichlorehen und das Vinylchlorid bis zum Ethen (siehe folgende Abbildung).

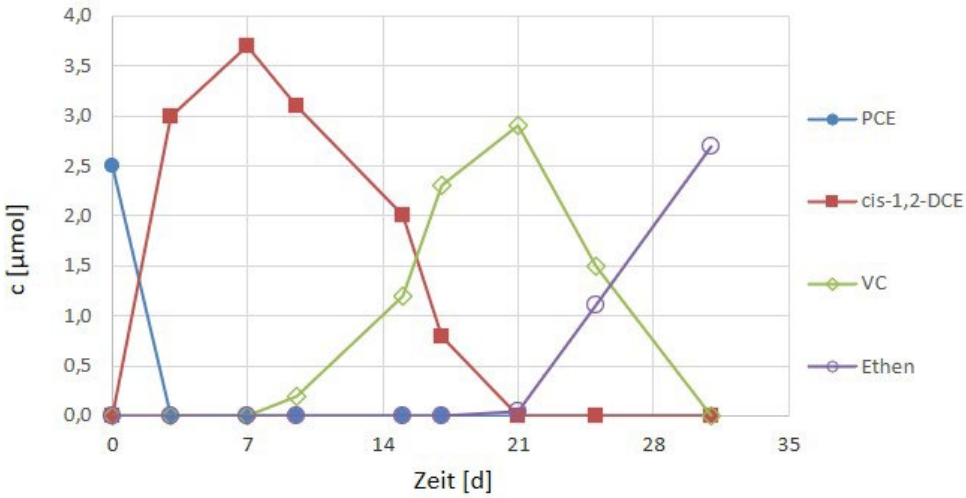


Abb. 1: Konzentrationsverläufe beim PCE-Abbauversuch mit der Dehalococcoides-Anreichungskultur vom Standort Schwertberg mit Zusatz von 0,5 g/l des Tensids „Faliten“

Weiters wurden im Labor Säulenversuche durchgeführt, um die Auswirkungen einer Tensid-Zugabe auf die Einlösung und den mikrobiellen Abbau von LHKW zu untersuchen. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch das Faliten mehr PCE in die wässrige Phase eingelöst wurde und somit für den mikrobiellen Abbau zur Verfügung steht.

4 FELDVERSUCH

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Laborversuche wurden die Vorgehensweise und die Eingangsparameter für den Feldversuch festgelegt, welcher an der Putzerei Lengauer umgesetzt wurde. Die Altlast „Altlast O43 - Putzerei Lengauer“ befindet sich im Zentrum von Schwertberg im Bezirk Perg in Oberösterreich. Zwischen 1969 und 1993 wurde auf der gegenständlichen Fläche eine Putzerei betrieben. Durch die Verwendung von Tetrachlorethen als Reinigungsmittel kam es zu einer erheblichen Verunreinigung des Untergrundes und des Grundwassers. Aufgrund des erheblichen Schadstoffeintrags in das Grundwasser wurde der Altstandort in die Prioritätenklasse 2 einstuft und 2016 als Altlast O43 ausgewiesen.
Im Jahr 2016 wurde durch die Bundesaltlastensanierungsgesellschaft m.b.H. (BALSA) ein Sanierungsprojekt vorgelegt und bewilligt. Bei den Sanierungsmaßnahmen handelt es sich im Wesentlichen um

- die Entnahme von Grundwasser aus einem Entnahmebrunnen ca. 30 m abstromig (südöstlich) des Schadensherdes mit einer Pumprate von 1 l/s
- die anschließende Reinigung durch Aktivkohlefilter
- die Infiltration des gereinigten Grundwassers im Infiltrationsbrunnen ca. 65 m im Anstrom des Schadensherdes bzw. die Einleitung des gereinigten Grundwassers in den Vorfluter (Aist) in Ausnahmefällen (z.B bei hohen Grundwasserständen)
- Umfangreiche Grundwasserbeweissicherung

Aus geologischer Sicht befindet sich die Altlast am südlichen Rand der Granitmasse des oberen Mühlviertels. Der Aquifer wird von quartären, sandigen Kiesen (fluviatilen Ablagerungen der Aist) und von dicht gelagerten Kiesen und Sanden („Granitsande“) gebildet. Im Liegenden der Granitsande wird bei ca. 12 m unter GOK Mühlviertler Granit angetroffen, der eine heterogene ca. 1 bis 2 m mächtige Verwitterungsschicht aus Steinen, Kies, Sand und Schluff aufweist.

Die Aistschotter weisen einen Durchlässigkeitsbeiwert von ca. $4*10^{-4}$ m/s auf. Für die darunterliegenden Granitsande wurde eine leicht geringere Durchlässigkeit mit $1*10^{-4}$ m/s festgestellt. Die generelle Grundwasserströmungsrichtung weist nach Süden. Das Grundwasserspiegelgefälle beträgt etwa 5 ‰. Der Grundwasserflurabstand liegt bei 3-4 m. Die Abstandgeschwindigkeit des Grundwassers im Bereich des Standrotes wurde mit 1,7 m/d ermittelt.
Der Feldversuch bestand im Wesentlichen aus einer Abfolge von verschiedenen Stoff-Eingaben und einem umfassenden Monitoring der Auswirkungen der Eingaben. Der Feldversuch war in folgende 3 Phasen geteilt:

- Phase 1: Nullbeprobung + Melassezugabe + laufendes Monitoring (Woche 1 bis 5)
- Phase 2: Tensidzugabe + laufendes Monitoring (Woche 6 bis 11)
- Phase 3: Bioaugmentation und weiteres Monitoring (Woche 12 bis Monat 12)

Der Feldversuch war räumlich eng abgegrenzt: die Eingaben wurden im Schadenszentrum in drei bestehenden Messstellen durchgeführt und die Monitoringmaßnahmen in abstromigen Messstellen in ca. 15 m Entfernung. Über den bestehenden Entnahmebrunnen in ca. 30 m Entfernung wurden die eingebrachten Stoffe wieder aus dem Aquifer entnommen (soweit sie nicht bis dahin durch die auftretenden Prozesse aufgebraucht worden sind).
Nach der Nullbeprobung erfolgte die Eingabe von Melasse im Schadenszentrum zweimal innerhalb der ersten beiden Wochen. Die Mengenermittlung beruhte auf dem Porenvolumen im Schadensbereich, den bekannten Belastungen und den hydrogeologischen und hydrochemischen Daten. Insgesamt wurde an beiden Terminen ca. 5 m^3 Melasselösung (75 % Wasser, 25 % Melasse) eingegeben.
Ungefähr sechs Wochen nach der ersten Melassezugabe erfolgte die Eingabe des Tensids „Faliten“ in der im Labor bestimmten Konzentration im Schadenszentrum. Dabei wurden insgesamt 1.800 l stark verdünnte Tensidlösung (bzw. 9 l reines Tensid) eingebracht.
Das begleitende Monitoring beinhaltete zuerst eine wöchentliche und später eine 14-tägige Beprobung von 10 Grundwasser-Messstellen (3 im Schadenszentrum, 6 im nahen Abstrom sowie der Entnahmebrunnen) und Bestimmung bzw. Analytik der Vor-Ort-Parameter und der Parameter LCKW, Ethen, Ethan, TOC, Nitrat, Nitrit, Sulfat, Eisen, Mangan. Weiters erfolgte eine Bestimmung der Oberflächenspannung und der Mikrobiologische Verhältnisse mittels qPCR.
Die Untersuchungen zeigten signifikante Veränderungen der Grundwassereigenschaften als unmittelbare Auswirkungen der Melasse- und Tensidzugaben:

- Der Sauerstoffgehalt lag vor der Zugabe der Melasse in einem Bereich zwischen 1,5 mg/l und 3,0 mg/l und war somit zu hoch für den anaeroben mikrobiellen Abbau der CKW. Unmittelbar nach der Zugabe sank der Gehalt rasch und deutlich und blieb großteils über viele Monate auf einem niedrigen Niveau (< 0,5 mg/l).
- Das Redoxpotential reduzierte sich nach den Stoffzugaben von anfänglich 500-600 mV auf bis zu -300 mV auf. Über den gesamten Versuchsverlauf blieb es überwiegend in einem Bereich zwischen -100 und 100 mV und verdeutlicht somit die reduzierenden Verhältnisse aufgrund der Stoffzugaben und der dadurch forcierten mikrobiologischen Prozesse.
- Die CKW-Konzentrationen waren vor Beginn der Maßnahmen in einem relativ niedrigen Bereich (ca. 30 µg/l im Schadenszentrum). Dies war bekannt und es war auch eines der vorrangingen Ziele des Feldversuchs durch die Stoffzugaben CKW zu mobilisieren und für den mikrobiellen Abbau zur Verfügung zu stellen.
- Unmittelbar nach der Melassezugabe kam es zu einem starken Anstieg der Summe CKW im nahen Abstrom um das 10-fache auf bis zu 300 µg/l. Andere Messstellen zeigten einen etwas verzögerten Anstieg der CKW, reagierten jedoch stark auf die Tensidzugabe mit Werten von bis zu 500 µg/l (siehe Abbildung 2).

- Die Konzentrationsverläufe für cis-1,2-Dichlorethen verdeutlichen ebenfalls sehr gut die Auswirkungen der Stoffzugaben. Vor Beginn der Maßnahmen ist cis-1,2-Dichlorethen in keiner der Messstellen nachweisbar. Unmittelbar nach der Melassenzugabe stiegen die Konzentrationen in allen Messstellen an und erreichen Höchstwerte von 180 µg/l. Mit Fortdauer des Versuchs reduzieren sich die Gehalte wieder. Die GW-Messstelle GWM09 wies zwar hohe Konzentrationen für CKW auf, aber nur an einem Termin relevante Werte für cis-1,2-Dichlorethen. Hier zeigten auch der Sauerstoffgehalt und das Redoxpotential keine dauerhaft reduzierenden Verhältnisse.

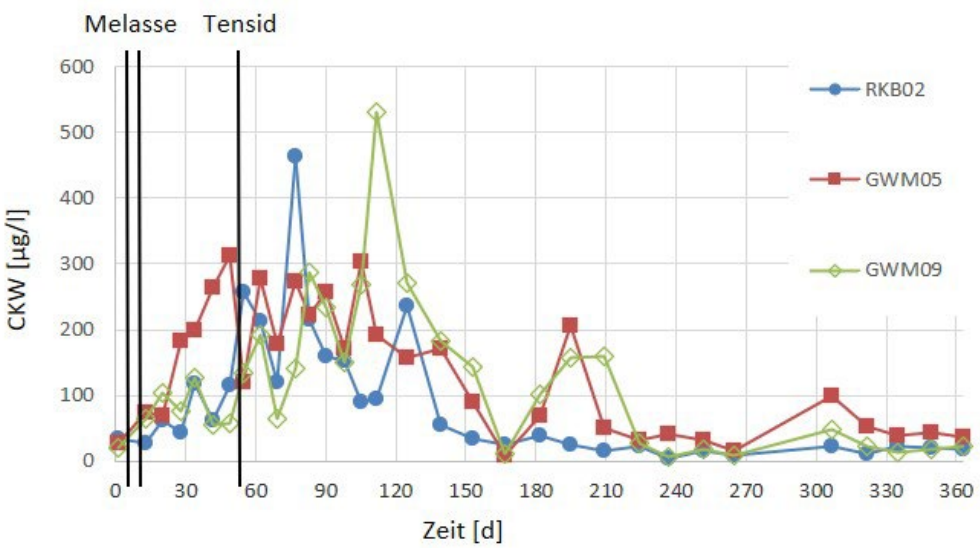


Abb. 2: Konzentrationsverlauf von Summe CKW in GW-Messstellen im Zuge des Feldversuchs

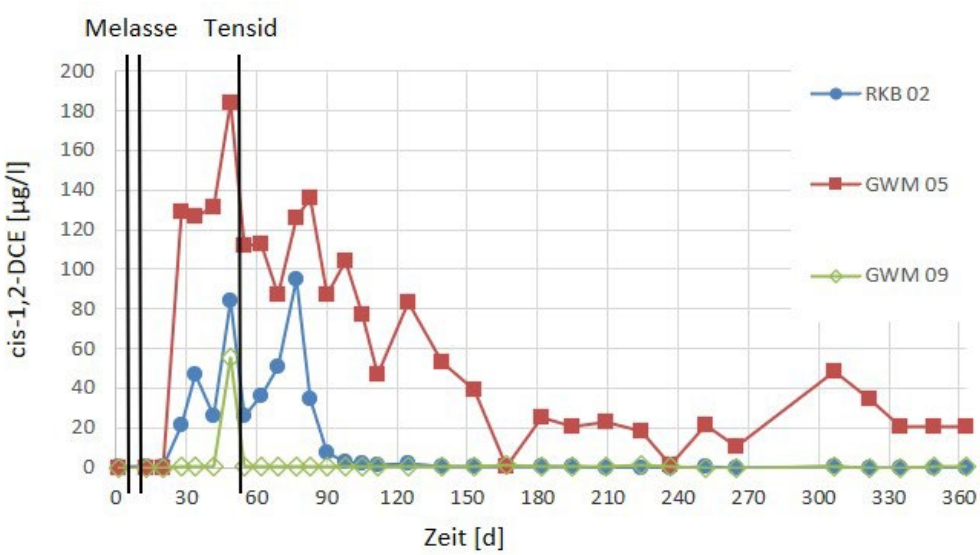


Abb. 3: Konzentrationsverlauf von cis-1,2-Dichlorethen in GW-Messstellen im Zuge des Feldversuchs

Weiters verdeutlichen auch die folgenden Parameter den Einfluss der Stoffzugaben:

- Der TOC lag vor den Zugaben bei < 3 mg/l und wurde durch die Melassezugabe naturgemäß stark erhöht, es wurden Konzentrationen von mehreren 100 mg/l nachgewiesen. Im Entnahmebrunnen lagen die Werte zumeist in einem sehr niedrigen Bereich, d.h. die Melasse wurde am Weg bis zum Entnahmebrunnen großteils aufgebraucht. Nach 2-3 Monaten waren die TOC-Werte in allen Bereichen wieder sehr gering, d.h. die Melasse wurde im gesamten System nach wenigen Monaten aufgebraucht.
- Eisen und Mangan waren vor den Zugaben praktisch nicht nachweisbar und erhöhten sich aufgrund der Zugaben und der daraus resultierenden reduzierenden Verhältnisse deutlich.
- Auch Nitrat und Sulfat reagierten zu Beginn stark auf die reduzierenden Verhältnisse und pendelten sich dann wieder auf dem Ausgangsniveau ein.

Neben diesen positiven und gewollten Effekten kam es jedoch auch zu ungewollten Auswirkungen der Stoffzugaben: Rasch nach der Melassezugabe ist es in der Sanierungsanlage zu einem Anstieg des Drucks in der Filteranlage gekommen, wodurch die Anlage abgeschaltet wurde. Trotz regelmäßigem Tausch des Beutelfilters kam es über viele Monate regelmäßig zu diesen Druckanstiegen. Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchungen und der organoleptischen Befundaufnahmen vor Ort wurden folgende mögliche Ursachen für die Belegung der Filter und damit für die Betriebsstörungen identifiziert:

- Zu Beginn war eine Belegung des Beutelfilters mit noch vorhandener Melasse vermutlich die Hauptursache. Nach einigen Wochen spielte dies nur mehr eine untergeordnete Rolle, wie auch z.B. die gemessenen TOC-Werte zeigten.
- Eine Belegung des Beutelfilters durch Eisen- und/oder Manganausfällungen spielte keine relevante Rolle.
- Als Hauptursache für die längerfristigen Betriebsstörungen wurde die Belegung des Beutelfilters mit Mikroorganismen identifiziert, welche sich durch die günstigen Millieubedingungen durch die Melassezugabe verstärkt entwickelt haben.

Aufgrund dieser starken mikrobiellen Aktivität und der daraus resultierenden Betriebsstörungen an der Sanierungsanlage, wurde in Abstimmung mit allen Beteiligten auf die Bioaugmentation mit der vom Standort gewonnene Dehalococcoides-Kultur verzichtet. Daher konnte der vollständige Abbau des Terachlorethen bis zum Ethen und Ethan im Feldversuch nicht nachgewiesen werden. Dieser wurde jedoch in Laborversuchen mit Standortmaterialien gut belegt.

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Im ggst. Forschungsprojekt MISABI wurde der Einsatz von Tensiden als Lösungsvermittler für den mikrobiellen Abbau von LCKW untersucht. Dabei konnte beim Feldversuch durch die Zugabe von Melasse und Tensid eine massive Mobilisierung von CKW im Grundwasser belegt werden und durch die deutlichen Milieuänderung hin zu reduzierenden Verhältnisse und der dadurch forcierten mikrobiologischen Prozesse konnte der Abbau bis zum cis-1,2-Dichlorethen nachgewiesen werden. In Abbauversuchen im Labor mit der Dehalococcoides-Anreicherungskultur vom Standort Schwertberg und mit dem Tensid Faliten in einer Konzentration von 0,5 g/L wurde eine vollständige Dechlorierung des Terachlorethen, über das cis-1,2-Dichlorehen und das Viylchlorid bis zum Ethen und Ethan nachgewiesen.

KONTAKT:

Dr. Roman Prantl
r.prantl@blpgeo.at
+43/69915559914
blp GeoServices GmbH
www.blpgeo.at

PFAS – Entfernung im Sickerwasser – Erfahrungen aus der Praxis

Frank Natau[1] & Matthias Berg[1]
[1)] OVIVE GmbH, Niederlassung Deutschland, Emmendingen

KURZFASSUNG: Zur Behandlung von Sickerwässern stehen Betreibern heutzutage bewährte Behandlungstechnologien zur Verfügung. Langjährig erfolgreich sind dabei insbesondere modular konzipierte Prozesskombinationen, welche die komplexe Wassermatrix bei Einhaltung aller Grenzwerte zuverlässig und ökonomisch behandeln. Im Zuge der Fragestellungen zur Gefährlichkeit von „Ewigkeitschemiekalien“ (PFAS) steht auch die Abfallwirtschaft in Fokus. Dies betrifft nicht nur aktuelle Abfallströme – gerade Deponien unterliegen rückwirkend genauer Betrachtung. Eine EU– weite Einführung von PFAS - Grenzwerten für die Einleitung von vorgereinigten Sickerwässern erscheint im Rahmen der Vereinheitlichung zur europäischen Deponierichtlinie wahrscheinlich. In vorliegendem Artikel wird anhand großtechnisch ermittelter Daten aus der Praxis beleuchtet, inwieweit aktuell bewährte Technologien in der Lage sind, PFAS im Sickerwasser von Abfallstandorten zu entnehmen. Die Entnahmeraten wurden ermittelt sowie kurzfristig bereits heute umsetzbare Lösungen zur „ZERO – PFAS“ – Emission aufgezeigt. Eine ergänzende Betrachtung anfallender Reststoffmengen je nach Prozesskombination vervollständigt die gewonnenen Daten aus der Praxis.

1 PFAS IM DEPONIESICKERWASSER

Der Begriff PFAS (per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen) beschreibt eine sehr große Stoffgruppe von synthetisch hergestellten Substanzen. Mit der Aufnahme der Produktion Mitte des letzten Jahrhunderts werden sie aufgrund ihrer attraktiven Eigenschaften (wasser-, fett- und schmutzabweisend, UV- und hitzebeständig) in sehr vielen Produkten des alltäglichen Lebens eingesetzt (Papier, Kosmetik, Kleidung, Beschichtungen oder Feuerwehrprodukte etc.). Sie gelten als persistent und nicht natürlich abbaubar. Als direkte Konsequenz finden sich PFAS heutzutage in allen Stoffkreisläufen – so auch im Wasserpfad und besonders in Deponiesickerwässern in unterschiedlichen Ausprägungen. Beachtenswert dabei ist das im Vergleich zu anderen Schadstoffkomponenten im Sickerwasser vergleichsweise niedrige Konzentrationsniveau von PFAS, welches i.d.R. eine Größenordnung niedriger ist (µg/l oder sogar ng/l im Vergleich zu mg/l) gängigen Sickerwasserparametern.

1.1 Einführung in die chemische Struktur von PFAS

Bei PFAS handelt es sich im Allgemeinen um Verbindungen, welche durch ein oder mehrere Kohlenstoffatome (C) beschrieben sind, an denen Wasserstoffatome (H) durch Fluoratome (F) ersetzt sind. In Abbildung 1 ist beispielhaft das langkettige Molekül Perfluoroctansäure (PFOA) dargestellt:

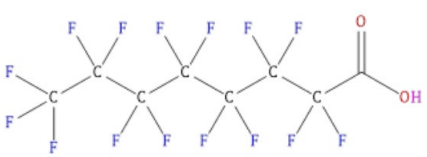


Abb. 1: Molekülstruktur Perfluoroctansäure (PFOA)

Es ist nachvollziehbar, das die Vielfalt möglicher Zusammensetzungen der Atome zu einer sehr großen Anzahl unterschiedlicher PFAS – Verbindungen führen kann. Infolge der bereits erlassenen PFAS – Produktionsverbote erfolgte die „ PFAS – Evolution“ dabei von zu Beginn eher

langkettigen zu speziell für die Anwendung konfigurierten kurzkettigen Molekülen. Dies kann spezielle chemische und thermische Stabilität für industrielle Anwendungen ermöglichen bzw. auch zu gewünschten hydrophoben oder lipophoben Eigenschaften führen. Zur Ermittlung möglicher Entnahmeraten von PFAS aus Sickerwässern ist es deshalb unumgänglich, die Untersuchungen inkl. begleitender Analytik mit einer pragmatisch handhabbaren Selektivität vorzunehmen. Entscheidend ist die Anzahl entsprechender Kohlenstoffatome im Molekül (C_1 bis C_n), anhand derer sich im Folgenden auch die erzielten Ergebnisse kategorisieren lassen. Für weitere detailliertere Betrachtung der vielfältigen und leicht unübersichtlichen Chemie von PFAS – Verbindungen ist auf einschlägigen Quellen verwiesen [1,2,3,4].

1.2 Analytische Erfassung von PFAS in Deponiesickerwasser

Deponiesickerwässer gelten weltweit als eines der herausforderndsten Abwässer zur kontrollierten Aufbereitung. Die überaus vielfältige Wassermatrix inkl. deren Varianz im Jahresgang kann alle bekannten und als Einzelsubstanz mitunter leicht entnehmbaren Abwasserparameter enthalten. Zukünftige Überwachungsanalytik für PFAS erscheint zukünftig zwingend - aber wie geht man da bei der Vielzahl von möglichen PFAS – Stoffen vor ? Den aktuellen Stand qualitätsgesicherter labortechnischer Erfassung von PFAS – Konzentrationen in wässrigen Proben zur Überwachung regelt in Deutschland die DIN38407-42:

Tab. 1: PFAS – Analytik in wässrigen Proben nach DIN38407-42

Parameter	Methode	Einheit
PFT		
Perfluornonansäure (PFNA)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
Perfluoroctansulfonsäure (PFOS)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
Perfluoroctansäure (PFOA)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
Perfluorhexansäure (PFHxA)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
Perfluorbutansulfonsäure (PFBS)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
Perfluorbutansäure (PFBA)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
Perfluordecansäure (PFDA)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctyl-sulfor (H4PFOS)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
Perfluoroctansulfonsäureamid (PFOSA)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
Perfluorheptansulfonsäure (PFHpS)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
Perfluorheptansäure (PFHpA)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
Perfluorpentansäure (PFPeA)	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l
Summe PFAS	DIN 38407-F42:2011-03*	µg/l

OVIVE empfiehlt allen europäischen Deponiebetreibern, die bei ihnen am Abfallstandort anfallenden Abwässer nach dieser Systematik in den Rohabwässern sowie beim Einleitpunkt in die öffentlichen Gewässer regelmäßig untersuchen zu lassen, um das aktuelle Emissionsverhalten als Datenbasis für ggf. zukünftige Notwendigkeiten zu ermitteln. Beachtenswert ist dabei generell das im Vergleich zu anderen Schadstoffkomponenten im Sickerwasser vergleichsweise niedrige Konzentrationsniveau von PFAS, welches i.d.R. eine Größenordnung niedriger ist (µg/l oder sogar ng/l im Vergleich zu mg/l).

2 SICKERWASSERBEHANDLUNG UND ERGEBNISSE

In der weltweiten Aufbereitung von Abwässern aus der Abfallbehandlung inkl. Deponiesickerwässern hat sich in den letzten Jahrzehnten der Membran-Bioreaktor (MBR) als BAT-Verfahren (**B**est **A**vailable **T**echnology) durchgesetzt. Kein anderes Verfahren behandelt vor allen Dingen die mitunter stark schwankenden organischen (BSB_5, CSB) und stickstoffhalten (NH_4-N) Emissionen von Deponien so zuverlässig, reststoffarm und kosteneffektiv. Die Datenermittlung vergangener Jahre inkl. ersten gezielten Pilotierungen zur PFAS – Entnahme [5] zeigen jedoch das - wie aufgrund der Persistenz von PFAS erwartet - mögliche Entnahmeraten alleine im MBR ohne Nachbehandlung nur gering und zukünftig nicht ausreichend sind. Wie bereits mehrfach in der langjährigen Geschichte erfolgreicher Sickerwasserreinigung erfolgt (Schwermetalle, AOX, nicht biologisch abbaubare Organik) unterscheidet man hierfür potentiell ergänzende Verfahren zur Entnahme von PFAS in Eliminations – und Separationsprozesse wie folgt:

Tab. 2: Behandlungsverfahren zur PFAS – Behandlung

Elimination (bzw. Destruktion)	Separation (bzw. Konzentration)
Oxidation (AOP)	Umkehrosmose
Photokatalytische Oxidation	Nanofiltration
Kavitationsverfahren	Adsorption an granulierter Aktivkohle
(Hochtemperatur-) Verbrennung	Ionenaustausch
Gasionisation	Chem. / phys. Behandlung (Fällung)
	Schaum – Fraktonierung

Die Entwicklung von Destruktionsverfahren zur PFAS – Entnahme wird aktuell in Laboruntersuchungen vorangetrieben – ein Upscaling in großtechnische Umsetzungen steht noch aus.

2.1 Umkehrosmose

Die Umkehrosmose in Form moderner Spiralwickeltechnologie hat sich neben dem MBR weltweit als großtechnische Alternative in der Sickerwasserreinigung entwickelt. Als reines Separationsverfahren „teilt“ die Umkehrosmose das Rohsickerwasser in einen qualitativ hochwertigen Ablaufstrom geeignet zur Einleitung in Oberflächengewässer bei gleichzeitiger Generation eines stark schadstoffbelasteten Konzentrates. Durch maximalen Rückhalt mittels mitunter mehrstufiger Membrantechnik können anspruchsvolle Grenzwerte zur Einleitung in Oberflächengewässer zuverlässig als sogenannte „Direkteinleitung“ eingehalten werden.

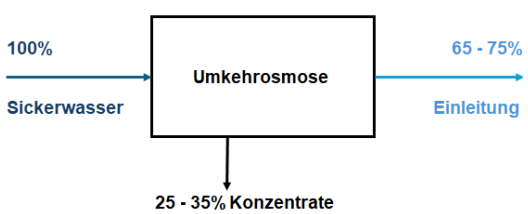


Abb. 2: Umkehrosmose inkl. Massenbilanz

In der betrachteten mehrstufigen Umkehrosmoseanlage wurde bei einer PFAS - Gesamtbelastung im Rohsickerwasser von ca. 16 µg/l (Summe 20 PFAS – Bestandteile) großtechnisch ein Rückhalt von 99% ermittelt. Der hohe Rückhalt ist durch die Barriere der sehr „dichten“ Umkehrosmose - Membran dauerhaft – allerdings kann die Effizienz durch begleitende Organik und Salze deutlich sinken. In Deutschland und vielen anderen europäischen Ländern muss das anfallende Konzentrat extern in speziellen Industriekläranlagen entsorgt werden – eine Rückführung auf Deponiekörper ist nicht zugelassen. Dies zieht einen nicht unbeträchtlichen logistischen

und kommerziellen Aufwand nach sich, denn gemäß EU – weiter verpflichtender Abfallkennzeichnungsgrundlage gehören Konzentrate aus der Deponiesickerwasserreinigung mit der Abfallschlüsselnummer 19 07 03* als besonders überwachungsbedürftig [6]. Vor dem Hintergrund erwartbar hoher PFAS – Belastung der Konzentrate sowie aktuell ausschließlich verfügbarer großtechnischer Destruktionstechnologie in Form moderner Verbrennungsanlagen [7] gewinnen integrative Massenbilanzen zukünftig an Bedeutung.

2.2 MembranBioReaktor (MBR) und granulierte Aktivkohle

Diese vielfach weltweit eingesetzte Verfahrenskombination eignet sich besonders bei Einleitung von vorgereinigtem Sickerwasser in das kommunale Kanalnetz – „Indirekteinleitung“ genannt. Bei moderateren Einleitgrenzwerten erfolgt die maximale Schadstoffelimination bei minimal verbleibender Restmenge – fast das gesamte Sickerwasser wird vorgereinigt eingeleitet. Dies sichert die langfristige Entwässerung der Deponiestandorte inkl. geordneter geotechnischer Betreuung und Nutzung des Deponiekörpers bis in die Nachsorgephase. Langjährig minimale Betriebskosten sorgen für sehr lange Anlagenlaufzeiten > 25 Jahre:

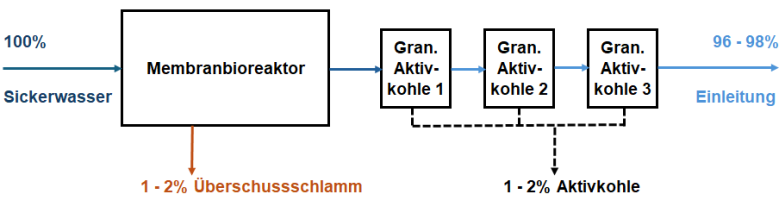


Abb. 3: Membranbioreaktor (MBR) mit granulierter Aktivkohle inkl. Massenbilanz

Bei einer PFAS - Gesamtbelastung im Rohsickerwasser von ca. 10 µg/l (Summe 20 PFAS – Bestandteile) wurde eine PFAS – Entnahmerate von 99% ermittelt. Diese hängt maßgeblich von den adsorptiven Entnahmepotential der nachgeschalteten Aktivkohle ab, welche in Abhängigkeit ihrer Betriebszeit abnimmt. Weiterhin zu beachten ist das mitunter „konkurrierende“ Adsorptionsverhalten auf der Aktivkohle von PFAS – Bestandteilen sowie nicht abbaubarer Organik. Eine selektive Begutachtung zur dauerhaften Sicherstellung beider Ablaufparameter zur gesicherten Einleitung ist notwendig. Im Vergleich zur Umkehrosmose - Technologie ist das erwartbare Reststoffaufkommen mit 2 – 4% des anfallenden Rohsickerwassers minimal – mit stark positiven Konsequenzen für das betriebliche logistische und kommerzielle Risiko.

2.3 BIOMEMBRAT® - plus

Das BIOMEMBRAT® - *plus* – Verfahren wurde gezielt für „Direkteinleitung“ entwickelt und verbindet die Vorteile eliminierender, separierender und adsorptiver Prozesse. Die Entnahme besonders kritischer Wasserbestandteile (nicht biologisch abbaubare Organik, PFAS und / oder pharmazeutische Wirkstoffe) erfolgt im hochkonzentrierten Nebenstrom. Je nach Schadstoff ermöglicht dies eine stark erhöhte Beladbarkeit der Aktivkohle sowie generell eine erhöhte Reaktionskinetik. Es kann immer dann eingesetzt werden, wenn die Einleitungsbedingungen die Ausschleusung von nicht entfernbaren Salzen wie Chloride im Sickerwasser ermöglichen.

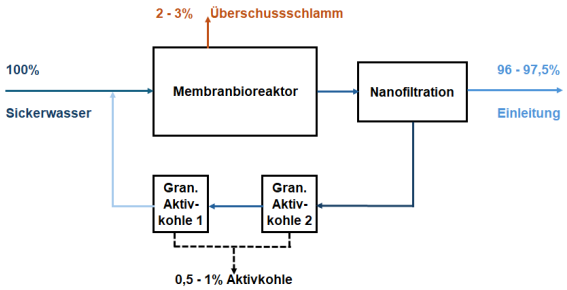


Abb. 4: BIOMEMBRAT® *-plus* inkl. Massenbilanz

Bei einer PFAS - Gesamtbelastung im Rohsickerwasser von ca. 17 µg/l (Summe 20 PFAS – Bestandteile) wurde eine Entnahmerate von 97% ermittelt. Indikative Informationen zu potentiell erzielbaren Beladungsraten für PFAS und CSB in der Nebenstrombehandlung mit Aktivkohle sind dem Bericht aus einer halbtechnischen Pilotierung an einem deutschen PFAS – Hot Spot zu entnehmen [5]. Auch bei „Direkteinleitung“ können bei intelligenter Prozesskonfiguration sehr niedrige Reststoffmengen realisiert werden.

2.4 „ZERO – PFAS“ ?

Frankreich sieht für die Einleitung von Industrieabwässern o.ä. in öffentliche Gewässer zukünftig staatlich verordnete Vorgaben in Form einer Reduktionen der PFAS – Emissionen um 70% gegenüber 2023 bis 27.02.2028 vor [8]. Im Rahmen eines nationalen Entwicklungsplanes wurden dabei folgende Zielsetzungen fixiert:

- Einführung eines sogenannten PFOA – Äquivalentes
- PFAS – Analytik gemäß PFOA – Äquivalent < 4,4 ng/l
- nicht nachweisbare PFAS – Emissionen bei Einleitung bis 27.02.2020

Unter PFOA-Äquivalent wird dabei je nach PFAS – Komponente ein Gewichtungsfaktor verstanden, der seiner relativen Toxizität im Vergleich zur Toxizität von PFOA entspricht, wobei der Gewichtungsfaktor durchaus < 1 sein kann. Sollte die dabei ermittelte Konzentration < als die jeweilige analytische Nachweisgrenze sein, ist die Emission mit 0 gleichzusetzen.

In der letzten vorzustellenden Untersuchung stellt sich deshalb die Frage, ob es durch Ergänzung weitergehende Behandlungsstufen bereits heute möglich ist großtechnisch „ZERO – PFAS“ zu erreichen. Vor diesem Hintergrund wurde eine großtechnische Anlage nach dem BIOMEMBRAT®–plus – Verfahren um zwei kleinere, sehr selektiv konzipierte Verfahrenseinheiten ergänzt:

- eine speziell modifizierte Aktivkohle
- ein speziell generiertes Ionenaustauscherharz

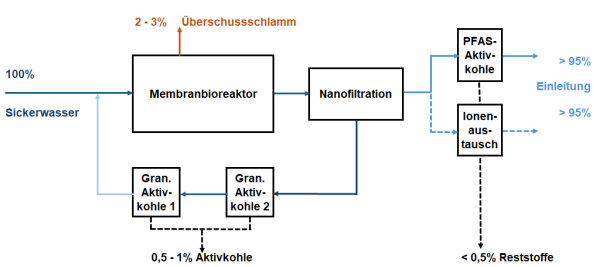


Abb. 5: BIOMEMBRAT® *-plus* für „ZERO – PFAS“ inkl. Massenbilanz

Bei einer PFAS - Gesamtbelastung im Rohsickerwasser von ca. 24 µg/l (Summe 20 PFAS – Bestandteile) zeigen die Ergebnisse , das „ZERO – PFAS“ nach o.g. Vorgaben bereits heute großtechnisch umsetzbar ist. Dabei kann das eingesetzte Ionenaustauscherharz pro kg Material mehr PFAS aufnehmen als die eingesetzte Aktivkohle. Im Vordergrund des aktuell noch laufenden Regelbetriebes gilt es, die bereits ermittelten Steuerungsindikatoren für den Betrieb der Anlage mit einer größeren Datenbasis abzusichern.

3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit moderner, einfach zu betreibender Anlagentechnologie wird bereits heute ein Großteil von bekannten PFAS – Komponenten im Sickerwasser entnommen. Dabei anfallende Reststoffmengen sind aus kommerziellen und logistischen sehr beachtenswert. Zur vollständigen Entfernung von PFAS ist eine selektive Vorgehensweise je nach Standort unumgänglich. Im Zentrum weiterer Entwicklungen steht die Suche nach einfach in die Großtechnik umsetzbaren Destruktionsprozessen, die Bereitstellung einer schnellen und vor Ort einsetzbaren PFAS – Analytik sowie die Erarbeitung intelligente betrieblicher Lösungen in Form von Korrelationen innerhalb der komplizierten Abwassermatrix.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] Dr. Björn Meermann et. al. (2023). Untersuchung des Vorkommens von PFAS in Abfallströmen (Umwelbundesamt Deutschland), TEXTE 85/2024, Dessau, Deutschland

[2] OECD Web – Site: Per and poly-fluorinated chemicals (PFAS) | OECD

[3] EUROFINS Web – Site: Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen – PFAS(früher PFC)| Eurofins Umwelt

[4] Dr. Thomas Held et.al.(2019) Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS – Kontaminationen (Umweltbundesamt Deutschland), TEXTE 137/2020, Dessau, Deutschland

[5] Dr. M Weissroth, L. Hauschel, F. Natau (2021). PFAS in leachate treatment - Best Practise Prozesses, (WEHRLE Umwelt GmbH), ISWA World Congress Athen, Emmendingen, Deutschland

[6] Katalog Abfallschlüsselnummern der Europäischen Kommision (2014), Europäisches Abfallverzeichnis (Amtsblatt der Europäischen Union)

[7] H. J. Gehrmann et. al. (2024), Mineralization of fluoropolymers from combustion in a pilot plant under representative european municipal hazardous waste combustor conditions (Chemosphere Vol. 365), SCIENCE DIRECT, Elsevier – Verlag

[8] Decrete 2025-958 (8/09/2025), Journal officiel de la republique francaise (Ministere de la transition ecologique, de la biodiversite, de la foret, de la mer et de la peche), TEXT 85, Frankreich

KONTAKT

Frank Natau, Matthias Berg
fnatau@ovive.de, mberg@ovive.de
+49 7641 585 - 104
International Sales, Head of German Operation
OVIVE GmbH
www.ovive.de

Umwelttechnische und ökobilanzielle Bewertung des Rückbaus von DK0-Deponien

Lea Hoffmann[1], Daniel Vollprecht[1] & Jan Paul Lindner[1]
[1)] Universität Augsburg, Institut für Materials Resource Management, Augsburg, Deutschland

KURZFASSUNG: Vor dem Hintergrund zunehmender Ressourcenknappheit und sinkender Deponiekapazitäten verfolgt das Projekt RueBe das Ziel, bereits deponierte bzw. zur Deponierung vorgesehene mineralische Abfälle wie Boden- und Bauschuttgemische, Steinkohleflugaschen und Eisenhüttenschlacken in den Baustoffkreislauf zurückzuführen. Durch nassmechanische Aufbereitung werden bislang nicht nutzbare Materialien von Schad- und Störstoffen befreit und Grob- sowie Feinfraktion nach Qualitätskontrolle als Sekundärrohstoffe für die Entwicklung innovativer und ressourcenschonender Baustoffe, wie alternative Bindemittel oder Ziegel, genutzt. Das gesamte Vorhaben wird durch eine ökologische sowie ökonomische Bilanzierung begleitet. Ergänzend erfolgt eine rechtliche Bewertung des Rückbaus von DK0-Deponien, aus der Empfehlungen für notwendige Anpassungen rechtlicher und normativer Vorgaben abgeleitet werden.

1 EINLEITUNG

In der Vergangenheit wurden mineralische Abfälle überwiegend deponiert. Heute rückt das daraus resultierende Rohstoffpotenzial bestehender Deponien verstärkt in den Fokus, sowohl vor dem Hintergrund der Ressourcenknappheit als auch infolge zunehmender Flächenkonflikte und der begrenzten Verfügbarkeit von Deponieraum (Dittrich et al., 2024). So ist die Anzahl der Deponien der Klasse 0 (DK0-Deponien) in den letzten zwölf Jahren um 132 Standorte zurückgegangen, wodurch aktuell rund 670 DK0-Deponien (Statistisches Bundesamt, 2026) in Betrieb sind, von denen viele eine Restlaufzeit von weniger als zehn Jahren aufweisen (Statistisches Bundesamt , 2024). Diese stillgelegten sowie betriebenen Deponien stellen mit einem geschätzten Volumen von über 15 Milliarden Tonnen Bodenaushub sowie Bau- und Abbruchabfällen bedeutende anthropogene Rohstofflager dar (Dittrich et al., 2024). Das darin enthaltene stoffliche Potenzial ist bislang jedoch nur unzureichend erschlossen (Statistisches Bundesamt, 2026). Vor diesem Hintergrund gewinnt das Konzept des Landfill Mining, verstanden als systematischer Rückbau von Deponien zur Rückgewinnung verwertbarer Materialien (Krook et al., 2011), zunehmend an Relevanz. In den vergangenen Jahren wurde dieser Ansatz im Rahmen nationaler und internationaler Forschungsprojekte wie LAMIS (Wolfsberger et al., 2015) und NEW-MINE (NEW-MINE, 2026) intensiv untersucht. Der Schwerpunkt lag dabei jedoch überwiegend auf Siedlungsabfalldeponien (Wolfsberger et al., 2015), während mineralische DK0-Deponien, auf denen insbesondere Bodenaushub, Bau- und Abbruchabfälle sowie industrielle mineralische Reststoffe wie Kohleflugaschen oder Stahlwerksschlacken abgelagert wurden, bislang kaum systematisch betrachtet wurden. Die gezielte Rückgewinnung dieser Materialien bietet erhebliche Potenziale für eine nachhaltige Rohstoffsicherung. Sie ermöglicht die Substitution primärer Rohstoffe, erhöht die Versorgungssicherheit, vermeidet Importabhängigkeiten und trägt zugleich zur Entlastung bestehender Deponiekapazitäten bei. Darüber hinaus eröffnet der Rückbau von Deponien Perspektiven für ein Flächenrecycling, beispielsweise für eine Nachnutzung als Siedlungs- oder Erholungsflächen (Dittrich et al., 2024).

An dieser Stelle setzt das Verbundforschungsprojekt RueBe an. Ziel des Projekts ist die Rückführung bereits deponierter beziehungsweise zur Deponierung vorgesehener mineralischer Abfälle in nachhaltige Baustoffkreisläufe. Hierzu werden die Materialien mittels nassmechanischer Aufbereitung von Schad- und Störstoffen befreit sowie in Grob- und Feinfraktionen separiert und nach Qualitätskontrolle als Sekundärrohstoffe nutzbar gemacht (Dittrich et al., 2024).

2 DAS PROJEKT RUEBE

2.1 Projektpartner

Das Projekt RueBe wird von den nachfolgenden acht Verbundpartnern sowie den zwei assoziierten Partnern, dem Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (bvse) sowie der Dyckerhoff GmbH (Dyck), durchgeführt.

- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (IBP),
- Technische Universität München – Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau (TUM-ZG),
- Universität Augsburg – Lehrstuhl für Resource and Chemical Engineering & Professur für Technology Assessment (UA),
- Wilhelm Geiger GmbH & Co. KG (Geiger),
- thyssenkrupp MillServices and Systems GmbH (tkMSS),
- Schlagmann Poroton GmbH & Co. KG (SP),
- H. Geiger GmbH Stein- und Schotterwerke (GSS) und
- Hermann Nottenkämper GmbH & Co. KG (HN).

Die Zusammensetzung des Konsortiums ist so gestaltet, dass die Wertschöpfungskette durch die Verbundpartner abgedeckt wird - von der Rohstoffgewinnung über die Materialaufbereitung und -entwicklung bis hin zur industriellen Produktion, was die nachfolgende Abb. 1 veranschaulicht (Dittrich et al., 2024).

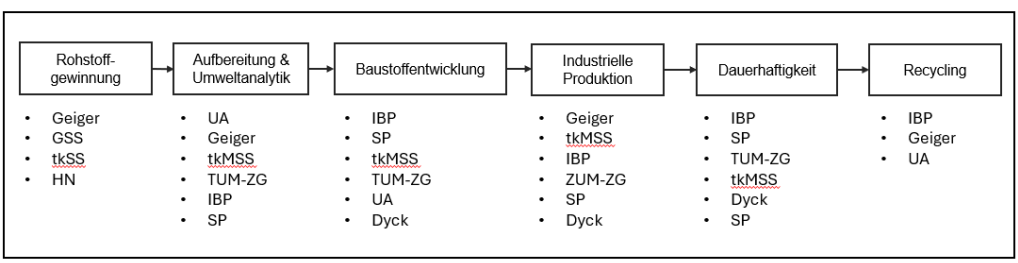


Abb. 1: Abbildung der gesamten Wertschöpfungskette durch Projektpartner

2.2 Probennahme

Im Rahmen des Projekts werden vier mineralische Abfallströme untersucht:

- bindige Bodengemische,
- Bauschuttgemische,
- Steinkohleflugaschen und
- Eisenhüttenschlacken.

Boden- und Bauschuttgemisch
Die Verbundpartner Geiger und GSS stellen Material von ihren DK0-Deponien in Bayern bereit. Das bisherige Probenkollektiv umfasst drei Bodengemische und zwei Bauschuttgemische. Für jede Fraktion wurden drei Eimer Material entnommen.

Steinkohleflugasche
Der Verbundpartner HN führte auf der Verfüllungsfläche „Windwurffläche“ in Nordrhein-Westfalen eine 25 m tiefe Bohrung durch, wobei die Dichtungsschicht 3,5 m ausgemacht hat. Die Beprobung erfolgte in Abständen von 0,5 m über die gesamte Bohrtiefe. Für die Analytik wurden jeweils fünf aufeinanderfolgende Einzelproben zu einer Mischprobe zusammengeführt, wodurch eine vertikale Auflösung von etwa 2,5 m erreicht wurde. Insgesamt wurden neun Mischproben gewonnen.

Eisenhüttenschlacke
Der Partner tkMSS nahm bisher zwei Proben aus einer alten Siemens-Martin-Schlacke-Deponie.

2.3 Aufbereitung und Umweltanalytik

Die im Rahmen der Probennahme gewonnenen mineralischen Abfälle werden zunächst bodenmechanisch charakterisiert. Hierzu werden unter anderem die Korngrößenverteilung, die Plastizitätsgrenzen sowie das Wasseraufnahmevermögen bestimmt. Dies erfolgt bei den Partnern TUM-ZG, Geiger und tkMSS. Die Ausgangsproben, sowie die durch die Klassierung erhaltenen Fraktionen werden an der Uni Augsburg mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und Röntgendiffraktometrie (XRD) charakterisiert. Darauf aufbauend werden durch Wasch- und Attritionsversuche Schadstoffe im Labormaßstab abgetrennt. An ausgewählten Fraktionen werden zur Bewertung des Aufbereitungserfolges Elutionsversuche durchgeführt und die resultierenden Eluate mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma ICP-OES untersucht. Die Partner IBP und SB untersuchen die gewonnen Feinfraktion hinsichtlich der Tonmineralzusammensetzung und des Tonmineralgehalts (Dittrich et al., 2024).

2.4 Baustoffentwicklung im Labor und vorindustrielle Produktion von Baustoffen

Je nach materialtechnischer Eignung werden die aufbereiteten Fraktionen unterschiedlichen Verwertungspfaden zugeführt. Diese umfassen die Nutzung als Gesteinskörnung, Ziegelrohstoff, Flüssigboden sowie als Zumahl- bzw. Zusatzstoff in Beton und als Klinkerrohstoff für die Zementherstellung. So entwickelt der Partner TUM-ZB Flüssigbodenrezepturen auf Basis geeigneter Fraktionen. Parallel dazu erfolgt durch den Partner IBP in Zusammenarbeit mit bvse die thermische bzw. mechanochemische Aktivierung tonhaltiger Fraktionen sowie die Entwicklung entsprechender Rezepturen, die in Mörtel- und Betonversuchen geprüft werden. Der Partner SB führt Extrusions- und Brennversuche im Labor durch und charakterisiert die hergestellten Keramiken hinsichtlich mechanischer Eigenschaften und Wärmeleitfähigkeit. Die nachfolgende Abb. 2 stellt eine erste Übersicht der möglichen Zuordnung der mineralischen Abfälle zu den jeweiligen Zwischenprodukten sowie Endanwendungen dar (Dittrich et al., 2024).

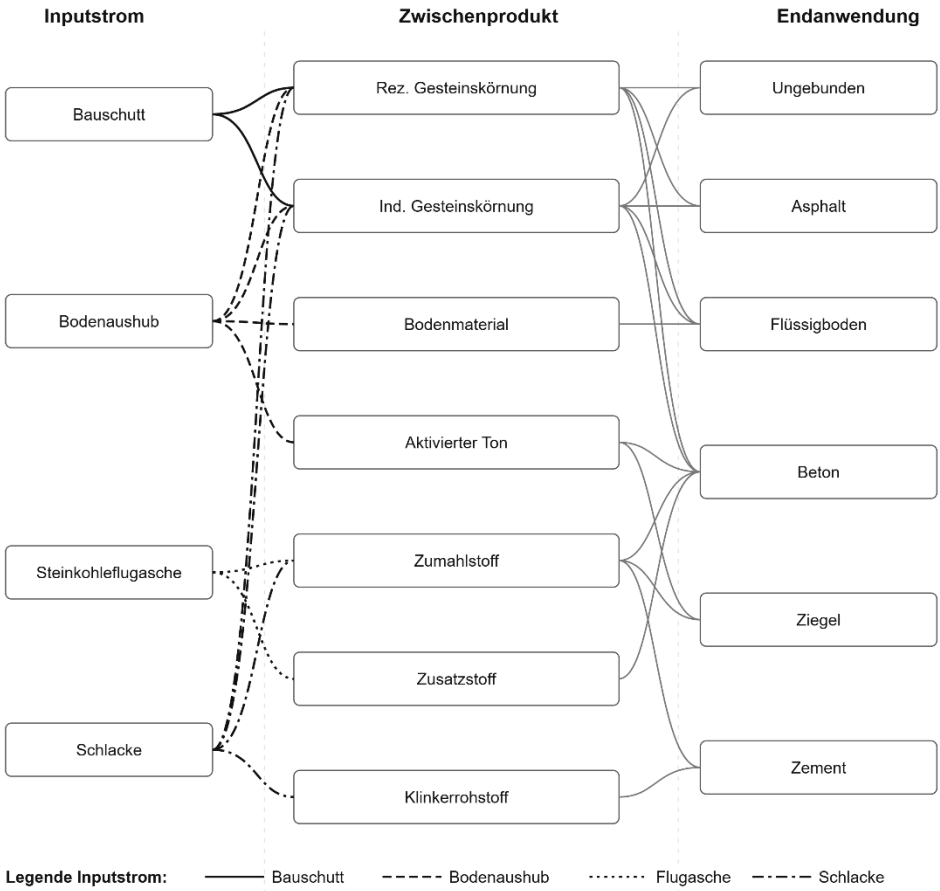


Abb. 2: Zuordnung der mineralischen Abfälle zu möglichen Baustoffanwendungen

Die vielversprechendsten Verwertungsoptionen werden im Anschluss in einer vorindustriellen Prozessumgebung validiert und auf produktionsrelevante Volumina skaliert. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf der Aufbereitung von DK0-Materialien und Schlacken in größeren Mengen. Im Mittelpunkt steht die Behandlung von etwa 200 t Bodenmaterial in einer Bodenwaschanlage sowie die anschließende stoffliche Nutzung der entstehenden Grob- und Feinfraktionen in den zuvor identifizierten Anwendungsfeldern. Die daraus hergestellten Baustoffe werden hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Eigenschaften umfassend charakterisiert (Dittrich et al., 2024).

2.5 Dauerhaftigkeit und Recycling

Die im Projekt entwickelten Baustoffe werden durch die Partner IBP, Dyck und TUM-ZG hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit sowie durch die UA hinsichtlich ihrer Recyclingfähigkeit untersucht und bewertet. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit werden z.B. bei gebundenen Systemen nach Herstellung der Prüfkörper insbesondere deren Witterungsbeständigkeit unter Frost-Tau- sowie Trocken-Feucht-Wechseln geprüft und die Empfindlichkeit gegenüber Alkali-Kieselsäure-Reaktionen bestimmt. Zudem wird untersucht, inwieweit sich die Materialien nach ihrer Nutzungsphase technisch aufbereiten und erneut als Ausgangsstoffe für neue Baustoffanwendungen einsetzen

lassen. Die Bewertung erfolgt auf Basis mechanischer, baustofftechnologischer und umwelttechnischer Eigenschaften der gewonnenen Rezyklate (Dittrich et al., 2024).

2.6 Ökobilanzierung sowie ökonomische und rechtliche Bewertung

Das Vorhaben wird durch eine Ökobilanz (LCA) begleitet. Unter Verwendung der Software Sphera LCA For Experts und der Datenbank Managed LCA Contents modelliert die UA relevante Prozesse, um Umweltwirkungen bereits in frühen Entwicklungsphasen systematisch zu erfassen und in die Prozess- und Produktentwicklung zu integrieren. Die LCA dient dabei als Entscheidungs- und Steuerungsinstrument, mit dem potenzielle Umweltlasten in den betrachteten Wertschöpfungsketten identifiziert, gezielt reduziert und gegen andere Produkteigenschaften abgewogen werden können. Neben prozessbezogenen Optimierungen ermöglicht die Bilanzierung unter anderem den Vergleich unterschiedlicher Verwertungsoptionen mineralischer Abfälle, etwa ob das Landfill Mining gegenüber dem Verbleib der Materialien in der Deponie ökologisch vorteilhaft ist. Die LCA-Modelle dienen weiterhin als Basis für die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Wertschöpfungsketten der neu entwickelten Sekundärprodukte durch den Partner Geiger. Ergänzend wird die rechtliche Machbarkeit eines Landfill Mining-Ansatzes analysiert. Deponien sind als dauerhaft geschlossene Entsorgungssysteme ausgelegt, eine nachträgliche Öffnung oder Umlagerung ist nicht vorgesehen. Zu klären ist daher, wer Verantwortung und Kosten für gegebenenfalls erforderliche Sicherungs- und Nachsorgemaßnahmen trägt. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie mit potenziell problematischen Stoffen wie Asbest im Zuge der Materialerschließung umzugehen ist. Zudem ist zu prüfen, ob eine Rückverbringung der ausgekofferten Materialien in die Deponie zulässig ist. Die Ergebnisse werden in einem Positionspapier formuliert, das politischen Entscheidern als Grundlage für notwendige Anpassungen rechtlicher und normativer Vorgaben dienen soll, um eine effizientere Verwertung inerten DK0-Materials zukünftig zu ermöglichen (Dittrich et al., 2024).

3 HERAUSFORDERUNGEN UND AUSBLICK

Beim Rückbau von DK0-Deponien ergeben sich neben regulatorischen Anforderungen weitere technische und systemische Hürden. Das Deponiematerial wird in der Regel selten in Monochargen abgelagert, wodurch erweiterte Aufbereitungs- und Trennschritte erforderlich werden, um eine hochwertige stoffliche Verwertung zu ermöglichen. Hinzu kommen Alterungs- und Verwitterungsprozesse innerhalb der Deponie, die die bautechnischen Eigenschaften der Materialien verändern und auch verschlechtern können. Für die tatsächliche Umsetzung spielt darüber hinaus die Akzeptanz von Sekundärbaustoffen eine zentrale Rolle. Eine nachhaltige Marktetablierung gelingt derzeit vor allem nur dann, wenn entsprechende sekundäre Baustoffe entweder in Ausschreibungen verbindlich gefordert werden oder wirtschaftlicher gegenüber Baustoffen aus Primärrohstoffen sind, was aktuell nur eingeschränkt der Fall ist. Gelingt es, diese Hürden zu überwinden, verschieben sich die Rollen innerhalb der beteiligten Sektoren deutlich: Deponiebetreiber können sich perspektivisch als Lieferanten sekundärer Rohstoffe positionieren, während Baustoffhersteller Zugang zu zusätzlichen Materialquellen erhalten (Dittrich et al., 2024).

4 DANKSAGUNG

Das Projekt RueBe wurde von dem Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen der Förderrichtlinie „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Urban Mining: Erschließung anthropogener Lager als Rohstoffquelle“ mit der Förderkennzahl 033R428B gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

Dittrich, S., Maier, M., Schaller, V., Vollprecht, D., Lindner, J., Birle, E., Schmidmeyer, S. (2024). Projektantrag RueBe.

Krook, J., Svensson, N., & Eklund, M. (2011). Landfill mining: A critical review of two decades of research. Waste Management, 513-520.

NEW-MINE. (26. Juni 2026). EU Training Network for Resource Recovery Through Enhanced Landfill Mining. Von NEW-MINE: https://new-mine.eu/ abgerufen

Statistisches Bundesamt . (2024). Statistischer Bericht - Abfallentsorgung 2024. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis).

Statistisches Bundesamt. (26. Juni 2026). Waste treatment plants landfills. Von Destatis: https://www.destatis.de/EN/Themes/Society-Environment/Environment/Waste-Management/Tables/liste-waste-treatment-plants-landfills.html# abgerufen

Wolfsberger, T., Aldrian, A., Sarc, R., Hermann, R., Höllen, D., Budischowsky, A., Ragoßnig, A., Pomberger, R. (2015). Landfill mining: Resource potential of Austrian landfills – Evaluation and quality assessment of recovered municipal solid waste by chemical analyses. Waste Management & Research, 962-974.

KONTAKT

Lea Hoffmann
lea.hoffman@uni-a.de
Lehrstuhl Resource and Chemical Engineering und Professur Technology Assessment
Universität Augsburg
https://www.uni-augsburg.de/de/fakultaet/mntf/mrm/prof/reseng/forschung/ruebe/

Deponieraumschonung und Emissionsreduktion durch optimierte Ablagerung von Verbrennungsrückständen

Alexander Weh[1], Gisela Weibel[1], Philipp Hänggi[1] & Patrick Kämpfer[1]
[1)] Universität Bern, Fachstelle Sekundärrohstoffe, Bern, Schweiz

KURZFASSUNG: Die heutigen Ablagerungspraktiken von Verbrennungsrückständen in der Schweiz unterscheiden sich bei den einzelnen Deponien zum Teil deutlich. Während einige Deponien auf Monokompartimente setzen, erfolgt an anderen Standorten eine schichtweise Deponierung der verschiedenen Verbrennungsrückstände. Spezifische Mischanlagen, die eine gleichmäßige Vermischung der Verbrennungsrückstände bei kontrollierter Wasserzugabe ermöglichen, sind bislang jedoch nicht in Betrieb. Darüber hinaus wird zunehmend die Kombination emittierender Abfallströme mit adsorbierenden Materialien, wie z.B. Pflanzenkohle oder anderen Bindemitteln diskutiert, um mögliche Sickerwasseremissionen bereits im Deponiekörper zurückzuhalten und so neben strukturelle, auch emissionsmindernde Effekte zu erzielen. Die Resultate der Projektserie SENKATO zeigen, dass eine verbesserte Konditionierung und angepasste Einbaupraxis deutliche Vorteile für den Einbau und die Emissionen bieten. Durch eine gute Mischung und einen optimalen Wassergehalt von Verbrennungsrückständen auf Deponien werden Sickerwasseremissionen reduziert und damit Umweltbelastungen verringert sowie die Nachsorgekosten gesenkt. Gleichzeitig kann Deponieraum effizienter genutzt werden, was den Bedarf an Deponiebauten und die damit verbundenen Eingriffe in Natur und Landschaft reduziert. Eine angepasste Einbaupraxis führt zudem zu geringeren Staubemissionen und verbessert damit die Arbeitsbedingungen des Deponiepersonals.

1 EINLEITUNG UND AUSGANGSLAGE

Der verfügbare Deponieraum in der Schweiz verknappt sich, während die Abfalllast steigt und kreislaufwirtschaftliche Bestrebungen problematische Fraktionen anreichern. Als Folge werden deponiepflichtige Materialien immer schwieriger in der Handhabung. Es braucht Strategien, welche die Raumnutzung verbessern und die Schadstoffmobilität reduzieren. Verbrennungsreste wie MVA-Rostaschen, sauer gewaschene Filteraschen, Holzaschen und Klärschlammaschen werden gemäß Abfallverordnung (VVEA, Anhang 5 Ziffer 4) auf Deponien des Typ D abgelagert. Der Einbau erfolgt je nach Standort ohne systematische Konditionierung schichtweise oder in Monokompartimenten: Schichtweiser Einbau ist betrieblich einfacher und dämpft Emissionen, verhindert aber die spätere Trennbarkeit; Monokompartimente sichern die sortenreine Rückbaubarkeit, sind jedoch aufwendig und emissionsseitig ungepuffert. Ingold et al. (2024 & 2026) zeigen, dass ein Deponiekörper ein weitgehend ungesättigtes System mit mehreren Kornfraktions-Schichten ist, in dem Wasserdomänen mit unterschiedlichen hydraulischen und geochemischen Eigenschaften auftreten – die Schichtung steuert dabei Fliess-Systeme und Emissionen.

Hier setzt die Projektserie SENKATO an. Sie untersucht, wie eine gezielte Vermischung der Verbrennungsreste bei kontrollierter Wasserzugabe auf betriebliche Faktoren und Emissionen wirkt: einerseits über geochemisch-mineralogische Mechanismen der Schadstoffmobilität, andererseits über Volumeneinsparung durch höhere Einbaudichte. Darauf aufbauend soll geklärt werden, wie emittierende Abfallströme mit adsorbierenden Materialien zu kombinieren sind, um Sickerwasseremissionen bereits im Deponiekörper zurückzuhalten.

2 PROJEKTRAHMEN SENKATO

Die Projektserie SENKATO ist stufenweise aufgebaut und wissenschaftlich begleitet. Ausgehend von Laborstudien zu den Eigenschaften der Verbrennungsrückstände wurde in einer Pilotphase

der Praxisbezug hergestellt: In Mulden mit je rund 60 t wurden Mischungen auf ihr Einbau- und Emissionsverhalten geprüft. In der aktuellen, finalen Phase wird eine kommerzielle, mobile Mischanlage mit +1000 t pro Tag eingesetzt; die Produkte werden getestet und direkt verbaut. Für Langzeitbeobachtungen werden ausgewählte Mischungen in Containern und einer Lysimeteranlage bis Mitte 2027 überwacht. Im Zentrum stehen neben Einbaudichte und Verarbeitbarkeit mineralogisch-geochemische Wechselwirkungen zwischen den Reststoffen.

3 MINERALOGISCHE GRUNDLAGEN

Die Wirkung der Konditionierung auf die Schadstoffmobilisierung lässt sich nur verstehen, wenn man den pH-Verlauf als Alterationspfad begreift, entlang dessen sukzessive unterschiedliche Puffersysteme die Lösung kontrollieren. Die Titrationskurve in Abb. 1 bildet diesen Verlauf ab: Nach Portlandit übernehmen nacheinander weitere Puffer die Kontrolle, bevor bei fortgeschrittener Karbonatisierung Calcit den pH auf ~8–9 begrenzt (Ingold et al., 2025). Der Übergang zwischen diesen Stabilitätsfeldern ist der eigentliche Treiber der Schadstoffmobilisierung.

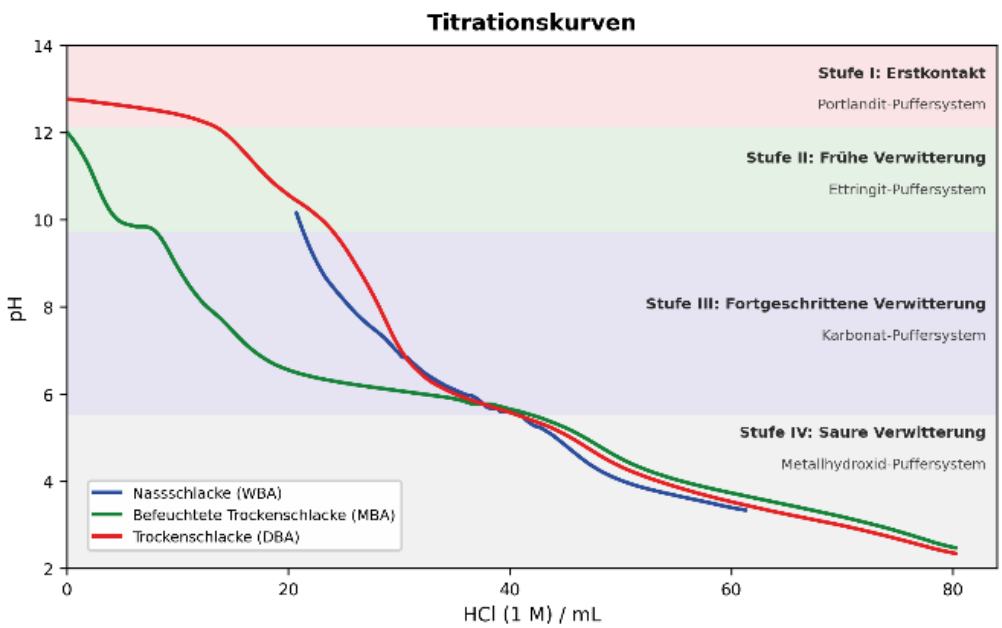


Abb. 1: Titrationskurve mit Zuordnung der Pufferstufen gemäß Ingold et al. (2025): Portlandit (pH >12.5) → Ettringit/CSH (pH ~12.5–10.5) → Karbonat (pH ~10.5–8). Der Übergang bei pH ~10.5 markiert die Destabilisierung von Ettringit und damit den kritischen Bereich der Oxyanionen-Mobilisierung.

Entlang dieser Route zeigen kationische und oxyanionische Elemente gegenläufige Muster. Kationen wie Pb, Zn und Cu werden mit sinkendem pH durch Karbonat-/Hydroxidfällung und Einbau in C-S-H immobilisiert (Cornelis et al., 2008). Oxyanionen wie CrO_4^{2-} oder MoO_4^{2-} verhalten sich entgegengesetzt. Unterschreitet der Puffer pH ~10.5, löst sich Ettringit auf und die zuvor eingebauten Oxyanionen werden freigesetzt.

4 DIE MISCHANLAGE: AUFBAU UND MÖGLICHKEITEN

Die zu konditionierenden Materialströme unterscheiden sich stark in ihrer Handhabung: Neben rieselfähigen Schüttgütern sind klebrig-pastöse Filterkuchen oder staubtrockene Feinstoffe zu

verarbeiten. Dies fordert Entladung, Lagerung, Dosierung und Mischtechnik heraus. Für die Feldstudie kommt eine mobile, dieselbetriebene kontinuierliche Mischanlage mit etwa 150 t/h zum Einsatz (Abb. 2).



Abb. 2: Mobile kontinuierliche Mischanlage der Renatec AG.

5 RESULTATE & DISKUSSION

5.1 Volumeneinsparung durch verbesserte Einbaudichte

Proctorversuche (Abb. 3) zeigen bei optimalem Wassergehalt bis zu 10–20 % höhere Einbaudichten. Im Feldproctor steigt die Trockendichte von 1,24–1,36 g/cm³ (10,5–15,9 Gew.-%) auf 1,51 g/cm³ bei 18,6 Gew.-%; Rostaschen aus dem Trockenaustrag erreichen höhere Werte als nass ausgetragene. Die Muldenversuche bestätigten die höhere Dichte und geringere Streuung des vermischte Einbau gegenüber dem geschichtete Einbau.

5.2 Fließwege je Einbauart

Zur Überprüfung der hydraulischen Konsequenzen der getesteten Einbauvarianten wurden am Ende der Pilotstudie Farbtracerversuche durchgeführt. Diese zeigen für vermischten und geschichteten Einbau unterschiedliche Merkmale (Abb. 4). In beiden Ansätzen bleibt die Verfärbung auf eine oberflächliche Kruste (30-50 cm) beschränkt. Durch die Verfestigung der während der Konditionierung stark befeuchteten trocken ausgetragenen Rostasche entsteht im vermischten Aufbau ein betonartiges Material. Auffällig ist ein randlich ausgebildetes Bruch/Kluftsystem. Dies leitet das Wasser rasch seitlich ab und zeigt eine geringe Verweildauer der beauftragten Beregnung an. Im geschichteten Einbau zeigen sich Anzeichen von gestautem Wasser und einem sehr limitierten seitlichen Abfluss. Beide Systeme entwässern somit über die von Ingold et al. (2026) beschriebenen präferentiellen Fließwege aber mit sehr unterschiedlichen Verweilzeiten des Wassers – mit direkter Relevanz für die Kontaktzeit zwischen Sickerwasser und reaktivem Material. Auffällig ist das Muster der Feuchteverteilung und somit der kapillaren Zone neben den präferentiellen Fließwegen. Während im vermischten Aufbau sehr homogene Bereiche um das Kluftsystem erscheinen, ergibt sich im geschichteten Aufbau ein eher heterogenes Bild, das mit der auftretenden Körnung korreliert.

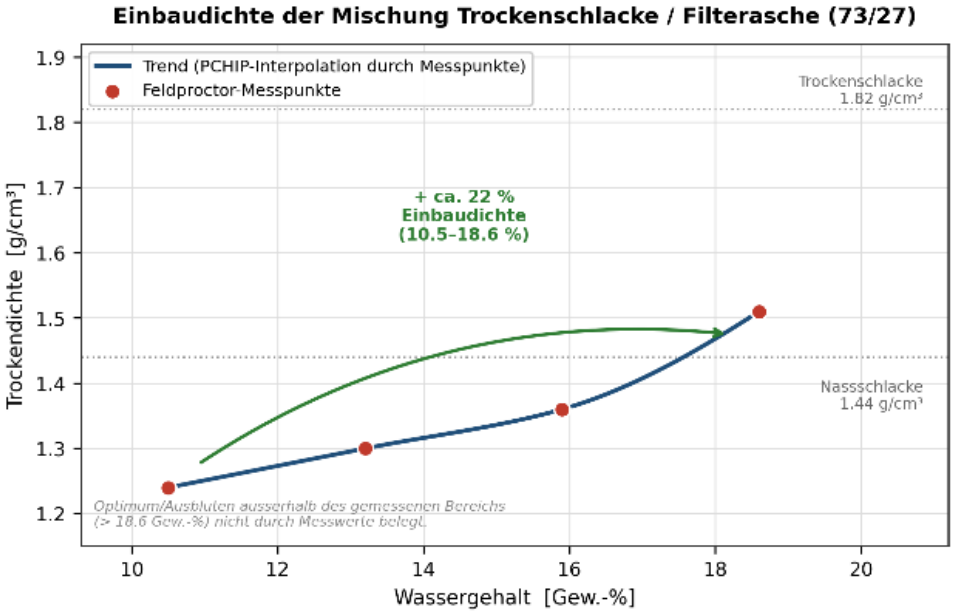


Abb. 3: Einbaudichte der Mischung Trockenschlacke/Filterasche (TS/FA, 73/27) in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Feldproctor-Messpunkte (rot) mit Trendkurve; die Einbaudichte steigt im gemessenen Bereich um rund 22 %.

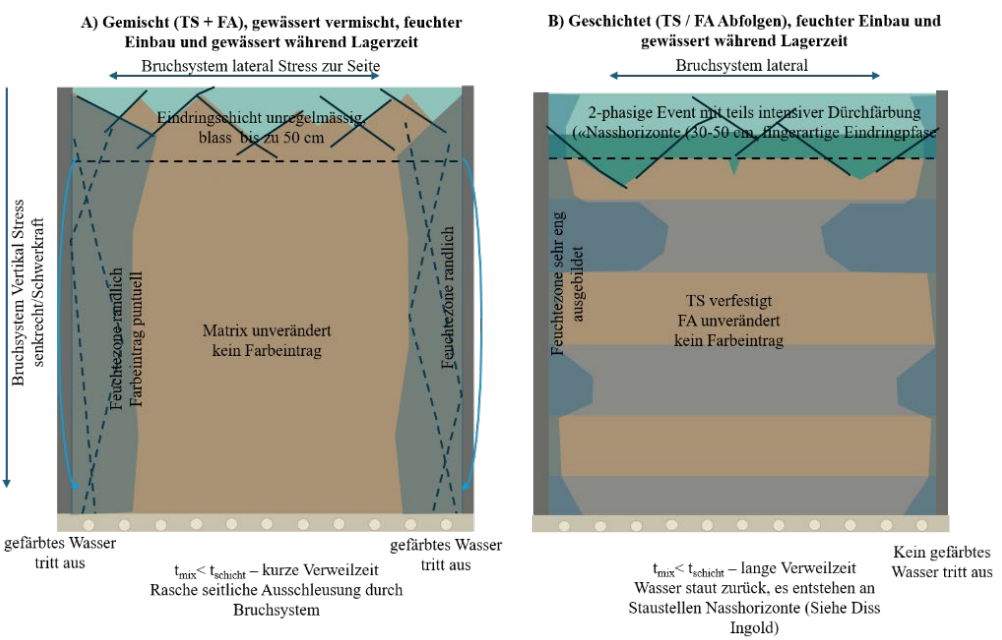


Abb. 4: Schematischer Vergleich der Profile – gemischter Einbau (links, flache blasse Kruste mit seitlichem Bruchsystem und Wasseraustritt) versus geschichteter Einbau (rechts, tiefere, fingerartige Durchfärbung ohne Wasseraustritt).

5.3 Mobilisierung von Schadstoffen

Die Analysen bestätigen den Zusammenhang zwischen Einbauart und Verweildauer. Vom geschichteten bis zum vermischten Einbau nimmt die Verweildauer ab, was sich konsistent in sinkenden Leitfähigkeits-, pH-, Schwermetall- und DOC-Werten im Sickerwasser niederschlägt. Kürzere Verweildauern und vorgängige Befeuchtung begünstigen die Kationen-Immobilisierung, da Pb, Cu und Zn rasch in das sich bildende C-S-H-/Karbonat-Gerüst eingebunden werden. Ettringit spielt eine zentrale Rolle als Trägerphase für Cr und Mo – CrO_4^{2-} wird aufgrund geometrischer Ähnlichkeit zu SO_4^{2-} gut in die SO_4-Kanäle des Ettringites eingebaut, MoO_4^{2-} nur partiell (Zhang & Reardon, 2003; Gougar et al., 1996). Für Sb deutet sich C-S-H als vergleichbar zentrale Trägerphase an. Für diese Elemente zeigen sich in den Tests unterschiedliche Verhalten. In Mischungen mit gesteigertem, lokalem SO_4-Eintrag wie aus Filterascheeinlagen wird verstärkt Mo mobilisiert. Die Ursache kann als SO_4-Schock beschrieben werden – dabei trifft Sulfatreiche Filterasche lokal auf den alkalischen Schlacke-Puffer. Der sich bildende Ettringit erhält ein überproportionales SO_4-Angebot. Da SO_4^{2-} in den Ettringit-Kanälen deutlich kompatibler eingebaut wird als MoO_4^{2-}, führt dieser Überschuss zur Mobilisierung von Mo auch bei hohen pH Bedingungen. Cr hingegen bleibt aufgrund seiner besseren geometrischen Passung eher im Gitter zurück. Bei zunehmender Alteration durch pH-Absenkung im Zuge der Karbonatisierung kommt es zur Destabilisierung von Ettringit, bei dem wiederum eingelagerte Oxyanionen mobilisiert werden. Sb ist davon unabhängig und zeigt ein uneinheitliches, sorptionsgetriebenes Verhalten.

Gegenwärtig sind Mischversuche mit HA-Zumischungen in Schlacke aufgesetzt, bei denen beide Komponenten zunächst konditioniert und anschließend gemeinsam gealtert werden. Ziel ist zu prüfen, ob sich für kritische Oxyanionen dadurch ein stabilerer Einbaupfad initiieren lässt, indem die Alterung alternative Mineralphasenbildung eröffnet und die bereits etablierten Trägerphasen (Ettringit, C-S-H) durch stärkere Sekundärphasen – Calcit-Oberflächensorption (Cr) und Powellit-Fällung, $CaMoO_4$ (Mo) – aufgefangen werden können, was auf robustere Immobilisierungspfade bei gealterten Mischungen hindeuten würde (Palmer, 2000). Zudem sollen andere funktionelle Abfälle, wie PAK-belastete Pflanzenkohle zur Schadstoffbindung untersucht werden.

6 BEDEUTUNG FÜR VOLLZUG UND PRAXIS

- Volumeneinsparung durch höhere Einbaudichte durch Konditionierung und Wassergehalt → benötigt passende Mischanlage mit kontrollierter, kontinuierlicher Wasserzugabe.
- Die Technik zum Mischen ist im industriellen Maßstab verfügbar → kann direkt umgesetzt werden.
- Konditionierung hat Vorteile: kationische Schwermetalle werden direkt gebunden.
- Schwierig bleiben oxyanionische Schwermetalle → abgestimmte Rezeptur kann dies steuern.

7 SCHLUSSFOLGERUNG

- SENKATO zeigt: gezielte Konditionierung bringt messbare Vorteile für Einbau und Emissionen.
- Mechanismus ist mineralogisch klar erklärbar – entlang des Alterationspfads (Portlandit → Ettringit → Calcit):
  - Kationen: zunehmend immobilisiert (C-S-H/Karbonat).
  - Oxyanionen (Cr, Mo): Remobilisiert bei Ettringit-Auflösung (~pH 10.5).
  - Sb: erscheint sorptiv, unabhängiges Verhalten.
- Konditionierung als Steuerungswerkzeug: die gezielte Konditionierung hinsichtlich Materialkombination und Mischungsverhältnis dient der Steuerung und Kontrolle der Schadstoffmobilisierung.

- Mobile Mischanlage macht Laborvorteile großtechnisch nutzbar – ohne neue Anlagentechnologie.
- Nächste Schritte: industrielle Tests und Langzeit Beobachtungen der Mischchargen.
- Ziel: praxistauglicher Leitfaden für Deponiebetreiber und Behörden.

LITERATURVERZEICHNIS

Bundesrat (2015). Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA), Stand 1. Januar 2023. Bern.

Cornelis, G., Johnson, C.A., Van Gerven, T., Vandecasteele, C. (2008). Leaching mechanisms of oxyanionic metalloid and metal species in alkaline solid wastes: A review. Applied Geochemistry 23(5), 955–976.

Gougar, M.L.D., Scheetz, B.E., Roy, D.M. (1996). Ettringite and CSH Portland cement phases for waste ion immobilization: A review. Waste Management 16(4), 295–303.

Ingold, P. (2024). Pollutant dynamics of bottom ash landfills. Dissertation, Universität Bern.

Ingold, P., Weibel, G., Wanner, C., Gimmi, T., Churakov, S.V. (2024). Hydrological and geochemical properties of bottom ash landfills. Environmental Earth Sciences 83, 180.

Ingold, P., Weibel, G., Kämpfer, P., Churakov, S.V. (2025). Weathering and trace element mobilisation of MSWI bottom ash from wet and dry extraction. Journal of Contaminant Hydrology 272, 104566.

Ingold, P. Weibel, G., Kosakowski, G., Gimmi, T., Wanner, C. Churakov, S.V.(2026) Water flow dynamics in bottom ash landfills. Journal of Contaminant Hydrology 276 104754

Palmer, C.D. (2000). Precipitates in a Cr(VI)-contaminated concrete. Environ. Sci. Technol. 34, 4185–4192.

Zhang, M., Reardon, E.J. (2003). Removal of B, Cr, Mo, Se by incorporation into hydrocalumite and ettringite. Environmental Science and Technology 37, 2947–2952.

KONTAKT

Dr. rer. nat. Alexander Weh
alexander.weh@unibe.ch
+41 79 636 16 76
Fachstelle Sekundärrohstoffe, Institut für Geologie, Universität Bern
https://fachstelle-sekundaerrohstoffe.unibe.ch/

Deponie auf Deponie: Planung, Bau und Betrieb eines DKI-Standortes auf einer stillgelegten DKII-Deponie

Detlef Löwe[1] & Roland Haubrichs[2]
[1)] AGR Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet mbH, Herten, Deutschland
[2)] LAMBDA Gesellschaft für Klimaschutz und regenerative Energien mbH, Herten, Deutschland

KURZFASSUNG: Die Zentraldeponie Datteln zeigt exemplarisch, wie vorhandene Deponiestandorte durch das Prinzip „Deponie auf Deponie“ weiterentwickelt werden können. Auf einem stillgelegten beziehungsweise in Stilllegung befindlichen DKII-Deponiekörper wurde ein neuer DKI-Ablagerungsbereich errichtet. Zentrales Element ist eine bifunktionale Dichtung, die zugleich Oberflächenabdichtung des Alt-körpers und Basisabdichtung des neuen DKI-Bereichs ist. Der Beitrag behandelt Genehmigung, geotechnische Nachweise, Dichtungstechnik, Sickerwasser- und Gasmanagement, Bauausführung, digital unterstützten Betrieb, Nachverdichtung und Klimaschutz. Das Projekt verbindet Entsorgungssicherheit, Flächenschonung und technische Innovation, setzt aber belastbare Standortdaten, sorgfältige Verformungsprognosen und eine enge Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde voraus.

1 AUSGANGSLAGE UND ZIELSETZUNG

Die Verfügbarkeit von Deponieraum für mineralische und nicht verwertbare Ab-fälle der Deponieklasse I ist in vielen Regionen Deutschlands angespannt. Neue Deponiestandorte sind nur schwer zu entwickeln, weil Flächenkonkurrenz, Genehmigungsdauer, Akzeptanzfragen und technische Anforderungen hoch sind. Gleichzeitig verfügen viele ältere Deponiestandorte über erschlossene Betriebsflächen, Zufahrten, Waagen, Sickerwasser- und Gasfassungssysteme sowie langjährige Mess- und Betriebserfahrungen. Genau hier setzt das Konzept „Deponie auf Deponie“ an: vorhandene Standorte werden nicht aufgegeben, sondern technisch kontrolliert weiterentwickelt.
Die Zentraldeponie Datteln wurde seit 1974 betrieben. Zunächst wurden Siedlungsabfälle mit hohen organischen Anteilen abgelagert, die nach heutiger Systematik der Deponieklasse II zuzuordnen sind. Nach Einstellung der Ablagerung organischer Abfälle Ende 1999 wurden bis Ende 2007 noch inerte Materialien wie Boden und Bauschutt angenommen. Zum 01.01.2008 wurde die Stilllegung angezeigt; anschließend wurden Setzungen beobachtet und erste Oberflächenabdichtungen hergestellt.
Vor dem Hintergrund des steigenden DKI-Bedarfs entschied AGR im Jahr 2015, einen Teil des Standortes aus der Stilllegung heraus wieder in den Ablagerungsbetrieb zu überführen. Ziel war die Schaffung neuer DKI-Kapazitäten, ohne zusätzliche Flächen in Anspruch zu nehmen. Der entscheidende Punkt ist jedoch nicht die Idee allein, sondern der Nachweis, dass der Altkörper die Zusatzlast dauerhaft auf-nehmen kann und dass Abdichtung, Entwässerung und Gasfassung langfristig funktionieren.

2 GENEHMIGUNG UND PLANUNG

Die Erhöhung der Zentraldeponie Datteln um einen DKI-Bereich wurde als Plan-feststellungsverfahren nach § 35 Abs. 2 KrWG geführt. Der Antrag wurde am 30.06.2016 bei der Bezirksregierung Münster eingereicht. Für die Antragsunterlagen waren umfangreiche gutachterliche Ausarbeitungen erforderlich, darunter Umweltverträglichkeitsuntersuchung, Verkehrs-, Geräusch-, Geruchs- und Erschütterungsgutachten, Klimagutachten, hydrogeologisches Gutachten, Untersuchungen zu Fauna und Flora sowie Standsicherheits-, Setzungs- und Sackungsberechnungen. Der Gesamtantrag umfasste einen schriftlichen Antrag mit mehr als 120 Seiten, 28 Genehmigungspläne und 12 Gutachten.

Das Verfahren wurde mit Öffentlichkeitsbeteiligung durchgeführt. Bereits im Au-gust 2015 informierte AGR betroffene Anwohner und politische Gremien der Stadt Datteln über das Vorhaben. Der Scoping-Prozess erfolgte im Dezember 2015. Nach Prüfung der Vollständigkeit wurden die Unterlagen bekannt gemacht und den Trägern öffentlicher Belange zugeleitet. Der Erörterungstermin fand im Februar 2017 statt. Der Planfeststellungsbeschluss wurde AGR am 14.08.2017 zu-gestellt und anschließend öffentlich ausgelegt.
Planerisch handelte es sich nicht um einen Standardfall. Es ging nicht um eine Deponie auf natürlichem Baugrund, sondern um die Überbauung eines bestehenden DKII-Deponiekörpers. Daraus ergaben sich besondere Fragen: Wie ist die Zwischendichtung auszubilden? Welche Zusatzlasten sind zulässig? Wie entwickeln sich Setzungen und Sackungen? Wie bleibt das Entwässerungsgefälle auch im Endzustand erhalten? Welche Gasfassungsbestandteile müssen zurückgebaut, angepasst oder neu hergestellt werden? Die Genehmigungsfähigkeit beruhte deshalb auf einer engen Verzahnung von Genehmigungsplanung, Geotechnik, Dichtungstechnik und Betrieb.
Die frühe Ausführungsplanung war ein weiterer Erfolgsfaktor. Sie wurde nicht erst nach Abschluss des Genehmigungsverfahrens begonnen, sondern parallel vorangetrieben. Dadurch konnten bauliche Detailfragen, insbesondere zur bifunktionalen Dichtung und zu den langfristigen Verformungen, frühzeitig in die Planung einfließen. Nach Zustellung des Planfeststellungsbeschlusses konnte die Vergabe zügig erfolgen. Das ist praktisch relevant: Bei knappen Deponiekapazitäten entscheidet nicht nur die Genehmigung, sondern auch die Geschwindigkeit, mit der genehmigte Kapazitäten tatsächlich verfügbar werden.
Besondere Bedeutung hatte die räumliche Zuordnung der prognostizierten Verformungen. Für die Planung genügte es nicht, lediglich einen mittleren Setzungsbetrag für den gesamten Überbauungsbereich anzugeben. Maßgebend waren vielmehr lokale Differenzsetzungen, weil diese unmittelbar auf die Funktionsfähigkeit der Dichtung, die Entwässerungsleitungen und die vorgesehenen Gefälle wirken. Die Berechnungsergebnisse wurden deshalb nicht nur als Einzelwerte, sondern als flächenhafte Verformungsbilder ausgewertet. Auf dieser Grundlage konnten Bereiche mit erhöhten Verformungsgradienten erkannt und bei der Profilierung berücksichtigt werden. Zugleich entstand eine belastbare Sollgeometrie für die Bauausführung und die spätere vermessungstechnische Kontrolle. Das Vorgehen verdeutlicht, dass die geotechnische Beurteilung einer Überhöhung auf einem Altdeponiekörper wesentlich stärker räumlich differenziert werden muss als bei einer konventionellen Gründung auf natürlichem Untergrund.
Für die Bewertung der Prognosen ist außerdem der zeitliche Verlauf entscheidend. Ein Teil der Verformungen entsteht unmittelbar mit dem Lastauftrag, weitere Anteile entwickeln sich während des fortschreitenden Einbaus und noch über Jahre nach Abschluss der Ablagerung. Diese zeitabhängigen Prozesse beeinflussen nicht nur den Endzustand, sondern auch Zwischenzustände während der Bau- und Betriebsphase. Daher mussten Baufolge, Auflastentwicklung und Messkonzept aufeinander abgestimmt werden. Die Prognose ist dabei nicht als einmaliger statischer Nachweis zu verstehen, sondern als Ausgangspunkt eines Beobachtungs- und Bewertungsprozesses. Abweichungen zwischen berechneter und gemessener Entwicklung müssen frühzeitig erkannt, fachlich eingeordnet und bei Bedarf in die weitere Betriebsplanung übernommen werden. Gerade bei heterogenen Altablagerungen schafft erst diese Verbindung von Berechnung und fortlaufender Beobachtung die notwendige Sicherheit.

3 GEOTECHNISCHE BEWERTUNG UND STANDSICHERHEIT

Der vorhandene DKII-Deponiekörper bildet beim Konzept „Deponie auf Deponie“ den Baugrund für den neuen DKI-Körper. Genau darin liegt die größte technische Unsicherheit. Ein alter Siedlungsabfallkörper ist heterogen, zeitabhängig und nur eingeschränkt mit natürlichem Boden vergleichbar. Direkte Aufschlüsse und repräsentative Laborversuche sind häufig begrenzt möglich. Deshalb mussten vorhandene Standortgutachten, hydrogeologische Daten, langjährige Verformungsmessungen, wissenschaftliche Untersuchungen und abfallmechanische Erfahrungswerte zusammengeführt und plausibilisiert werden.

Für die Standsicherheitsberechnungen wurden abfallmechanische Erfahrungswerte, Rückrechnungen offensichtlich stabiler Böschungen und GDA-Empfehlungen her-angezogen. Für den kritisch betrachteten DKII-Bereich wurden ein Reibungswinkel von 25° und eine geringe Faserkohäsion von 5 kN/m² angesetzt. Die Berechnungen erfolgten nach DIN 4084 mit dem Programm GGU-Stability. Im Ergebnis konnte die Böschungsstandsicherheit auch nach der Erhöhung bis zu maximalen Böschungsneigungen von 1:3 nachgewiesen werden.
Für die bifunktionale Zwischenabdichtung war zusätzlich ein Verformungsnach-weis erforderlich. Die Gesamtverformung setzt sich aus drei Anteilen zusammen: Setzungen des natürlichen Untergrundes infolge zusätzlicher Lasten, Kompression des profilierten DKII-Körpers durch den neuen DKI-Körper und Sackungen des Altkörpers infolge biologischer Umsetzungsprozesse der organischen Abfälle. Diese Anteile wurden getrennt berechnet, in digitale Geländemodelle überführt und anschließend überlagert. Dadurch konnte die zu erwartende Verformungsmulde flächenhaft beschrieben werden.
Die Untergrundsetzungen wurden mit konventionellen bodenmechanischen Verfahren berechnet. Für den bestehenden DKII-Körper wurde eine mittlere Wichte von 15 kN/m³ angesetzt; für den neuen DKI-Körper wurde ein spezifisches Gewicht von 20 kN/m³ zugrunde gelegt. Für die Kompression des DKII-Körpers wurden Steifemoduli nach GDA-Empfehlungen angesetzt und mit neueren Untersuchungen zum Setzungsverhalten von Siedlungsabfällen abgeglichen. Die Sackungsprognose stützte sich auf Messungen aus den Jahren 2001 bis 2015 und auf Prognosen zur biologischen Umsetzung. Entscheidend war die vorsichtige, aber nachvollziehbare Ableitung der Kennwerte; pauschale Tabellenwerte hätten dafür nicht ausgereicht.
Nachzuweisen war, dass das Entwässerungssystem der bifunktionalen Dichtung im Endzustand ein Mindestgefälle von 5 % behält und dass die Verformungen keinen unzulässigen Krümmungsradius verursachen. Die Dichtung wurde deshalb im Bau-zustand mit etwa 7 % Gefälle hergestellt. Die Prognose ergab im Endzustand ein verbleibendes Mindestgefälle von etwa 5,5 %. Damit blieb die Gebrauchstauglichkeit rechnerisch erhalten.
Die Ausbildung der Anschlüsse und Übergänge war ebenso wichtig wie der Regelaufbau. Randbereiche, Durchdringungen, Rohranschlüsse und Übergänge zu bereits hergestellten Abdichtungsabschnitten stellen erfahrungsgemäß die sensibelsten Punkte eines Dichtungssystems dar. Dort treffen unterschiedliche Materialien, Bauzustände und Verformungsverhalten aufeinander. Die Detailplanung musste deshalb sicherstellen, dass die einzelnen Komponenten auch unter den erwarteten Setzungen kraftschlüssig beziehungsweise gleitfähig zusammenwirken, ohne unzulässige Spannungen in der Kunststoffdichtungsbahn zu erzeugen. Hinzu kamen Anforderungen an die Prüfbarkeit und Dokumentation der Nähte sowie an die eindeutige Zuordnung der Bauabschnitte. Der Qualitätsnachweis beruhte somit nicht allein auf Materialzertifikaten, sondern auf einer lückenlosen Fremd- und Eigenprüfung von Untergrund, mineralischen Schichten, Kunststoffdichtungsbahn, Schutzlagen und Entwässerungselementen.
Während der Herstellung war der Schutz der bereits fertiggestellten Dichtung gegen mechanische Beschädigungen ein eigenständiger Arbeitsschwerpunkt. Bauverkehr, Materialumschlag und Witterung können bei einem geneigten und verformungsempfindlichen System erhebliche Risiken verursachen. Befahrungsregeln, definierte Transportwege und eine kontrollierte Aufbringung der Schutz- und Entwässerungsschichten waren daher verbindlich festzulegen. Gleichzeitig durfte die erforderliche Verdichtung der aufliegenden Schichten nicht zu einer Überbeanspruchung der Dichtung führen. Die Bauüberwachung musste diese teilweise gegenläufigen Anforderungen fortlaufend abgleichen. Das Beispiel zeigt, dass die Qualität einer bifunktionalen Dichtung nicht allein durch die richtige Schichtenfolge bestimmt wird. Entscheidend ist vielmehr, ob Planung, Bauverfahren, Materiallogistik und Qualitätssicherung als zusammenhängendes System organisiert werden.

4 TECHNISCHE KONZEPTION DER BIFUNKTIONALEN DICHTUNG

Das Schlüsselbauwerk des Projektes ist die bifunktionale Dichtung. Sie übernimmt zwei Aufgaben gleichzeitig: Sie ist Oberflächenabdichtung des bestehenden DKII-Deponiekörpers und

Basisabdichtung des neuen DKI-Deponiebereichs. Diese Doppelfunktion macht das System anspruchsvoller als eine klassische Oberflächenabdichtung oder eine übliche Basisabdichtung. Es muss den Altkörper gegen eindringendes Wasser sichern, den neuen DKI-Bereich nach unten abdichten, Setzungen aufnehmen und zugleich eine dauerhaft funktionierende Entwässerung ermöglichen.
Der Aufbau wurde so gewählt, dass die jeweils strengeren Anforderungen aus Basis- und Oberflächenabdichtung erfüllt werden. Von unten nach oben umfasst das System im Wesentlichen Trag- und Ausgleichsschicht, mineralische Dichtungs-schichten, Kunststoffdichtungsbahn, Schutzlage und Entwässerungsschicht. Eine klassische Rekultivierungsschicht ist nicht vorgesehen; die Schutzfunktion wird konstruktiv über Schutz- und Entwässerungsschichten gesichert.
Da ein solches System in der Deponieverordnung nicht ausdrücklich als Regelfall beschrieben ist, musste die Auslegung fachlich abgeleitet und mit der Genehmigungsbehörde abgestimmt werden. Herangezogen wurden unter anderem fachliche Empfehlungen wie das LANUV-Arbeitsblatt 13 sowie die projektspezifischen Nachweise zur Verformung und Entwässerung. Der Fall zeigt klar: Innovative Deponietechnik funktioniert nicht über Abweichungen „nach Gefühl“, sondern nur über begründete Gleichwertigkeit und belastbare Nachweise.
Für den langfristigen Betrieb ist die eindeutige hydraulische Trennung beider Deponiebereiche dauerhaft nachzuweisen. Neben der baulichen Trennung betrifft dies die Messung, Probenahme, Bilanzierung und Bewertung der anfallenden Wassermengen. Veränderungen der Sickerwassermengen können Hinweise auf den Fortschritt der Abdichtungswirkung, auf außergewöhnliche Niederschlagsereignisse oder auf betriebliche Besonderheiten geben. Die getrennte Erfassung verbessert daher nicht nur die Behandlungsmöglichkeiten, sondern auch die Ursachenanalyse bei Abweichungen. Voraussetzung ist ein Messkonzept, das Durchflüsse, Qualitäten und Betriebszustände nachvollziehbar dokumentiert. Gleiches gilt für die Gasfassung: Die Überbauung verändert Druckverhältnisse und Strömungswege im Altkörper. Deshalb müssen Gasbrunnen, horizontale Sammler und Leitungen regelmäßig auf Funktion, Zugänglichkeit und mögliche Setzungseinwirkungen geprüft werden.

5 SICKERWASSER- UND GASMANAGEMENT

Mit der bifunktionalen Dichtung wurde eine konsequente Trennung der Stoffströme umgesetzt. Das Sickerwasser des DKII-Körpers und des neuen DKI-Bereichs wird getrennt erfasst und separat behandelt. Erst nach der Reinigung erfolgt die weitere Ableitung.
Betrieblich anspruchsvoll sind die hohen Leitungsgefälle. Das Längsgefälle der bi-funktionalen Dichtung beträgt etwa 7 %. In einzelnen Vollrohrabschnitten treten bis zu 15 % auf. Für TV-Inspektion und HD-Reinigung bringen diese Randbedingungen sehr hohe Anforderungen an Kameratechnik, Steuerkabel, Fahrwerk und Reinigungsequipment mit sich.
Auch die Deponiegasfassung musste neu gedacht werden. Ursprünglich waren 35 Gasbrunnen mit Leitungsnetz und Unterstationen vorhanden. Durch die Überbauung wurden Teile dieser Infrastruktur überdeckt. Erforderlich waren Anpassungen, Teilrückbau bestehender Brunnen und die Integration horizontaler Gasfassungssysteme. Ziel war, die Gasfassung und Wartbarkeit trotz neuer Auflast zu erhalten und Emissionen weiter zu minimieren.
Der digital unterstützte Betrieb ermöglicht darüber hinaus eine belastbare Massen- und Volumenbilanz. Aus den regelmäßig erzeugten Geländemodellen lassen sich nicht nur die eingebauten Kubaturen, sondern in Verbindung mit den verwogenen Tonnagen auch mittlere Einbaudichten ableiten. Damit wird sichtbar, ob die betriebliche Verdichtung die planmäßigen Annahmen erreicht und wie sich unterschiedliche Abfallarten auf die Ausnutzung des genehmigten Volumens auswirken. Die Daten bilden zugleich eine Grundlage für Restvolumenprognosen, Bauablaufplanung und wirtschaftliche Steuerung. Wichtig ist allerdings eine einheitliche Datenstruktur: Vermessung, Waagedaten, Einbaubereiche und Zeiträume müssen eindeutig miteinander verknüpft sein. Erst dann entsteht aus einzelnen digitalen Werkzeugen ein belastbares Betriebsführungssystem.

6 BAUAUSFÜHRUNG, BETRIEB UND QUALITÄTSSICHERUNG

Die Umsetzung erfolgte in vier Bauabschnitten. Nach Zustellung des Planfeststellungsbeschlusses im August 2017 begann der Bau am 04.09.2017. Der erste Bau-abschnitt wurde am 24.07.2018 abfallrechtlich abgenommen und am 19.09.2018 in Betrieb genommen. Der zweite Bauabschnitt wurde am 13.02.2019 abgenommen und am 01.03.2021 in Betrieb genommen. Die Bauarbeiten für den dritten und vierten Bauabschnitt begannen im Februar 2020; deren gemeinsame abfallrechtliche Abnahme erfolgte am 01.12.2021.
Die abschnittsweise Umsetzung war zweckmäßig, weil dadurch frühzeitig Ablagerungskapazitäten bereitgestellt und Erfahrungen aus den ersten Bauabschnitten in die weiteren Bauphasen übernommen werden konnten. Gerade bei den vielen Schnittstellen zwischen Abdichtung, Entwässerung, Gasfassung, Setzungsprognose und Betrieb ist ein schrittweises Vorgehen deutlich besser beherrschbar.
Beim Abfalleinbau musste zunächst wegen des Gefälles der Dichtung eine ebene Arbeitsfläche hergestellt werden. Danach konnte der weitere Einbau weitgehend regulär erfolgen. Zur Qualitätssicherung wird eine GPS-gesteuerte Raupe mit 3D-Maschinensteuerung eingesetzt. Die Sollgeometrie liegt direkt in der Kabine vor; Position und Schildstellung werden fortlaufend mit den Solldaten verglichen. Dadurch erfolgt der Einbau profil- und höhengerecht.
Ergänzend erfolgen Kontrollmessungen mit Rover-System sowie Verdichtung mit dynamischer Glattmantelwalze. Vierteljährliche UAV-Vermessungen liefern 3D-Punktwolken, Orthophotos, digitale Geländemodelle und Volumenberechnungen. Damit lassen sich Einbauvolumen, Dichteentwicklung und Setzungsverhalten besser dokumentieren und Abweichungen früher erkennen.
Die digitale Dokumentation erfüllt dabei nicht nur eine vermessungstechnische Aufgabe, sondern bildet zugleich eine belastbare Grundlage für die betriebliche Steuerung. Aus den wiederkehrenden Geländemodellen lassen sich Veränderungen der Einbauoberfläche, örtliche Verdichtungsunterschiede und Abweichungen von der genehmigten Kubatur nachvollziehen. Dadurch können Einbaukonzept, Geräteeinsatz und Materialverteilung frühzeitig angepasst werden. Für einen Deponiekörper, dessen Untergrund selbst zeitabhängigen Verformungen unterliegt, ist diese engmaschige Rückkopplung besonders wichtig. Planung, Bau und Betrieb werden nicht als voneinander getrennte Phasen behandelt; vielmehr werden Messdaten fortlaufend in die Bewertung des tatsächlichen Systemverhaltens einbezogen.
Für die Übertragbarkeit des Konzeptes ist deshalb neben der rechnerischen Bemessung ein langfristig angelegtes Beobachtungs- und Kontrollprogramm erforderlich. Setzungsmarken, Vermessungsdaten, Sickerwassermengen, Leitungsinspektionen und Ergebnisse der Gasfassung müssen gemeinsam betrachtet werden. Einzelne unauffällige Messwerte reichen nicht aus, wenn sich aus der Gesamtschau Hinweise auf lokale Verformungen, veränderte Gefälle oder betriebliche Einschränkungen ergeben. Die Erfahrungen in Datteln zeigen, dass technische Reserven bereits in der Planung vorgesehen und die wesentlichen Anlagen für Kontrolle, Reinigung und Instandhaltung dauerhaft zugänglich bleiben müssen. Erst diese Verbindung aus vorsichtiger Prognose, qualitätsgesicherter Bauausführung und kontinuierlicher Überwachung macht aus einer innovativen Sonderlösung ein dauerhaft beherrschbares Deponiesystem.

7 NACHVERDICHTUNG UND VOLUMENRÜCKGEWINNUNG

Da neues Deponievolumen schwer genehmigungsfähig ist, wird die bessere Aus-nutzung vorhandener Volumina wichtiger. Auf der Zentraldeponie Datteln wurde im Oktober 2022 ein Versuch mit Impulsverdichtung durchgeführt. Ein 9 t schweres Fallgewicht verdichtet über eine Stahlplatte den Untergrund; entstehende Krater werden aufgefüllt und erneut verdichtet. Unter günstigen Bedingungen sind Tiefenwirkungen bis etwa 9 m möglich. Der Versuch erfolgte auf einem 25 x 40 m großen Probefeld und wurde durch TERRA-MIX, TÜV Nord, DMT und HTWK Leipzig begleitet.
Die Versuchsauswertung zeigte, dass außerhalb des Deponiekörpers keine wesentlichen Staub- oder Erschütterungsimmissionen festgestellt wurden. Innerhalb des Versuchsfeldes traten Immissionen nur lokal auf und lagen unterhalb der Richtwerte. Das ist positiv, ersetzt aber keine

Einzelfallprüfung: Abdichtungen, Leitungen, Gasfassung und Standsicherheit dürfen nicht gefährdet werden.

8 KLIMASCHUTZ

Ein weiterer Baustein ist das Klimaschutzkonzept zur Deponiegasfassung und -behandlung. Deponiegas enthält Methan, das deutlich klimawirksamer ist als Kohlendioxid. Durch Umbau und Optimierung der Gasfassung sowie die Behandlung von Gutgas und Schwachgas konnten zusätzliche Methanmengen erfasst und behandelt werden. Im Ausgangsdokument werden Einsparungen von rund 2.979 t CO2-Äquivalenten pro Jahr dargestellt; für Methan wird ein Global Warming Potential von 28 angesetzt.
Der Klimaschutzaspekt ist damit kein Nebenthema. Gerade alte DKII-Körper können weiterhin relevante Gasemissionen aufweisen. Wer solche Standorte überbaut, muss die Gasfassung deshalb erhalten und möglichst verbessern.

9 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt Zentraldeponie Datteln zeigt, dass „Deponie auf Deponie“ technisch und genehmigungsrechtlich möglich ist, wenn die Nachweise konsequent geführt werden. Erfolgsfaktoren sind belastbare Standortdaten, realistische Setzungs- und Sackungsprognosen, ein funktionales Dichtungskonzept, beherrschbare Entwässerung, angepasste Gasfassung und ein überwachten Betrieb.
Die bifunktionale Dichtung ist der Kern des Projekts. Sie macht die Überbauung des DKII-Körpers mit einem DKI-Bereich möglich, verlangt aber besondere Sorg-falt. Das Projekt ist kein einfach kopierbares Muster, sondern ein Best-Practice-Beispiel. Übertragbar ist es nur nach standortspezifischer Prüfung der geotechnischen, hydraulischen, gastechnischen und betrieblichen Randbedingungen.

LITERATURVERZEICHNIS

AGR / Projektunterlagen Zentraldeponie Datteln. Planung, Bau und Betrieb eines DKI-Standortes auf einer stillgelegten DKII-Deponie.
GDA-Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponien und Altlasten“.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Detlef Löwe
detlef.loewe@agr.de
+49 209 9705 820
Geschäftsbereich Abfall- und Ressourcenwirtschaft
Bereichsleiter Deponiemanagement
AGR Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet mbH)
Im Emscherbruch 11
45699 Herten
www.agr.de

Dr.-Ing. Roland Haubrichs
roland.haubrichs@lambda.de
+49 2366 9344 183
LAMBDA Gesellschaft für Klimaschutz und regenerative Energien mbH
Hertener Mark 3
45699 Herten
www.lambda.de

Forschungsvorhaben RE-LAND: Altlastenstandorte und kontaminierte Flächen als Ressource

Daniela Sager[1], Christian Blothe[2] & Soraya Heuss-Aßbichler[2]
[1)] GEOCONSULT ZT GmbH, Puch bei Hallein, Österreich
[2)] Ludwig-Maximilians-Universität München, Lehrstuhl für Geologie, München, Deutschland

KURZFASSUNG: Die Wiedereingliederung von Altlastenstandorten und kontaminierten Flächen in den Wirtschaftskreislauf ist ein zentrales Ziel der Umweltpolitik. Basierend auf dem Reparaturprinzip erfolgt die Umsetzung risikobasiert und einzelfallspezifisch. Eine begrenzte Datenverfügbarkeit und fehlende harmonisierte Bewertungsmaßstäbe können jedoch Unsicherheiten in der Entscheidungsfindung zur Folge haben. Das Projekt RE-LAND behandelt Altlastenstandorte und kontaminierte Flächen systematisch als Ressource im Sinne von Land und Boden und überträgt hierzu die United Nations Framework Classification for Resources (UNFC) auf diesen Anwendungsbereich. Daraus wird ein mehrdimensionaler Bewertungs- und Klassifikationsrahmen entwickelt, der Flächenrecyclingprojekte hinsichtlich Projektreife, Machbarkeit und Risiko vergleichbar einordnet. Die praktische Anwendbarkeit wird im Rahmen einer vorläufigen Auswertung anhand der historischen Altlast Sattler exemplarisch aufgezeigt.

1 AUSGANGSLAGE

Die Europäische Union verfolgt mit der Bodenstrategie 2030 das Ziel, Böden bis 2050 in einen gesunden Zustand zu überführen, den Flächenverbrauch zu reduzieren und Kontaminationen so weit zu minimieren, dass keine Gefährdung für Mensch und Umwelt besteht. Die Bewertung von Altlasten erfolgt derzeit überwiegend im Sinne des Reparaturprinzips, risikobasiert und einzelfallspezifisch. Eine begrenzte Datenverfügbarkeit und fehlende harmonisierte Bewertungsmaßstäbe können jedoch Unsicherheiten in der Entscheidungsfindung zur Folge haben. Vor diesem Hintergrund verfolgt das Projekt RE-LAND („REstoration and sustainable REintegration of brownfield LAND into the economic cycle using UNFC“) das Ziel, Altlastenstandorte und kontaminierte Flächen als Ressource im Sinne von Land und Boden zu bewerten und einen standardisierten, mehrdimensionalen Bewertungs- und Klassifikationsrahmen zu entwickeln. Der vorliegende Beitrag beschreibt einen Zwischenstand der methodischen Entwicklung und deren exemplarische Anwendung.

2 EINORDNUNG VON LAND UND BODEN ALS RESSOURCE IM KONTEXT VON ALTLASTEN

Land und Boden erfüllen zentrale ökologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Funktionen und sind begrenzte, mehrfach belastete Ressourcen. Sie stellen Lebensraum dar, sind Bestandteil von Stoffkreisläufen, schützen das Grundwasser und dienen zugleich als Standort für Siedlung, Infrastruktur und wirtschaftliche Nutzung. Vor diesem Hintergrund hat die Betrachtung von Land und Boden als Ressource in Umwelt- und Nachhaltigkeitsstrategien deutlich an Bedeutung gewonnen. Eine ausschließlich monetäre Bewertung bildet diese Funktionen nur unzureichend ab. Vor dem Hintergrund des Flächenverbrauchs gewinnt daher die Nutzung bereits belasteter oder brachliegender Flächen an Bedeutung.
Altlastenstandorte und kontaminierte Flächen weisen jedoch häufig Nutzungshindernisse, wirtschaftliche Unsicherheiten und erhöhte Anforderungen im Genehmigungs- und Sanierungsprozess auf. Der wesentliche Innovationsansatz im Projekt RE-LAND besteht darin, Altlastenstandorte und kontaminierte Standorte nicht ausschließlich als Last, sondern als Ressource zu verstehen. Damit wird der bisherige Bewertungsansatz, der vorrangig auf Gefahrenabwehr

ausgerichtet ist, um eine strukturierte Betrachtung von Nutzungspotenzialen erweitert (Sager & Heuss-Aßbichler, 2026).

3 BEWERTUNGS- UND KLASSIFIKATIONSANSATZ (UNFC / RE-LAND)

3.1 Klassifikation gem. UNFC

Die UNFC wurde in den 1990er Jahren für den Rohstoffsektor entwickelt und dient heute als international anerkanntes Klassifikationssystem zur strukturierten Klassifikation von Projekten (UNECE, 2019). Eine vertiefende Darstellung der UNFC-Systematik, ihrer Begriffe und Anwendungsbereiche findet sich in der einschlägigen Fachliteratur (Kral, et al., 2018) und den entsprechenden Leitdokumenten (UNECE, 2019), (UNECE, 2020). Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird ein kurzer Überblick über die Methodik gegeben, die für die Anwendung auf Altlastenstandorte und kontaminierte Flächen maßgeblich sind.

3.2 SARA4UNFC - Methodik

Für anthropogene Ressourcen wurde im Rahmen des Horizon-Europe-Projekts FutuRaM die Methodik SARA*4*UNFC (*Structured Anthropogenic Resource Assessment for UNFC*) entwickelt (Heuss-Aßbichler, Jayasinghe, Dorri, & Stegemann, 2026). Sie stellt eine strukturierte Bewertungslogik dar, die der späteren Klassifikation methodisch vorausgeht (Abb. 1).
SARA*4*UNFC operationalisiert die drei UNFC-Achsen über definierte Bewertungskriterien: die E-Achse umfasst wirtschaftliche, soziale, ökologische und rechtliche Aspekte, die F-Achse bildet die technische Umsetzbarkeit ab und die G-Achse beschreibt die Vertrauenswürdigkeit beziehungsweise Belastbarkeit der Datengrundlage. Jedes Kriterium wird durch Steuerungsfaktoren (controlling factors) und messbare Indikatoren kategorisiert. Aus der Kombination der Kategorisierung der Faktoren ergibt sich die UNFC-Klasse *ExFyGz*. Das Ergebnis ist eine nachvollziehbare Einordnung von Projektreife, Machbarkeit und Risiko auf Basis der vorhandenen Datenlage, die für alle Stakeholder eine solide Grundlage für eine Entscheidungsfindung bietet.

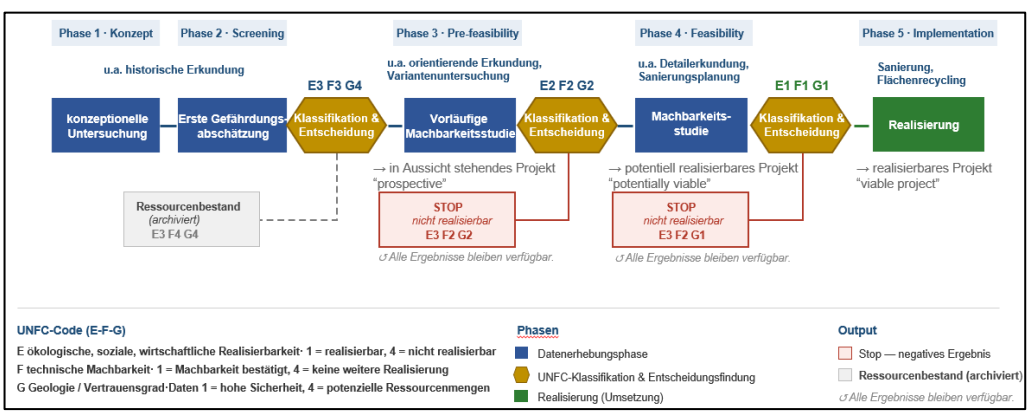


Abb. 1: Mehrdimensionaler Bewertungs- und Klassifikationsrahmen für Land als Ressource gemäß SARA*4*UNFC (Heuss-Aßbichler, Jayasinghe, Dorri, & Stegemann, 2026).

3.3 Adaption des mehrdimensionalen Bewertungs- und Klassifikationsrahmens für Land und Boden als Ressource

Im Zuge des Projekts RE-LAND wird die entwickelte Methodik SARA*4*UNFC adaptiert. Diese Adaption in Form von SALAR*4*UNFC überträgt die Architektur des SARA*4*UNFC-Frameworks auf die Ressource Land und Boden und ergänzt diese um spezifische Steuerungsfaktoren und Indikatoren. Wie in Abb. 1 dargestellt, wird mit zunehmendem Kenntnis- und Detaillierungsgrad die Klassifikation fortgeschrieben und bildet die Entwicklung von der ersten Einschätzung über die Standortuntersuchung und Sanierungsplanung bis zur Implementierung ab. Ziel dieses Ablaufs ist es, die Voraussetzungen für eine belastbare Sanierungsentscheidung und die mögliche anschließende Wiedereingliederung der Fläche in den Wirtschaftskreislauf im Sinne des Flächenrecyclings transparent darzustellen.

4 SANIERUNG DER HISTORISCHEN ALTLAST SATTLER IN SCHONUNGEN

4.1 Historischer Hintergrund

Im Ortszentrum von Schonungen, östlich von Schweinfurt, befand sich im 19. und frühen 20. Jahrhundert die Farbenfabrik Sattler. Durch die Produktion arsen- und schwermetallhaltiger Farben, unter anderem das „Schweinfurter Grün“, kam es zu erheblichen Boden- und Grundwasserbelastungen. Die Kontamination betraf rund 11 ha und über 120 Grundstücke. Im Rahmen der Sanierung wurden etwa 185.000 t belasteter Boden entfernt. Im Folgenden wird die Bewertung retrospektiv basierend auf den Berichtsunterlagen durchgeführt. Die Fallstudie dient als Anwendungsbeispiel für den derzeit in Entwicklung befindlichen mehrdimensionalen RE-LAND-Bewertungs- und Klassifikationsrahmen.

4.2 Screening

Im Folgenden werden die Dokumentationen rückblickend angewandt und die Daten für verschiedene Projektphasen verwendet. Für das Screening im RE-LAND-Projekt wurden zunächst Leitfragen formuliert, anhand derer relevante Projektmerkmale vorläufig strukturiert erfasst werden können. Sie wurden in Tab. 1 zusammengefasst. Die qualitativen Befunde bilden die Grundlage der nachfolgenden formalen UNFC-Klasse in Tab. 2.

Tab. 1: Screening-Leitfragen am Beispiel der historischen Altlast Sattler.

Leitfragen	Befund am Beispiel der historischen Altlast Sattler
Wer ist betroffen?	In erster Linie die Bevölkerung des Ortes im Schadenszentrum. Im weiteren Umfeld des Ortes Personen, die ihr Eigentum veräußern möchten, aber aufgrund der Altlast, obwohl nicht direkt betroffen, dennoch unter dem schlechten Image als „verseuchter Ort“ leiden und Grundstücke nicht oder weit unter Preis veräußern müssen. Die Gartennutzung ist eingeschränkt (Bewässerung Gemüseanbau mit eigenem Grundwasser). Weiterhin betroffen ist das Land Bayern, das für die Sanierungskosten herangezogen wird.
Besteht unmittelbare Gefahr für Menschen? (E – Achse Sozial)	Ja - Bodenkontaminationen treten an der Oberfläche auf (grüne, arsenhaltige Aggregate) und können als Staub inhaliert oder über Wurzeln von Gartengemüse aufgenommen werden, oder durch das belastete Grundwasser bei der Gartenbewässerung verbreitet werden.
Besteht unmittelbare Gefahr für die Umwelt? (E-Achse Ökologie)	Ja - massive Grundwasser- und Bodenkontamination; auch abstromiges Grundwasser weist noch erhöhte Belastungen auf.
Wird durch die Maßnahme der Bodenwert beeinflusst? (E - Achse Wirtschaft)	Ja - Grundstücke sind quasi unverkäuflich, erst durch Sanierung ist wieder mit einer normalen Grundstücks-Marktentwicklung zu rechnen; drohende Abwärtsspirale im Ortskern, wenn weiterhin Grundstücke wertlos sind oder negativ bewertet werden.
Führt die Sanierung zu nachhaltiger Verbesserung?	Ja - Gefahrenbeseitigung für Mensch und Grundwasser; Wertsteigerung der sanierten Grundstücke; Chance für eine städtebauliche Aufwertung des Ortszentrums nach Sanierungsabschluss.
Ist die Sanierung sozialverträglich umsetzbar? (E-Achse Sozial)	Es ist mit Spannungen in der Bevölkerung zu rechnen; auch Bürger, deren Grundstück nicht saniert wird, werden durch die Baustelle massiv beeinträchtigt, ohne dass sie einen direkten „Nutzen“ haben; die betroffenen Bürger mit belasteten Grundstücken können versucht sein, die Sanierung für eigene Vorteile zu nutzen (z. B. besondere Schwere, Langzeitschädigung).
Ist die Sanierung technisch umsetzbar? (F-Achse)	Aufgrund der Lage in einem bebauten Gebiet herausfordernd, aber technisch machbar; mit starken Einschränkungen für die Bevölkerung des Schadenszentrums; aufgrund der Kleinräumigkeit ist mit einer Bauzeit über mehrere Jahre zu rechnen.

4.3 Vorläufige Bewertung und Klassifikation

Die vorläufige Bewertung bezieht sich auf den Projektstand der Sanierungsuntersuchung. Zu diesem Zeitpunkt lagen bereits umfangreiche Informationen zur Schadstoffsituation, zur räumlichen Ausdehnung der Kontamination sowie zu den grundsätzlichen Sanierungsoptionen vor. Einzelne technische, rechtliche, soziale und organisatorische Fragen waren jedoch noch nicht abschließend geklärt. Tab. 2 zeigt ausgewählte Faktoren der E-Achse.

Tab. 2: Ausgewählte Faktoren zur E-Achse für die historische Altlast Sattler (Stand Sanierungsuntersuchung).

E-Aspekt	Befund (Stand Sanierungsuntersuchung)	Sub-Klasse
Wirtschaftlichkeit	Projekt nicht rentabel, aber durch Land Bayern überwiegend finanziert; Budgetobergrenzen definiert; Wertsteigerung nach Sanierung absehbar.	E1.2
Soziale Aspekte	Spannungen zwischen Grundstückseigentümern (Wertzuwachs ungleich verteilt); Bürgerproteste; absehbare lange Bauzeit (~3 Jahre).	E3.1
Rechtliche Aspekte	Verbindlicher Sanierungsplan und Sanierungsvertrag noch zu erstellen; Einzelgenehmigungen noch nicht gebündelt.	E3.1
Ökologische Aspekte	Erhebliche Beeinträchtigungen während der Bauzeit, aber grundsätzliche Verbesserung; Umgestaltung der Ortsmitte mit Flusslauf Steinach angedacht.	E1.2
E-Achsen-Gesamt (Minimum)		**E3.1**

Die F- und G-Achse werden nachfolgend verbal zusammenfassend beschrieben. Für die G-Achse ergibt sich aufgrund der umfangreichen Untersuchungen und der belastbaren Eingrenzung der Kontamination G2. Die F-Achse wird mit F2.3 eingestuft, da die technische Umsetzbarkeit grundsätzlich gegeben war, wesentliche Detailfragen etwa zur Baugrubensicherung, zur Grundbruchsicherheit, zu Sicherungsmaßnahmen an Bestandsbauten, zu Spartenumlegungen und zur Entsorgungslogistik jedoch noch weiter zu konkretisieren waren. Für das Kerngebiet ergibt sich damit die vorläufige Klassifikation E3.1–F2.3–G2. Die Bewertung macht damit jene Aspekte sichtbar, die für die weitere Projektentwicklung von besonderer Bedeutung sind, und schafft eine nachvollziehbare Grundlage für die Priorisierung weiterer Untersuchungs-, Planungs- und Kommunikationsmaßnahmen.

4.4 Nutzen für beteiligte Interessengruppen

Zwischen den beteiligten Interessengruppen bestanden Spannungen. Auch das Land Bayern selbst, das einen Großteil der Sanierungskosten übernommen hatte, wurde zu einem eigenen Interessenvertreter. In dem Spannungsdreieck aus direkt betroffenen Bürgerinnen und Bürgern im Sanierungsbereich, indirekt betroffenen Bürgerinnen und Bürgern außerhalb des Sanierungsbereichs sowie dem Land Bayern als Finanzierer bestanden stark gegensätzliche Interessen. Die direkt Betroffenen wollten möglichst hohe finanzielle Entschädigungen und Einfluss auf die Planung nehmen. Die indirekt Betroffenen erhielten hingegen keine finanziellen Leistungen, mussten jedoch die Belastungen des Sanierungsbetriebs mittragen. Das Land Bayern wiederum verfolgte das Ziel, die erforderlichen Sanierungsmaßnahmen mit möglichst geringem Mitteleinsatz umzusetzen. Mit einer frühzeitigen Einordnung nach UNFC hätte das reaktiv eingeführte Kommunikationskonzept bereits früher ansetzen und die Projektgruppe zur Moderation der unterschiedlichen Interessen schon zu einem früheren Zeitpunkt eingerichtet werden können.
Die Aufwertung des Ortsbildes durch die städtebauliche Umgestaltung des Sanierungsbereiches wurde erst relativ spät in das Gesamtplanungskonzept integriert. Die Umgestaltung der Sanierungsbereiche, die ursprünglich durch den Totalaushub vollständig entstellt worden waren, entwickelte sich in weiterer Folge zu einem wesentlichen Element der Neugestaltung. Sie trug nachhaltig zu einer positiven Veränderung des Ortsbildes bei und hätte bereits zu einem früheren Zeitpunkt kommuniziert werden können. Dadurch hätten auch jene Bürgerinnen und Bürger, die von der Sanierung nicht unmittelbar betroffen waren, erkennen können, dass ein neuer Ortskern entsteht, der der gesamten Gemeinde zugutekommt und den Ort insgesamt aufwertet.

5 DISKUSSION

Die Fallstudie zeigt, dass sich die im Rahmen von FutuRaM entwickelte Methodik SARA*4*UNFC grundsätzlich auf Altlastenstandorte und kontaminierte Flächen übertragen lässt. Im Projekt RE-LAND wird dieser Ansatz derzeit für Land und Boden als Ressource adaptiert und um spezifische Steuerungsfaktoren und Indikatoren ergänzt. Die retrospektive Anwendung auf die historische Altlast Sattler verdeutlicht, dass durch den mehrdimensionalen Bewertungs- und Klassifikationsrahmen bereits in frühen Projektphasen wesentliche Einflussfaktoren, Unsicherheiten, Nutzungskonflikte sowie Chancen und Hemmnisse systematisch erfasst werden können. Dabei stehen Fragen im Mittelpunkt, welche Informationen bereits vorliegen, welche Unsicherheiten noch bestehen, welche Faktoren die Umsetzbarkeit beeinflussen und welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit letztlich aus einer belasteten Fläche wieder ein nutzbarer Standort werden kann.

RE-LAND unterstützt damit eine nachvollziehbare Einordnung von Projektreife und Datenqualität über unterschiedliche Projektphasen hinweg. Dadurch werden Entscheidungsgrundlagen transparent und die Kommunikation zwischen Behörden, Eigentümerschaft, Planungsteams sowie weiteren Beteiligten gestärkt. Da sich die Methodik derzeit noch in Entwicklung befindet, sind die Ergebnisse als Zwischenstand zu verstehen. Bewertungsrahmen, Kriterien und Steuerungsfaktoren werden im weiteren Projektverlauf überprüft und weiterentwickelt.

LITERATURVERZEICHNIS

Heuss-Aßbichler, S., Jayasinghe, L. B., Dorri, I., & Stegemann, J. (2026). *The need for a systematic methodology for a structured anthropogenic resource assessment for UNFC.* submitted.

Kral, U., Fellner, J., Heuss-Aßbichler, S., Laner, D., Müller, F., Simoni, M. U., . . . Winterstetter, A. (2018). Vorratsklassifikation von anthropogenen Ressourcen: Historischer Kontext, Kurzvorstellung und Ausblick. In R. Pomberger (Hrsg.), *Vorträge-Konferenzband zur 14. Recy & DepoTech-Konferenz, Montanuniversität Leoben* (S. 651–658).

Sager, D., & Heuss-Aßbichler, S. (2026). Qualitätsziele im Altlasten- und Flächenrecyclingmanagement: Bewertung und Klassifikation von Land und Boden als Ressource gem. UNFC. *altlasten spektrum*, 21-27.

UNECE. (2019). *United Nations Framework Classification for Resources Update 2019 (ECE ENERGY SERIES No. 61).* Geneva: UNECE.

UNECE. (2020). *Principles of Resource Classification, ECE/ENERGY/GE.3/2020/3.* Geneva: UNECE.

In-situ Sanierung eines Chromatschadens auf dem ehem. Schoch-Areal in Stuttgart mittels innovativer Injektionstechnik

Daniel Ruech[1], Kristina Schenk[2] & Thomas Ertel[3]
[1)] Sensatec GmbH, NL Ulm, Kiel/Ulm, Deutschland
[2)] Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umwelt 36-3.51, Stuttgart, Deutschland
[3)] et environment and technology Dr. Thomas Ertel, Esslingen, Deutschland

KURZFASSUNG: Auf dem ehemaligen Schoch-Areal in Stuttgart-Feuerbach bestehen trotz umfangreicher Bodenaushubmaßnahmen weiterhin sanierungsrelevante Grundwasserbelastungen durch Chrom(VI) sowie LHKW. Im Zuge der Entwicklung des Geländes zu einem Wohnquartier initiierte das Amt für Umwelt Stuttgart 2024 die Prüfung innovativer In-situ-Sanierungsverfahren zur Reduzierung der Restkontaminationen. Eine von der Sensatec GmbH durchgeführte Laborstudie verglich drei Wirkstoffe, wobei die Kombination aus MetaFix® und dem eisenhaltigen Geoform® die besten Ergebnisse erzielte. Aufgrund der positiven Wirkung auf Chrom(VI) sowie des Potenzials zur Förderung des LHKW-Abbaus wurde ein zweistufiges Sanierungs-konzept mit Pilotversuch und Full-Scale-Maßnahme beschlossen. Die Pilotanwendung erfolgte im Frühsommer 2025 mittels TSE®-Technologie über Manschettenrohre bis in 20 m Tiefe. Das begleitende Monitoring bestätigte die Wirksamkeit, sodass im Oktober 2025 die großflächige Umsetzung mit insgesamt rund 26 Tonnen eingebrachtem Wirkstoff erfolgte. Aktuelle Ergebnisse zeigen deutliche Schadstoffrückgänge mit Chrom(VI)-Gehalten teilweise unter der Nachweisgrenze und einer Reduktion der Gesamtchromkonzentrationen um mehr als 90 %. Die Maßnahme wird weiterhin überwacht und durch Klinger und Partner fachlich begleitet. Trotz einzelner witterungsbedingter Herausforderungen bestätigen die bisherigen Ergebnisse das hohe Potenzial der In-situ-Sanierung für Schwermetallkontaminationen unter engen zeitlichen Randbedingungen.

1 EINFÜHRUNG

Im Zuge der jahrzehntelangen gewerblichen Nutzung zur Metallveredelung und insbesondere Hartverchromung kam es auf dem Schoch-Areal in Stuttgart-Feuerbach teilweise zu erheblichen Belastungen des Bodens und des Grundwassers.
Insbesondere mit leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen (LHKW), aromatischen Kohlenwasserstoffen (BTEX) und Chromat (Cr(VI), Chrom(VI)-Verbindungen).
Das Areal soll nach erfolgter Sanierung einer städtebaulichen Neuordnung zugeführt werden.
Auf der Basis der vorangegangenen Untersuchungen veranlasste die Stadt Stuttgart die Sanierung des ehemaligen Schoch-Areals.

Im Anschluss an den Gebäuderückbau von Oktober 2015 bis September 2018 erfolgte eine Bodensanierung. Diese umfasste bereichsweise einen Baggeraushub und Spundwandverbau, sowie vollständig überschnittene Großlochbohrungen.
Mittels einer Chromatbehandlungsanlage wurde dabei stark kontaminierter Boden auf der Baustelle behandelt, um Schadstoffgehalte und -immissionen zu verringern.

Seit 2011 wurde zudem bauzeitlich die laufende Abstromsicherung mittels Pump&Treat weiter betrieben.

Nicht nur das räumliche Ausmaß der vorgefundenen Kontaminationen gestaltete sich mächtiger, sondern auch die vorgefundenen Schadstoffkonzentrationen von LHKW und Chromat waren deutlich höher als in der Planung angenommen. Die gesetzten Sanierungsziele wurden nicht für alle Bereiche des Areals erreicht. Aufgrund technischer Limitierung (Statik Spundwände, anstehendes Grundwasser) sind bereichsweise Restbelastungen in der jeweiligen Aushubsohle, sowie an den Grenzen des Areals zu verzeichnen. Mit der durchgeführten Bodensanierung wurden die Schadstoffquellen weitestgehend eliminiert und daraus resultierend das Gefährdungspotential erheblich verringert.

Zur Reduzierung der verbliebenen Restbelastungen sind Maßnahmen zur Grundwassersicherung weiterhin erforderlich, weswegen die Pump&Treat-Maßnahme für den 2. Grundwasserleiter (Mittlerer Gipshorizont, Kluftgrundwasserleiter) weiterhin betrieben wird.
Zudem wurde die Reduzierung der Restbelastungen (vorrangig der nördlichen Teilfläche) veranlasst. Um dieses Ziel zu erreichen wurde eine In-situ-Sanierung mittels Targeted Solids Emplacement (TSE®) durch die Firma Sensatec durchgeführt, welcher eine Laborstudie vorangegangen ist.

2 STANDORTBESCHREIBUNG UND (HYDRO-)GEOLOGISCHE VERHÄLTNISSE

Das 14.199 m² umfassende Gelände liegt in der Feuerbacher Talaue, in unmittelbarer Nähe zum Feuerbacher Bahnhof. Im Nordosten grenzt die Stadtbahnhaltestelle und im Norden die Fa. Klumpp an das ehemalige Firmengelände. Im Süden wird das Gelände von der Kremser Straße und im Westen von der Dornbirner Straße begrenzt (siehe Lageplan unten, Abbildung 1). Das ehemalige Betriebsgelände wird von einer Betriebsstraße (Verlängerung der Burgenlandstraße) gequert, die das Gelände in eine nördliche und eine südliche Teilfläche teilt.

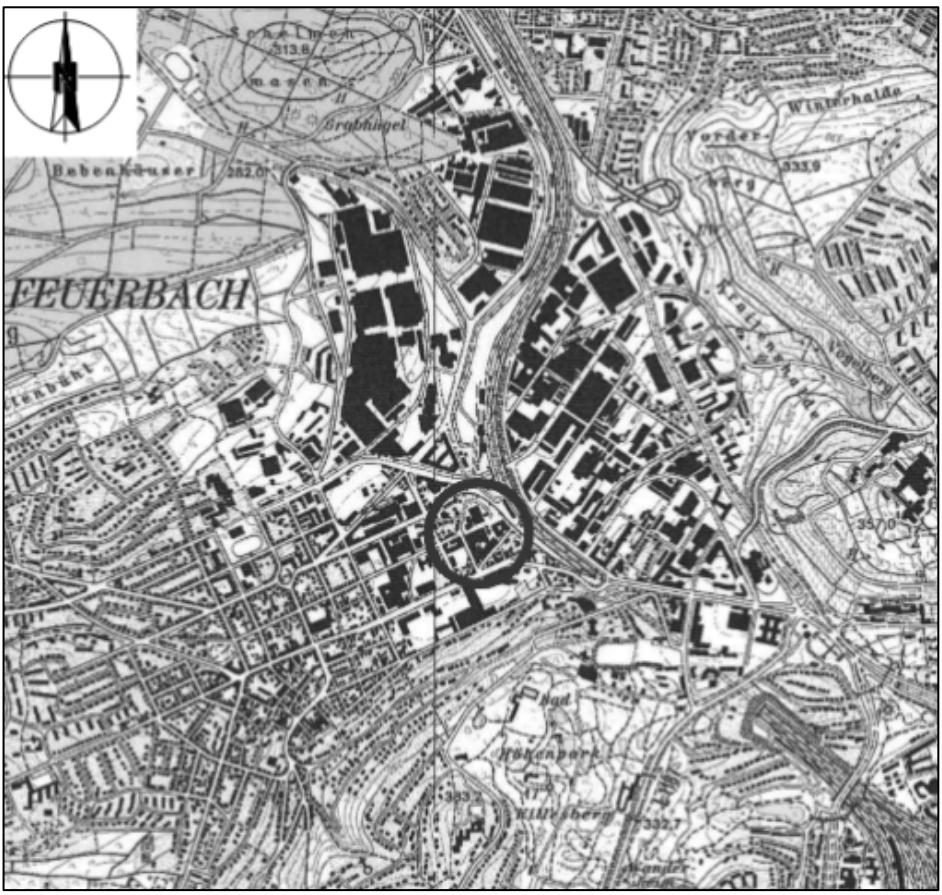


Abb. 1: Ausschnitt aus dem Lageplan Schoch-Areal (Quelle: Abschlussbericht Bodensanierung Arcardis)

Das Betriebsgelände der Firma Schoch befindet sich in der Talaue des hier in früheren Zeiten von Südwesten nach Nordosten fließenden Feuerbachs. Der unverdolte Feuerbach verlief Anfang des 20. Jahrhunderts (um 1905) von der Stuttgarter Straße in die Dornbirner Straße über das nördliche Betriebsgelände in Richtung Wiener Platz. Heute ist der Feuerbach verdolt und wird von der Stuttgarter Straße durch die Kremser Straße in die Kruppstraße geführt.

Das Areal liegt in der Außenzone des Heilquellenschutzgebietes auf einer Höhe zwischen knapp 272 mNN im Nordosten und knapp 273 mNN im Südwesten. Der Schichtenaufbau umfasst folgende Schichten:
Das 1.Grundwasserstockwerk ist im Quartär ausgebildet (Porengrundwasserleiter). Darunter folgt der schichtig gegliederte Mittlere Gipshorizont als 2. Grundwasserstockwerk (Kluftgrundwasserleiter). Das 3. Grundwasserstockwerk ist im Kluftgrundwasserleiter der Dunkelroten Mergel ausgebildet.
Die generelle Grundwasserfließrichtung ist in Richtung NNE ausgerichtet. Im Ruhezustand liegen in allen Grundwasserleitern flächig gespannte Grundwasserverhältnisse vor. Die Fließrichtungen divergieren jedoch auch je nach Stockwerk.

3 SANIERUNGSZIEL

Auf dem Schoch-Areal ist es nutzungsbedingt zu Verunreinigungen des Untergrundes mit Cr(VI), LHKW und BTEX gekommen. Bei umwelttechnischen Untersuchungen des Untergrundes wurden die genannten Schadstoffe in den Kompartimenten Boden, Bodenluft und Grundwasser festgestellt.
Die Sanierungsbereiche wurden aufgrund von Schadstoffgehalten im Boden festgelegt.

Gemäß der erhobenen Orientierungswerte in der Sanierungsuntersuchung wurden im Sanierungsplan für die Aushubmaßnahme die folgenden Sanierungszielwerte festgelegt:

- 10 mg/kg Chrom(VI) im Boden
- 1 mg/kg LCKW im Boden
- 10 mg/kg BTEX und 1 mg/kg Benzol im Boden

Die weitergehende und noch bestehende Grundwasserbelastung wurde im Hinblick auf Sanierungszielwerte anhand der E-max. Betrachtung wie folgt festgelegt (Auszug Ausschreibungsunterlagen):

„Einhaltung der E-max. – Werte für Chrom VI, Chrom ges. und LHKW in der aus den 3 Brunnen B17, B16 und B20 bestehenden Abstromsicherung im Mittleren Gipshorizont."

Die Frachtenbetrachtung wird durch die fachgutachterliche Betreuung der Maßnahme anhand der festgestellten und weiter unten beschriebenen Schadstoffbelastungen erneut ermittelt und dem o.g. Sanierungszielwert gegenübergestellt.

4 IN-SITU-SANIERUNG

Im Zuge der Nachsorgemaßnahme und ergänzend zur bestehenden Pump & Treat-Maßnahme mit drei Sanierungsbrunnen, war eine weitere Sanierung des Grundwassers erforderlich. Um den erfolgversprechendsten Wirkstoff zu bestimmen, wurde vorab durch die Sensatec GmbH eine Laborstudie bzw. Machbarkeitsstudie im Herbst 2024 durchgeführt. Im Anschluss erfolgten der in-situ Pilotversuch und daraufhin die in-situ Full-Scale-Sanierung.

4.1 Machbarkeitsstudie

Das Ziel der Machbarkeitsstudie war, zu klären, ob eine Sanierung in Form einer in-situ Behandlung, bei der das toxische Cr(VI) zum unschädlichen Cr(III) umgesetzt wird bzw. eine mögliche Mineralisierung der Substanz durch den Einsatz geeigneter Wirkstoffprodukte, eine geeignete Option darstellt. Der Fokus dieser Studie lag auf der Chrombelastung. Mögliche weitere Schadstoffe wurden nicht betrachtet. Ziel war es anhand von Standortmaterial (Boden und Grundwasser) die Möglichkeiten zur Cr(VI)-Reduktion bzw. Immobilisation mittels verschiedener Reduktions- und / oder Immobilisationsmittel zu ermitteln und zu bewerten.

Die Machbarkeitsstudie umfasste sowohl Bodenmaterial, als auch Grundwasser vom Standort. Das Bodenmaterial wurde hierbei durch Bohrungen gewonnen. Die Grundwasserprobe wurde aus der bestehenden Grundwassermessstelle entnommen. Zusammenfassend ließ sich festhalten, dass für die Chromat-Reduktion bzw. Chrom-Immobilisation die Produkte der Firma Evonik (Metafix® und GeoForm®) sehr gute, sowie das Produkt ABC+ der Firma Carus gute Ergebnisse erzielt haben. Beide Male wurde Chromat vollständig reduziert und zudem wurde aus der wässrigen Phase auch das Cr(III) entfernt.

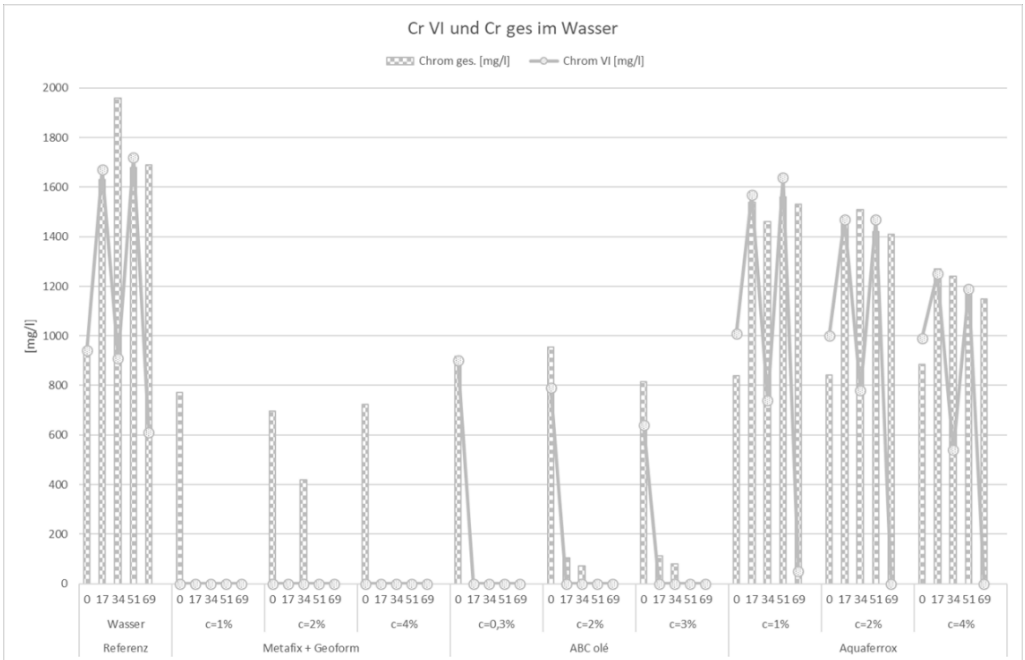


Abb. 2: Verlauf Chrom Reduktion in der Machbarkeitsstudie

4.2 Pilotversuch

Im Rahmen des Pilotversuchs erfolgte Ende Juni 2025 durch die Firma GeoBohr der Ausbau zweier Manschettenrohre mit einer Tiefe von 20 m GOK (Bezeichnung PV-1 und PV-2). Das Prinzip des Manschettenrohres ermöglich eine Eingabe von Feststoffen in festgelegten Tiefenintervallen (Abstand der Eingabehorizonte i.d.R. 30 bis 50 cm). Durch Nutzung von Doppelpackersystemen wird hier eine entsprechende Aktivierung der jeweiligen Manschetten erreicht. Die Manschettenrohre selbst, erschlossen die relevanten Einheiten der Mittleren Gipshorizontes (MGH), sowie der Dunkelroten Mergel (DRM).

Die Anordnung der Pilotversuchsbohrungen (hellblau) beruht auf den Erstplanungen anhand bekannter Restbelastungen und ist in nachstehender Abbildung dargestellt. Eine entsprechende Abstimmung mit dem Fachgutachterbüro, sowie dem AG erfolgte im Frühsommer. Die Durchführung des Pilotversuches wurde am 12.2.2025 durch die Bewertungskommission bestätigt.



Abb. 3: Bohrgutkisten aus den Einheiten des MGH & der DRM

Mitte Juli 2025 erfolgte die Eingabe der Wirkstoffe. Insgesamt wurden im Rahmen des Pilotversuchs in Summe rund 2,5 to MetaFix und 2,5 to GeoForm in den Untergrund eingegeben (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4). Hierbei wurde mit einem Abstand von ca. 30 cm das Manschettenrohr von rund 8 – 20 m GOK angefahren und die Wirkstoffe eingegeben. Teils wurden im Zuge der Maßnahme auch Austritte von Wirkstoff an der Geländeoberfläche beobachtete („daylightning“). Dies führte zu einer teils nochmaligen Beaufschlagung von Horizonten und Überspringen einzelner Horizonte. In Summe konnte jedoch jeweils die geplante Wirkstoffmenge mit einer Eingaberate von 100 % zzgl. des notwendigen Klarspülwassers im Untergrund, im Bereich der MGH und der DRM eingegeben werden.

Die Verteilung des Wirkstoffs im Untergrund konnte zudem über die Kartenhebung mittels Tiltmeter nachvollzogen werden. Hierbei wird die Hebung des Untergrunds detektiert, wodurch abgebildet werden kann, welche Wegsamkeiten durch die Eingabe unter Druck geschaffen wurde (siehe Abbildung unten).

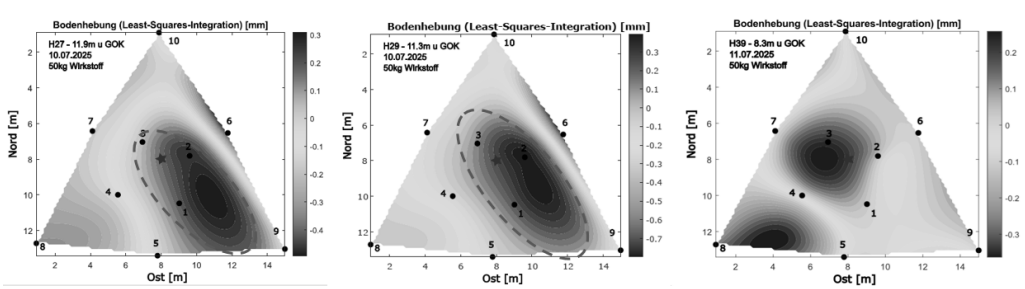


Abb. 4: Hebung des Untergrundes in verschiedenen Eingabehorizonten

Im Zuge des Pilotversuchs konnten Einflussbereiche von bis zu 12m im Radius identifiziert werden. Die postulierten Wirkradien von rund 5,0 m wurden somit erreicht bzw. überschritten.

Durch das begleitende Grundwassermonitoring konnte die Wirksamkeit des Pilotversuchs nachvollzogen werden. Die Grundwasserbeprobung erfolgte durch das Büro Klinger & Partner, die Analytik im Labor der Stadt Stuttgart. Die Daten wurden den Projektpartner jeweils zeitnah zur Verfügung gestellt.

Aufgrund der komplexen hydraulischen Bedingungen mit zwei verschiedenen Grundwasserleitern (MGH & DRM, siehe auch oben), sowie unterschiedlichen Fließrichtungen, wurde zur Bilanzierung des Pilotversuches begleitend ein Pumpversuch durch das Büro Klinger & Partner ausgeführt. Die Entwicklung von Chrom gesamt und Chrom(VI) im Zuge des Pilotversuches zeigt einen Rückgang von etwa 30 % gegenüber dem langjährigen Jahresmittel.

4.3 Full-Scale-Sanierung

Nach erfolgter Vorstellung der Ergebnisse aus der Pilotphase, im Zuge einer Bewertungskommissionssitzung des Landes Baden-Württemberg am 30.09.2025, erfolgte wie o.g. der positive Bescheid zur Fortsetzung der Maßnahme bzw. zur Umsetzung der Full-Scale Sanierung. Hierfür erfolgte wiederum durch die Firma Geo-Bohrtechnik aus Blaustein die Errichtung weiterer Injektionspegel (insgesamt 6 Stück, IP1 bis IP8) mit Manschettenrohrausbau. Zur Beweissicherung und zum Nachweis des Sanierungserfolges wurde zusätzlich eine Grundwassermessstelle (Bezeichnung GWM provisorisch, da mit Beginn der Hochbautätigkeit verlustig) errichtet. Nachstehend ist der Ausbau und der geologische Horizont angegeben:

- IP1 +2: 20 m tief, bereits errichtet
- IP4, 5 + 6: 20 m, MGH und DRM
- IP3,7+8: 15 m, MGH

Zudem wurde das Monitoring-Programm und eine Pumpmaßnahme in den Brunnen B1(24) und GWM prov. vereinbart, um die Auswirkungen, insbesondere im Horizont des MGH, optimal beurteilen zu können. Die Errichtung der Infrastruktur fand im Oktober des Jahres 2025 statt. Nach erfolgter Aushärtung der Ringraumzementation wurde die erweiterte Hochdruckinjektion im TSE® Verfahren durch die Niederlassung Ulm der Sensatec GmbH umgesetzt.
Auch hier erfolgte wiederum eine Erfassung aller Injektionen mittels Neigungsmesser. Der ausführliche Bericht hierzu ist als Anlage diesem Text beigefügt. Es ließen sich teils Reichweiten von 6 bis 7 m ab Injektionspunkt kartieren, mit einem Einfallen von teils bis zu 10 Grad.

Die Einbringung der Wirkstoffmenge wurde an die Aufnahmemenge im Untergrund angepasst und in Summe konnten rund 20.000 kg an Injektionsreinstoff verpresst werden; gesamt sind somit rund 25.000 kg des Wirkstoffgemisches Metafix ® und GeoForm ® verarbeitet worden.

5 SCHLUSSFOLGERUNG

Das Ziel einer nachhaltigen Reduktion des Schadstoffpotentials für Chrom(VI) erscheint in Anbetracht der Ergebnisse als erreicht, hier sollte es deutlich verminderte Schadstofffracht auf die bereits installierte Grundwasserreinigungsanlage geben und im weiteren Verlauf im Kontext einer diesem technischen Bericht ergänzenden Frachtenbetrachtung auch die weitere Sanierungsmaßnahme auf dem Gelände diskutiert werden. Insgesamt zeigte die Maßnahme, dass es möglich ist unter zeitlich stark eingeschränkten Randbedingungen einen erheblichen Sanierungserfolg zu verbuchen, und der reaktionsraum im Untergrund sehr gut kontrolliert und überwacht werden kann. Das Verfahren an sich eignet sich für eine Vielzahl von Schadstoffen (nicht nur Schwermetalle), lediglich die Anpassung der eingesetzten Wirkstoffe ist anzupassen.

LITERATURVERZEICHNIS

Craw, Falconer, & Youngson. (2003). Environmental arsenopyrite stability and dissolution: theory, experiment and field observations. *Chemical Geology, Volume 199*, 71-78.

Dolfing, Eekert, v., Seech, & Vogan, M. (2008). In situ chemical reduction (ISCR) technologies: Significance of low Eh reactions. *Soil Sed. Contam. Volume 17 (1)*, 63-74.

Dreyer. (1997). *The Geochemistry of Natural Waters.* Prentice-Hall: 3rd Edition.

EPA. (2007). Monitored Natural Attenuation of Inorganic Contaminats in Groeundwater. EPA/600/R-07/140.

Sensatec GmbH. (2025). *Machbarkeitsstudie Chrom VI Reduktion und Immobilisation Standort Schoch Areal Stuttgart.* Kiel: Eigenpublikation.

KONTAKT

Daniel Ruech, M.Sc.
d.ruech@sensatec.de
0049 151 53860745
Niederlassungsleiter Ulm
Sensatec GmbH
www.sensatec.de

Enabling the purification of PFAS-contaminated fine fractions: Lab scale experiments on soil washing

Samuel Griza[1], Benjamin Faigle[2], Jamie Afghani[3], Nico Mumm[1], Clarissa Kellner[2], Martin Draws[1], Marcellus Birkenmeier[1,2], Jan Paul Lindner[1], Ferhat Kaya[1], Claudia Traidl-Hoffmann[3] & Daniel Vollprecht[1]

[1)] University of Augsburg, Institute of Materials Resource Management, Augsburg, Germany

[2)] Züblin Umwelttechnik GmbH, Zweigstelle Nürnberg, Schwaig, Germany

[3)] University of Augsburg, Institute of Environmental Medicine and Integrative Health, Augsburg, Germany

ABSTRACT: Contamination of soils by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) has raised increasing attention in the last years. Soil washing regularly succeeds in cleaning the sand and gravel fraction of contaminated soils allowing their on-site reutilisation. However, the silt and clay fraction can often not be cleaned sufficiently. Consequently, the project BoReF addresses this challenge by improving existing washing processes and introducing novel technologies based on fundamental studies on PFAS bonding in soils using Tessier sequential extraction, PFAS analysis using LC-MA and scenario analyses by life cycle assessment (LCA). Three investigated fine fractions contained mainly perfluorooctanesulfonic acid (PFOS). Ongoing method development and data analysis are needed due to complex matrix effects of extracts. Preliminary results suggest a strong affinity of PFAS to carbonates and iron and manganese (hydr)oxides which may open the route to tailored mineral processing methods for PFAS removal. LCA results indicate that transport to landfill and landfilling itself are main cases for CO_2 emissions, whereas the environmental impact of soil washing is strongly affected by the electricity sources used.

1 INTRODUCTION

Contamination of soils by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) has raised increasing attention in the last years. Soil washing, a technology established already for decades for other organic contaminants such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) (Griffith, 1995), is the only industrial scale method in use for the treatment of PFAS-contaminated soils (Grimison, et al., 2023). It regularly succeeds in cleaning the sand and gravel fraction of contaminated soils allowing their on-site reutilisation (Faigle, Volz, & Edel, 2023). However, the silt and clay fraction can often not be cleaned sufficiently in conventional soil washing plants due to their high specific surface area and the strong PFAS sorption capacities of clay minerals and humic substances (Luft, Schutt, & Shukla, 2022). Landfilling these fractions often makes soil washing projects economically unfeasible and increasing scarcity of landfill volume as well as concerns regarding never ending after-care requirements (Schneider, 2026) put additional pressure to tackle the problem of PFAS-contaminated fine fractions as secondary waste produced in soil washing plants. Consequently, the project BoReF (Further Development of Soil Washing for PFAS-contaminated Soils Regarding a Recycling of the Fine Fractions) addresses this challenge by improving existing washing processes (washing drum, attrition cell) and introducing novel technologies (foam fractionation (We, Zamyadi, Stickland, Clarke, & Freguia, 2024), froth flotation (Li, et al., 2022)). For the assessment of the mobility of heavy metals, Tessier developed a sequential extraction approach (Tessier, Campbell, & Bisson, 1979) which is adjusted to PFAS in this study. PFAS analysis by liquid chromatography and subsequent mass spectrometry has been established but was found to be challenging due to matrix effects combined with aggressive reagents in this context. Scenario analyses for different treatment options of PFAS-contaminated by life cycle assessment (LCA) are not yet harmonized (Song, Montelius, & Carlsson, 2024) and will be further developed within BoReF.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Sampling and Analytics

Six samples of PFAS-contaminated soils were taken at different sites in Germany. Samples were tested for soil characteristics according to ISO 14688-1, for mineralogical composition by X-ray diffraction (XRD) and for total organic carbon (TOC) according to ÖNORM EN 15936:2012. PFAS were determined by LC-MS according to DIN 38407-43:2011-03 both in-house and at an external lab for validation purposes.

2.2 Sequential Extraction

250 g dry mass of each sample was selected for Tessier sequential extraction. An initial extraction step corresponding to a 2:1 tap water leachate based on DIN 19529 was added. All eluates and later extracts were collected by centrifuging 10 min at 11000 rpm PP vials and decanting. The remaining wet solid residue was washed with water, centrifuged and decanted a second time before starting the respective next step to clear solid residues of desorbed analytes before the respective next extraction. Exchangeable PFAS were extracted by addition of magnesium chloride. As third step, carbonates were destroyed by addition of an acetic acid buffer solution. Manganese and iron oxides were solved by hydroxylamine in 96 °C acetic acid. Organic fractions were oxidised by twofold addition of hydrogen peroxide adjusted to pH = 2 by nitric acid and subsequent heating to 85 °C. Since the Tessier extraction has been designed for heavy metals, it was adjusted to PFAS by substitution the final step of total digestion using hydrofluoric acid to a total extraction of PFAS by methanol using DIN 38414-4.

2.3 Lab-Scale Washing Tests

A small-scale purification drum was built by modifying a HDPE cement mixer. Due to the sorption of PFAS onto iron(oxy)hydroxides, all parts in direct contact were either HDPE or stainless steel. A study within a typical range of parameters used in full-scale applications was conducted. To replicate liquid dynamics in a purification drum, rotational velocity ω_{rot} was chosen below critical velocity $\omega_{\mathrm{crit}} = 42.5 \cdot 1/\sqrt{D}$, where D is the inner diameter of the drum. Furthermore, application of HPCD was tested out. This reagent can act as overall hydrophilic host for hydrophobic molecules due to its inner cavity. For application of high shear forces, a lab scale attrition cell was built and tested for usability beyond its normal application for sandy soil types.

2.4 Foam Fractionation and Froth Flotation

An existing lab scale froth flotation setup by Laarmann was adapted. After pre-testing, best parameter combinations of air bubbling rate, rotation speed and filling volume were selected. Main experiments focused on organics and clay minerals. For this, common frothers, collectors and depressants were studied.

2.5 Environmental Impact Assessment

The system of a soil wash plant was assessed and modelled based on a real example and literature data. Its system function was defined as “Provision of 1 metric ton of purified soil which can be reinstated in Germany”. This included effects of treatment of deposited fractions. As method an Attributional Life Cycle Assessment (ALCA) with cut-off approach was chosen. Due to outdated data about fuel usage, the LCI Database 3.1 was extended by emission profile according to Regulation (EU) 2016/1628. Long term impact of PFAS was assessed by modifying the landfill leachate impact within the model.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Sampling and Analytics

All samples showed a high fraction of organics (TOC 25% to 40%). The three samples here presented samples coded “HG”, “DG” and “DR” were identified as clay-like, though HG dispersed much faster after addition of water. This hints to a presence of silt-like minerals matching with its distinctive greyish colour in contrast to more warm-brownish DG and DR. DG was very calcareous, HG in between and DR showed only little indication of limestone. XRD analyses revealed quartz as main constituent of all three samples, with calcite amounts fitting to physical-chemical properties. Quantification of individual clay minerals needed further analyses due to limited peaks in the diffractograms.

3.2 Sequential Extraction

The comparison of PFAS concentrations for soil samples before and after the extraction cascade is depicted in Table 1. Presence of PFOS dominated the contamination for the wet screened samples. Furthermore, PFUnDA was present in all samples with second or third highest concentration together with PFHxS. The proposed extraction process was a success in terms of capability to extract PFAS: Generally, the majority could be extracted during the process and were not present in its residue. While every PFAS below chain length C8 was under detection limit, some long chained substances like discussed PFUnDA and PFOS remained, depending on the soil type.

Tab. 1: Selected analytes before and after extraction process of three presented soil samples.

in [µg/kg]	DR		DG		HG	
	before	residue	before	residue	before	residue
PFHxA	0,31	<0.10	0,15	<0.20	0,21	<0.10
PFOA	0,43	<0.10	0,19	<0.20	<0.20	<0.10
PFNA	6,30	<0.20	0,83	<0.20	0,52	<0.10
PFUnDA	18,00	<3.5	2,10	1,10	0,96	0,12
PFHxS	9,30	<0.10	1,90	<0.20	2,00	<0.10
PFOS	28,00	<2.8	8,40	4,90	8,60	0,57

First results of eluate analysis clearly show different PFAS concentrations in each step and for each soil sample. While for the steps of washing with water and exchangeable PFAS only low concentrations were found, major amounts of PFAS were extracted at the Mn-/Fe-oxides step followed by the carbonate step, especially for sample DR where approx. 75% of total PFAS were found here. The results are undergoing validation and will be presented at the conference.

3.3 Environmental Impact Assessment

LCA assessment indicated transportation to, and the deposition itself are the major drivers for ecological impact of soil washing. This means the impact of any extension and addition of processing steps can be counteracted by the reduction of landfilled fractions, underlining the necessity for research in this topic. Current focus is the improvement of the model by refining landfill impact for which the data is sparse in the context of PFAS.

4 SUMMARY

The project BoReF aims to extend the applicability of soil washing for PFAS removal to finer fractions by improving existing washing processes and introducing novel technologies such as froth flotation. To tailor these technologies, studies on PFAS mobility were conducted whose preliminary results suggest a strong affinity of PFAS to carbonates and (hydr)oxides. BoReF is funded by the Bavarian Transformation and Research Foundation (AZ-1617-24).

REFERENCES

Delatour, T., Menin, L., Eriksen, B., Gasilova, N., Mujahid, C., & Theurillat, X. (2024). Dielectric barrier discharge ionization procures characteristic adducts of polyfluoroakyl substances (PFAS) amenable by gas-chromatrography-mass spectrometry. *Microchemical Journal, 204*, 111012.

Faigle, B., Volz, B., & Edel, H.-G. (2023). Aktuelle Waschverfahren zur erfolgreichen Reinigung von Böden mit PFAS-Belastung. *Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, 10*, S. 154-160.

Griffith, R. (1995). Soil-washing technology and practice. *Journal of Hazardous Materials, 40*(2), S. 175-189.

Grimison, C., Knight, E., Nguyen, T., Nagle, N., Kabiri, S., Bräunig, J., . . . Mueller, J. (2023). The efficacy of soil washing for the remediation of per- and poly-fluoroalkyl substances (PFASs) in the field. *Journal of Hazardous Materials, 445*, S. 130441.

Li, Y.-F., Chien, W.-Y., Liu, Y.-J., Lee, Y.-C., Lo, S.-L., & Hu, C.-Y. (2022). Perfluorooxtanoic acid (PFOA) removal by flotation with cationic surfactants. *Chemosphere, 266*, 128949.

Luft, C., Schutt, T., & Shukla, M. (2022). Properties and Mechanisms for PFAS Adsorption to Aqueous Clay and Humic Soil Components. *Environmental Science and Technology, 56*(14), S. 10053-10061.

Schneider, N. (2026). PFAS in der Deponie: Die Gäste, die nicht gehen - und was das für die Nachsorge heißt. *Deponietagung*, (S. 16). Von https://www.datocms-assets.com/134367/1773672234-9_schneider_awel_vbsa-deponietagung-2026.pdf abgerufen

Song, X., Montelius, M., & Carlsson, C. (2024). Life Cycle Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Remediation Technologies: A Literature Review. *Environments, 11*(9), 203.

Tessier, A., Campbell, P., & Bisson, M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry, 51*(7), 844-851.

We, A., Zamyadi, A., Stickland, A., Clarke, B., & Freguia, S. (2024). A review of foam fractionation for the removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from aqueous matrices. *Journal of Hazardous Materials, 465*, 133182.

CONTACT

Samuel Dario Griza
Samuel.griza@uni-a.de
+49 821 598 69138
Institute of Materials Resource Management, University of Augsburg
https://www.uni-augsburg.de/de/fakultaet/mntf/mrm/prof/reseng/

Langzeitauswirkungen der in-situ-Belüftung in der Deponienachsorge: Eine österreichische Fallstudie

Marlies Hrad[1] & Marion Huber-Humer[1]
[1)] BOKU University, Department für Landschaft, Wasser und Infrastruktur, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die in-situ Belüftung ist ein etabliertes Verfahren zur Stabilisierung von Altablagerungen mit Restorganik und dient der Verkürzung der Nachsorgephase sowie der Minimierung von Umweltrisiken. Kurzfristige Effekte sind gut dokumentiert; die langfristige Entwicklung Jahre nach Ende der Belüftung ist jedoch kaum untersucht. Die Studie von Hrad & Huber-Humer (2026) wertet die Monitoringdaten einer österreichischen Deponie über mehr als ein Jahrzehnt nach Beendigung der Belüftung sowie nach Aufbringung der finalen Oberflächenabdeckung aus. Die Ergebnisse zeigen eine fortschreitende Stabilisierung: Die Schadstoffkonzentrationen im Sickerwasser – insbesondere NH_4-N, BSB_5 und das Verhältnis BSB_5/CSB – erfüllen die in der Literatur vorgeschlagenen Stabilitätskriterien für die Beendigung der Deponienachsorge. Auch die jährlichen Stofffrachten liegen durchgehend im stabilen Bereich, was maßgeblich auf die 2016 hergestellte finale Oberflächenabdeckung zurückzuführen ist; sie begrenzt die Wasserinfiltration, reduziert die Sickerwassermengen und hält Restemissionen wirksam zurück. Die Bewertungen der Methanemissionen – basierend auf oberflächennahen Methankonzentrationen – minimale Emissionen; in den letzten Monitoringrunden wurden keine signifikanten Werte festgestellt, was die nachhaltige Wirkung auf die Treibhausgasreduktion unterstreicht. Insgesamt zeigt die Studie, dass die in-situ Belüftung in Kombination mit geeigneten Nachsorgemaßnahmen (insbesondere einer finale Oberflächenabdeckung), eine wirksame Strategie darstellt, um Altablagerungen in einen emissionsarmen Zustand zu überführen.

1 EINLEITUNG

Eine umweltgerechte Abfallentsorgung ist zentral für den Klima- und Gewässerschutz. Die Deponierung bleibt weltweit verbreitet, ist jedoch mit langfristigen Umweltauswirkungen verbunden. Insbesondere ältere Siedlungsabfalldeponien mit hohen organischen Anteilen emittieren Methan und erzeugen belastetes Sickerwasser. Als starkes Treibhausgas trägt Methan wesentlich zu den globalen Emissionen aus Deponien bei. Trotz der EU-weit geforderten mindestens 30-jährigen Nachsorge (EU Deponierichtlinie 1999/31/EC) stellt die Sickerwasserbehandlung häufig über diesen Zeitraum hinaus eine technische und finanzielle Herausforderung dar.

Ein vielversprechender Ansatz ist die in-situ-Belüftung, bei der Luft in den Deponiekörper eingebracht wird, um aerobe Bedingungen zu schaffen. Dies beschleunigt den biologischen Abbau, verlagert Kohlenstoffflüsse von Methan zu Kohlendioxid, erhöht die Abfallstabilität und kann die Nachsorge verkürzen. Großtechnische Umsetzungen in mehreren europäischen Ländern zeigen deutliche Vorteile, insbesondere eine beschleunigte Stabilisierung und erhöhte Setzungen (Brandstätter et al., 2020, Gebert et al., 2022, Ritzkowski et al., 2016). Weniger konsistent nachgewiesen sind hingegen durchgängige Verbesserungen der Sickerwasserqualität bis hin zu etwaigen behördlich vorgegebenen Stabilitätszielen. Auch die Phase nach Abschluss der Belüftung ist bislang unzureichend untersucht; belastbare Langzeitdaten zu Emissionen und Sickerwasser sind rar, da Monitoringdaten häufig nicht veröffentlicht werden.

Die Studie von Hrad & Huber-Humer (2026) schließt bestehende Wissenslücken, indem sie die Langzeitwirkungen der in-situ Belüftung einer österreichischen Deponie untersucht. Aufbauend auf früheren Arbeiten (Hrad & Huber-Humer, 2017; Hrad et al., 2013) erweitert die aktuelle Forschung den Monitoringzeitraum auf 11 Jahre nach Belüftungsende. Im Fokus stehen die

Entwicklung der Sickerwasserqualität bzw. -quantität und Methanemissionen (oberflächennahen Methankonzentrationen), um die Nachhaltigkeit der aeroben Stabilisierung zu bewerten und fundierte Entscheidungen zur Reduktion oder Beendigung der Nachsorge zu unterstützen.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Beschreibung der Deponie und in-situ Belüftung

Die Studie von Hrad & Huber-Humer (2026) untersuchte eine ehemalige Siedlungsabfalldeponie in Niederösterreich, die von 1976 bis 1995 betrieben wurde. Im Rahmen der Nachsorge erfolgte zwischen 2007 und 2013 eine in-situ Belüftung (vgl. Hrad et al. 2013; Hrad & Huber-Humer 2017).

Die Deponie umfasst zwei Abschnitte: VA01 (Stilllegung 1985 ohne Basisabdichtung und Sickerwassererfassung) und VA02 (Betrieb bis 1995 mit Basisentwässerung). Die Gesamtfläche beträgt 2,6 ha bei Ablagerungstiefen von 3 bis 18 m. Insbesondere VA01 stellte ein Risiko für das Grundwasser dar und erforderte langfristige Nachsorge.

Zur Stabilisierung wurde 2007 eine in-situ Belüftung installiert. Über sechs Jahre wurden mittels 37 Gasbrunnen insgesamt 24,6 Mio. m^3 Luft eingebracht und Abluft abgesaugt. 2016 wurde eine endgültige Oberflächenabdichtung errichtet, die die temporäre Abdeckung ersetzte. Der Aufbau variiert je nach Deponiebereich und umfasst u. a. eine Ausgleichsschicht, eine 30 cm starke Gasdrainageschicht, ein Kombinationsdichtungssystem (0,6 m mineralische Dichtung und HDPE-Dichtungsbahn), Drainagevliese sowie eine 1 m mächtige Rekultivierungsschicht.

Nach Abschluss der Belüftung wurden die 37 Gasbrunnen zu einem geschlossenen Ringsystem zusammengeführt. Dieses besteht aus sechs verbundenen Ringen mit Gefälle (≥ 5%) und ermöglicht eine bedarfsgerechte Gasfassung bzw. Probennahme und Entwässerung.

2.2 Monitoringdaten

Die Monitoringdaten der Deponie wurden ausgewertet, um Langzeiteffekte nach Beendung der Belüftungsmaßnahme auf Sickerwasser und Methanemissionen zu beurteilen. Die Sickerwasserqualität (organische und anorganische Leitparameter) lag für 2007–2024 vor; die Belüftung wurde 2013 beendet. Methanemissionen wurden 2018–2024 über oberflächennahe Konzentrationsmessungen erfasst. Probenahme/Analytik sowie Methan-Monitoring erfolgten durch ein akkreditiertes Labor im Rahmen behördlicher Auflagen.

Sickerwasserproben wurden halbjährlich aus den jüngeren, reaktiveren Abschnitt VA02 (mit Basisdrainage) entnommen. Analysiert wurden u. a. NH_4-N, NO_3-N, COD, BOD_5, SO_4 sowie Schwermetalle (Cu, Cr, Zn).

Für 2017–2024 wurden Jahresfrachten aus Qualität und Menge des Sickerwassers für VA02 berechnet (Monatsvolumen × Konzentration). Zur Einordnung der Sickerwassermengen wurden Jahresniederschläge ergänzt. Die Frachten wurden auf die Gesamtdeponiefläche von 2,6 ha normiert; Maximalwerte beziehen sich auf VA02.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Abb. 1 zeigt die Stickstoff- und Kohlenstoffdynamik im Sickerwasser über den gesamten Beobachtungszeitraum am Deponiestandort, mit klar unterscheidbaren Trends in den einzelnen Phasen. Dazu zählen die Belüftungsphase (2008-2013; inklusive eines gezielten Wechsels zwischen Belüftungs- und Absaugbrunnen im März 2011 zur Verbesserung der Luftverteilung), die

Phase nach Belüftungsende (2014-2016) sowie nach Aufbringen der finalen Oberflächenabdeckung (ab 2017). Die horizontalen Linien in Abb. 1 markieren die Sickerwasser-Stabilitätskriterien gemäß ÖWAV (2008) für den Abschluss der Deponienachsorge und unterscheiden zwischen indirekter und direkter Einleitung.

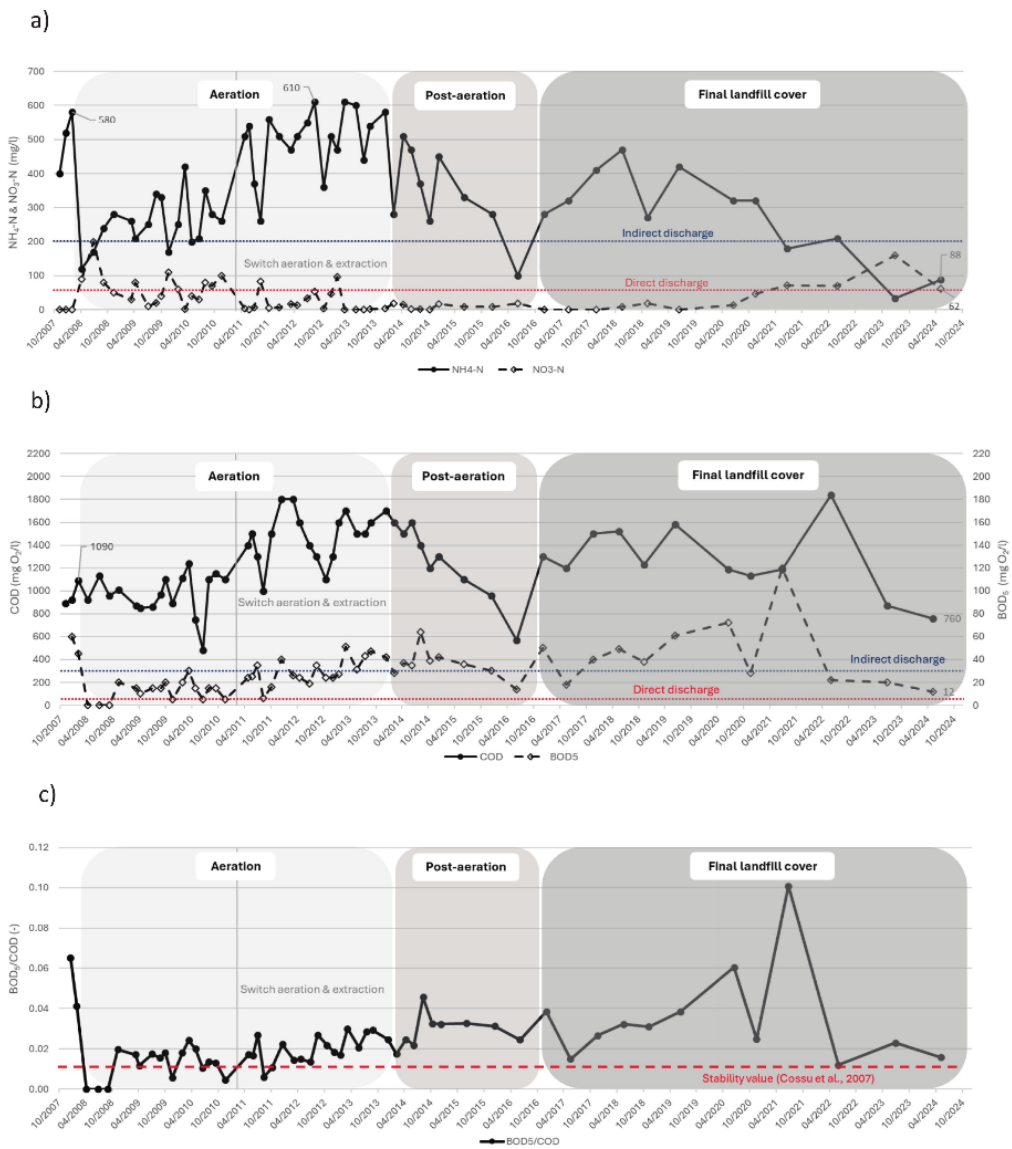


Abb. 1: Verlauf anorganischer (a) und organischer (b) Sickerwasserparameter sowie des BSB_5/CSB-Verhältnisses (c) während Belüftung, nach Abschluss der Belüftung sowie finalen Oberflächenabdeckung; horizontale Linien in (a) und (b) markieren die von ÖWAV (2008) vorgeschlagenen Zielwerte für indirekte bzw. direkte Einleitung (Hrad & Huber-Humer, 2026).

Während der Belüftung sank NH_4-N zunächst deutlich und NO_3-N stieg an (aktive Nitrifikation). Nach dem Wechsel der Belüftungs-/Absaugbrunnen im März 2011 kehrte NH_4-N jedoch auf das

Ausgangsniveau zurück und NO_3-N war nicht mehr nachweisbar (Abb. 1a). Dieses Muster lässt sich durch eine intensivierte Abbauaktivität erklären: Aerobe Mikroorganismen erhöhten durch Zersetzung organischer Substanz die Substratverfügbarkeit für anaerobe Konsortien (Gebert et al., 2025), was die Ammonifikation und damit die NH_4-N-Freisetzung verstärkte; erhöhte Deponietemperaturen beschleunigten diesen Prozess zusätzlich (Hrad & Huber-Humer, 2017). Adsorptions-/Desorptionsgleichgewichte dürften ebenfalls zu den anhaltend hohen NH_4-N-Konzentrationen beigetragen haben. Die Kohlenstoffdynamik fiel moderater aus (Abb. 1b): der CSB stieg leicht auf ~1.800 mg O_2/l, der BSB_5 sank zunächst und stabilisierte sich anschließend bei ~60 mg O_2/l – insgesamt eine geringere C-bezogene Stabilisierung als beim Stickstoff. Das BSB_5/CSB-Verhältnis (Abb. 1c) weist auf belüftungsinduzierte Abbauprozesse hin und deutet – über vermehrt verfügbare Organik in anaeroben Zonen – auf eine stimulierte Methanogenese (Gebert et al., 2025). Als Stabilitätsindikator spiegelt das Verhältnis die biologische Abbaubarkeit wider: 0,02–0,13 signalisiert geringe Abbaubarkeit (Sekman et al., 2011), <0,01 wird als Schwellenwert für die biologische Stabilisierung von Abfall vorgeschlagen (Cossu et al., 2007).

In der Phase nach Belüftungsende (2014–2016) gingen NH_4-N, CSB und BSB_5 zurück, NO_3-N blieb niedrig – ein Zeichen fortschreitender Stabilisierung. Nach Aufbringen der finalen Oberflächenabdeckung Ende 2016 reduzierte sich die Sickerwasserbildung stark (von 12 % des Jahresniederschlags in 2015 auf rund 2-4 % im Jahr 2017), wodurch Verdünnung und Stofftransport abnahmen und sich die Aufenthaltszeiten verlängerten. Konsistent mit einer erneuten Methanbildung (Abb. 2) etablierten sich räumlich heterogene, teils persistente anaerobe Zonen, was die anaerobe Mineralisierung begünstigte. In der Folge stiegen die NH_4-N-Konzentrationen und erreichten um 2018 ein Maximum (Abb. 1a), möglicherweise verstärkt durch den Abbau komplexer Organik während der Belüftung. Anschließend fiel NH_4-N wieder, während NO_3-N zunahm, vermutlich durch passive Lufteinträge über das bestehende Gasringsystem. Aktuell erfüllt NH_4-N die ÖWAV-Kriterien für indirekte Einleitung (<200 mg/l), nicht jedoch strengere Stabilitäts- bzw. Direkteinleitungswerte (≤10 mg/l; AAEV, 1996; Knox et al., 2005).

Nach Aufbringung der Oberflächenabdeckung stiegen zunächst CSB und BSB_5 parallel zu NH_4-N an (Maxima: BSB_5 2021, CSB 2022; Abb. 1b), im Einklang mit einer geringeren Verdünnung und der Ausbreitung/Persistenz anaerober Zonen. Danach sanken beide; BSB_5 unterschreitet inzwischen den Grenzwert für direkte Einleitung, während CSB weiterhin über den Grenzwerten liegt (2,5 fach über den Wert für die indirekte Einleitung – ÖWAV, 2008). Das BSB_5/CSB-Verhältnis näherte sich 2023/2024 der Stabilitätsschwelle von 0,01, was insgesamt auf einen biologisch stabilen Deponiezustand hinweist.

Oberflächennahe Methankonzentrationsmessungen dienten zur Identifikation und Kartierung von Emissions-Hotspots. Die zwischen 2018 und 2024 durchgeführten Messungen zeigten insgesamt geringe Emissionsfreisetzungen; an den meisten Messpunkten lagen die Werte unter der Nachweisgrenze. Die Ergebnisse sind als Boxplots dargestellt und veranschaulichen die jährliche Entwicklung (Abb. 2).

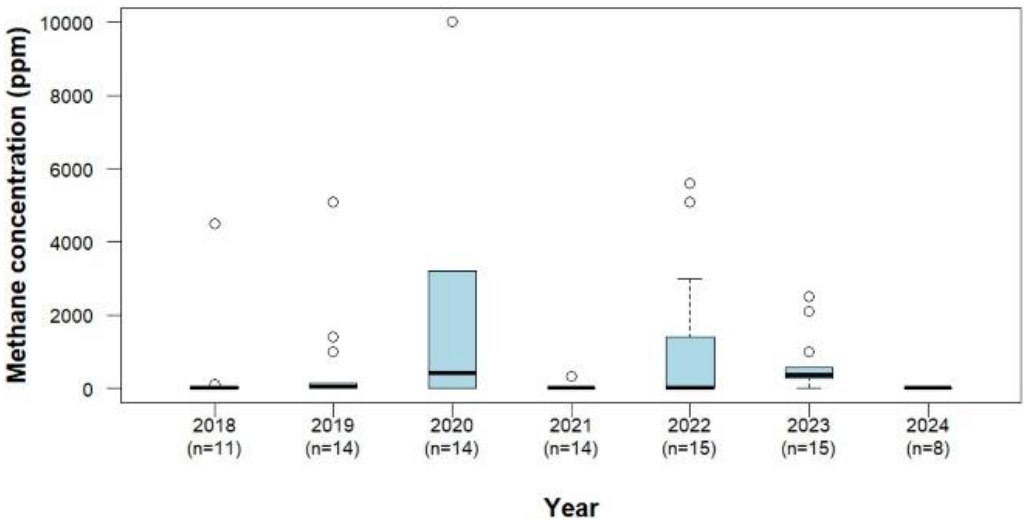


Abb. 2: Jahresverlauf der oberflächennahen Methankonzentrationen mit der jeweiligen Stichprobenmenge n (Hrad & Huber-Humer, 2026).

Lokale Freisetzungen traten v.a. an Gasbrunnen und baulichen Öffnungen auf; entlang der Deponieböschung wurden 2022/2023 teils 320 bis >5.600 ppm gemessen. Zeitweilige Hotspots an einzelnen Gasbrunnen überschritten 2020 10.000 ppm, traten in den Folgejahren jedoch nicht mehr auf. Ähnlich berichteten Fricko et al. (2021) in Laborversuchen über reduzierte Methanemissionen während und nach der Belüftung. Nach Rückkehr zu anaeroben Bedingungen kam es allerdings erneut zur Methanbildung – wenn auch in geringen Mengen (0,3 ml CH_4/kg TM·d).

Es ist anzumerken, dass bei den beiden letzten Messkampagnen in 2024 keine oberflächennahen Methankonzentrationen mehr detektiert wurden, was auf eine weiter reduzierte Methanfreisetzung hinweist. Zudem wurden an keinem Messtag Vegetationsschäden, die auf Deponiegasemissionen hindeuten, beobachtet. Dies spricht für einen fortschreitenden biologisch stabilen Zustand, vermutlich begünstigt durch die wirksame Emissionsminderung der finalen Oberflächenabdeckung.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Sickerwasserqualität und Methanemissionen sind zentrale Indikatoren für Reaktivität und Alter von Abfällen, reichen allein jedoch nicht aus, um das langfristige physikalische, chemische und biologische Stabilitätsverhalten von Deponiekörper vollständig zu bewerten. Gleichwohl spiegeln sie laufende Prozesse wider und liefern wesentliche Einblicke in die Deponiestabilisierung.

Die Studie von Hrad & Huber-Humer (2026) bietet erstmals eine umfassende Langzeitbewertung (>10 Jahre nach Belüftungsende und Aufbringung einer finalen Oberflächenabdeckung) von Sickerwasserqualität und -menge sowie der Methanfreisetzung auf Basis oberflächennaher Konzentrationsmessungen. Die Ergebnisse zeigen einen positiven Trend: NH_4-N im Sickerwasser erfüllt ein Jahrzehnt nach Abschaltung die ÖWAV-Kriterien (2008) für die indirekte Einleitung, BSB_5 nähert sich den Grenzwerten der AAEV (1996) für die direkte Einleitung, und Schwermetallgehalte (Cu, Cr, Zn) bleiben durchgehend niedrig. Das BSB_5/CSB-Verhältnis lag in den letzten drei Messungen (2022–2024) nahe der empfohlenen Stabilitätsschwelle von 0,01 (Cossu et al., 2007) und weist damit auf eine fortgeschrittene Stabilisierung hin.

Wesentlich trug die Ende 2016 aufgebrachte Oberflächenabdeckung bei: Die Sickerwassermengen sanken von zuvor 3,3–11,7 % (2009–2015) auf nur mehr 0,3–0,8 % (min) bzw. 0,5–1,6 % (max) des Jahresniederschlags, was die Einhaltung auch strengerer, frachtbezogener Direkteinleitungskriterien (ÖWAV, 2008) ermöglicht. Parallel zeigten Messungen 2018-2024 nur minimale Methanfreisetzung; bei den letzten Kampagnen 2024 wurden keine signifikanten Oberflächenkonzentrationen mehr detektiert – ein Hinweis auf einen stabilen Zustand mit geringen aktuellen Emissionen.

Bislang fehlen vergleichbare Langzeitdaten aus anderen in-situ Belüftungsmaßnahmen. Zudem wurden in dieser Studie keine Feststoffparameter, Emissionsraten oder Setzungen erfasst, obwohl sie für die Bewertung des Stabilisierungserfolg nach Belüftungsende zentral sind. Es besteht daher dringender Bedarf an weiteren quantitativen Langzeituntersuchungen, um die Stabilisierungseffekte der in-situ Belüftung belastbar zu verifizieren und wissenschaftlich fundierte Kriterien für Nachsorge und Erfolgsbewertung zu etablieren.

LITERATURVERZEICHNIS

AAEV – Allgemeine Abwasseremissionsverordnung, (1996). Bundesgesetzblatt – BGBl. Nr. 186. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft über die allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen, Wien.

Cossu, R., Lai, T., Piovesan, E., 2007. *Proposal of a methodology for assessing the final storage quality of a landfill.* In: Sardinia 2007 – 11th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, CISA.

EU Deponierichtlinie (1999). Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien.

Fricko, N., Brandstätter, C., Fellner, J. (2021). *Enduring reduction of carbon and nitrogen emissions from landfills due to aeration?* Waste Management, 135, 457-466.

Gebert, J., Corona, C.A., Meza, N., Chen, V., Janatian, N., Lammen, H., Kramer, H., Wang, L, Dieudonné, A-C., Heimovaara, T. (2025). *Field evidence of effective waste aeration*. In: Sardinia 2025 – 20th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, CISA.

Hrad, M., Gamperling, O., Huber-Humer, M. (2013). *Comparison between lab- and full-scale applications of in situ aeration of an old landfill and assessment of long-term emission development after completion*. Waste Management, 33(10), 2061-2073.

Hrad, M., Huber-Humer, M. (2017). *Performance and completion assessment of an in-situ aerated municipal solid waste landfill – Final scientific documentation of an Austrian case study*. Waste Management, 63, 397-409.

Hrad M, Huber-Humer M. (2026). *Long-term impacts of in-situ aeration on landfill stabilization: An Austrian case study.* Waste Management. 2026;219:115548. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115548

Knox, K., Braithwaite, P., Caine, M., Croft, B. (2005). *Brogborough landfill test cells: the final chapter. A study of landfill completion in relation to final storage quality (FSQ) criteria*. In: Sardinia 2005 - Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, (Eds.) R. Cossu, R. Stegmann, CISA Environmental Sanitary Engineering Centre. S. Margherita di Pula - Cagliari, Sardinia, Italy.

ÖWAV, (2008). *ÖWAV-Positionspapier - Konzeptionelle Überlegungen zur Entlassung aus der Deponienachsorge,* erstellt vom ÖWAV-Unterausschuss "Deponienachsorge", ÖWAV - Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. Vienna, Austria.

Sekman, E., Top, S., Varank, G., Bilgili, M.S. (2011). *Pilot-scale investigation of aeration rate effect on leachate characteristics in landfills.* Fresenius Environmental Bulletin, 20(7 A), 1841-1852.

Aktueller Stand zur Ermittlung von Deponiegaspotenzialen und der praktischen Bestimmung der Deponiegaserfassung – ein Nachfolgebeitrag

Jürgen Forsting[1], Melina Simon[1] & Konstantin Meier[1]
CDM Smith SE, Bochum, Deutschland

KURZFASSUNG: Der vorliegende Beitrag stellt aktuelle Erkenntnisse und Weiterentwicklungen zur Bestimmung von Deponiegaspotenzialen sowie zur realitätsnahen Ermittlung von Deponiegaserfassungsgraden vor. Aufbauend auf bisherigen Arbeiten werden die Grenzen rein modellbasierter Gasprognosen nach der IPCC-FOD-Methode aufgezeigt und die Bedeutung standortspezifischer empirischer Untersuchungen hervorgehoben. Im Fokus steht ein mehrstufiges Untersuchungskonzept das die tatsächliche Leistungsfähigkeit von Gaserfassungssystemen sowie das technisch erschließbare Gaspotenzial ermittelt.
Die gewonnenen Messdaten dienen der Kalibrierung von Gasprognosen und ermöglichen eine realistischere Bewertung der Methanbildung in Deponien.

1 VORBEMERKUNGEN

Mit dem Beitrag „Nachhaltige Potenziale Deponiegas/Optimierung Gaserfassung/praktische Bestimmung Gaserfassungsgrad“ aus dem Jahr 2022 in Leoben wurden erste Ergebnisse aus einem damals angestrebten Verbundvorhaben vorgestellt. Der vorliegende Bericht knüpft daran an und stellt aktuelle Ergebnisse sowie erste Methoden und Tools zur verbesserten Bestimmung realer Deponiegaspotenziale und Deponiegasmengen vor.

Wie bereits 2022 beschrieben, entsteht auch Jahrzehnte nach Ablagerungsende in Siedlungsabfalldeponien bei der Umsetzung biogener Organik weiterhin methanhaltiges Deponiegas, das ein sehr hohes Treibhausgaspotenzial aufweist. Dieses Deponiegas in einem heterogenen Haufwerk (Deponiekörper) ausreichend und gezielt zu erfassen, gestaltet sich aus jahrzehntelanger Erfahrung heraus als äußerst schwierig. Gründe hierfür sind unter anderem der komplexe physikalische Aufbau, die Aktivierung biologischer und biochemischer Abbauprozesse sowie unterschiedliche Temperatur- und Unterdruckniveaus.

2 AUSGANGSSITUATION MIT DER MODELLIERUNG

Ausgehend von diesen Erfahrungen und dem weiterhin hohen vorhandenen Gaspotenzial wurde vor einigen Jahren ein Vorhaben gestartet, in das verschiedene Institutionen (Techn. Hochschule Agricola Bochum, CDM SE) eingebunden waren. Dabei wurden zahlreiche neue Erkenntnisse zur genaueren Bestimmung des noch vorhandenen Gaspotenzials gewonnen. Hierbei wurden methodische Grundlagen für eine erste Standardisierung unterschiedlicher Arbeitsweisen bei gastechnischen Stabilisierungsmaßnahmen von Altablagerungen und Siedlungsabfalldeponien entwickelt, insbesondere zur vereinheitlichten Ermittlung der Methanemissionen und des Treibhausgaseinsparpotenzials.

Neben der Entwicklung von eigenen Tools zur Anwendung und zum Vergleich unterschiedlicher Gasprognosemodelle (IPCC-FOD-Methode, Multiphasenmodelle) sowie verschiedener Verfahren erfolgten außerdem Ausarbeitungen zu einer Standardmethode für die standortspezifische empirische Bestimmung des Restgaspotenzials im Deponiekörper.

2.1 Methodik der Gasprognose und Umgang mit Unsicherheiten

Die Grundlage zur Bestimmung des Gaserfassungsgrades bildet die Ermittlung der Methanbildungsrate. Diese erfolgt gemäß Stand der Technik mittels der First-Order-Decay-(FOD)-Methode nach IPCC.

Grundsätzlich beschreiben Deponiegasmodelle den zeitabhängigen Abbau organischer Substanz im Deponiekörper und die daraus resultierende Methanbildung.
Die wesentlichen Eingangsdaten umfassen:

- abgelagerte Abfallmengen (Masse, Volumen),
- Abfallzusammensetzung (Fraktionen mit unterschiedlichem DOC-Gehalt),
- Methankorrekturfaktor (MCF),
- Abbaugeschwindigkeit (k-Wert),
- Anteil des in Methan umgewandelten Kohlenstoffs
- …

Der Bundeseinheitliche Qualitätsstandard für Deponiegas (BQS 10-1 Deponiegas) konkretisiert diese Parameter, insbesondere durch differenzierte DOC- und k-Werte für verschiedene Abfallfraktionen (z. B. leicht, mittel und schwer abbaubar). Damit wird gegenüber dem generischen IPCC-Ansatz eine stärkere standortspezifische Differenzierung ermöglicht. Der Ansatz der aktuellen BQS 10-1 sowie der VDI-Richtlinie 3899 stellt weiterhin einen guten und zielführenden Weg zur besseren Bestimmung von Restgaspotenzialen dar.

In der praktischen Anwendung treten jedoch häufig und zunehmend erhebliche Unsicherheiten auf, die systematisch adressiert werden müssen:

- Abfalldaten: Häufig unvollständig oder inkonsistent (Massen-/Volumenangaben, fehlende Verdichtungsdaten).
- Abfallzusammensetzung: Nur grob klassifiziert, insbesondere für inhomogene Abfälle wie Sortierreste.
- Abbauparameter: k-Werte und DOC-Anteile sind stark streuend und standortabhängig.
- Modellannahmen: Idealisierte Randbedingungen.

Zur Erhöhung der Prognosegüte können empirische Messdaten genutzt werden, um die initiale Deponiegasprognose zu kalibrieren beziehungsweise zeitlich anzupassen.

Darüber hinaus bildet das Modell den tatsächlichen mikrobiellen Abbauprozess im Deponiekörper nur vereinfacht ab. Heterogene Lagerungsbedingungen, Feuchteverteilungen, lokale Sauerstoffzutritte sowie hydraulische Effekte führen zu deutlichen Abweichungen zwischen Modellprognose und realer Gasbildung.

Besonders belastbare Ergebnisse können dabei erzielt werden, wenn hochwertige Ablagerungsdaten mit einer dokumentierten Gasfassungshistorie kombiniert werden. Jedoch können die resultierenden Ergebnisse aus der theoretischen Bestimmung des Deponiegaspotenzials lediglich ein Richtparameter sein und müssen über Messergebnisse standortspezifisch und wiederkehrend angepasst werden.

Dieser Ansatz ist jedoch mit nicht zu vernachlässigenden Ungenauigkeiten behaftet. Einflüsse wie der heterogene Aufbau der Ablagerung, eingestaute Deponiebereiche, die komplexe Geometrie des Bauwerks sowie die daraus resultierende Gasverteilung fließen häufig nicht ausreichend in die Betrachtung ein.

2.2 Definition des Gaserfassungsgrades

Die Definition des Gaserfassungsgrades wird unterschiedlich betrachtet.
Die Bestimmung des Gaserfassungsgrades erfolgt in einem ersten Schritt über die formale Definition als Quotient aus erfasster Methanmenge und Methanbildungsrate gemäß IPCC:

$$\eta = \frac{\text{erfasste Methanmenge}}{\text{Methanbildungsrate}} \quad (1)$$

Erfassungsgrad = Erfasste Methanmenge / Methanbildungsrate (in DE nach der IPCC FOD Methode bestimmt).

Hierbei ist der Ansatz so, dass anhand von gängigen Gasprognosemodellen (FOD – Methode nach IPCC 2006, Multiphasenmodell nach Afvalzorg© 2025 oder vergleichbar) das theoretische, also rechnerische Gaspotenzial anhand von spezifischen Eingangsparametern (DOC, DOC_f, k-Werte eingelagerter Abfallfraktionen) bestimmt wird.

Hier stellt sich die Frage, inwieweit die gewählten Halbwertszeiten und die damit einhergehenden Abbaugeschwindigkeiten in welcher Form für eine repräsentative und langfristige Deponiegasbildungsrate herangezogen werden können.

Wie bereits erwähnt, führen fehlende Dokumentationen zu abgelagerten Abfallmengen und Abfallfraktionen, Unsicherheiten zum zeitlichen Verlauf der Deponierung, Umrechnungen der Abfallmengen über mittlere Ablagerungsdichten sowie unterschiedliche Abbauraten verschiedener Abfallfraktionen zu weiteren Ungenauigkeiten bei der rechnerischen Bestimmung von Deponiegasmengen.

Dem gegenübergestellt wird das unter regulären Bedingungen tatsächlich erfasste Deponiegas. Auch hierbei wird der bauliche Zustand der Deponiegaserfassung beziehungsweise die Funktionalität einzelner Anlagenteile häufig nur unzureichend berücksichtigt.

Aus dem Verhältnis dieser beiden Größen wird anschließend der Gaserfassungsgrad ermittelt.

Deshalb ist es ebenso wichtig, gezielte Untersuchungen zur Bestimmung realer Gaserfassungsgrade (in situ) unter Berücksichtigung gängiger Gasprognosemodelle (bei vergleichbaren Eingangsparametern) durchzuführen. Dabei kommen neben längeren Gasabsaugversuchen auch tiefengestaffelte Untersuchungsverfahren zum Einsatz. Qualifiziert durchgeführte Aufschlussbohrungen und das Neuerstellen von Gasbrunnen, ausgebaut nach erbohrtem Material, können weitere Informationen zum Gasdargebot liefern.

3 EMPIRISCHE DATENERHEBUNG UND UNTERSUCHUNGSSTRATEGIE

Vor diesem Hintergrund sind systematische empirische Untersuchungen am Deponiekörper und am Gaserfassungssystem zwingend erforderlich. Diese dienen dazu,

- die reale Leistungsfähigkeit des Gaserfassungssystems zu quantifizieren,
- Defizite und Betriebszustände zu identifizieren sowie
- das tatsächlich erschließbare Gaspotenzial standortspezifisch zu bestimmen.

3.1 Mehrstufiges Untersuchungskonzept

Zur Gewinnung einer belastbaren Datengrundlage empfiehlt sich ein mehrstufiges, aufeinander aufbauendes Untersuchungskonzept. Dieses kann, je nach Standort, variieren, angepasst und ergänzt werden.

3.1.1 Untersuchungskampagne 01 – Bestandsaufnahme und Referenzzustand (Nulllinie)

Die 1. Untersuchungskampagne beinhaltet die Auswertung vorhandener Betriebsdaten (Gasvolumenströme, Methangehalte, Unterdrücke), die im regulären Betrieb der Deponiegasfassung gemessen und dokumentiert wurden. Diese Daten bilden das Referenzszenario („Nulllinie“) für alle weiteren Bewertungen. Ergänzend erfolgt eine strukturierte Bestandsaufnahme des Gaserfassungssystems einschließlich einer optischen Zustandserfassung sowie der Erstellung eines Brunnenkatasters, einer Dokumentation des Leitungsnetzes und einer Betriebshistorie.

3.1.2 Untersuchungskampagne 02 – Gezielte Einzelgasbrunnenbesaugung

Die 2. Untersuchungskampagne beinhaltet die kurzzeitige Besaugung einzelner Gasbrunnen direkt am Brunnenkopf. Ziel hierbei ist die Bestimmung des individuell erschließbaren Gaspotenzials sowie die Bewertung des jeweiligen Brunnenzustands auf Parameter wie z. B. Leistungsfähigkeit, Wassereinstau und Dichtheit.

3.1.3 Untersuchungskampagne 03 – Einzelne und an den Absaugstrang angepasste Besaugung

Die 3. Untersuchungskampagne umfasst die Untersuchung der förderbaren Gaspotenziale auf Ebene der Gasunterstationen. Hierbei sollen alle in den Gasunterstationen zusammengeführten Absaugleitungen separat voneinander besaugt werden. Dadurch lassen sich systemische Effekte im Leitungsnetz sowie gegenseitige Beeinflussungen zwischen Brunnen identifizieren.

3.1.4 Untersuchungskampagne 04 – Langfristiger und qualifizierter Gasabsaugversuch

Die 4. Untersuchungskampagne basiert auf der Durchführung eines längerfristigen Absaugversuchs unter Einsatz einer mobilen Schwachgasbehandlungsanlage. Ziel ist die Annäherung an ein quasi-stationäres Maximum der Gasgewinnung (gleichbleibende Deponiegasqualitäten und Deponiegasmengen über einen längeren Zeitraum) und damit die Ableitung des derzeit technisch erschließbaren Potenzials.

3.1.5 Untersuchungskampagne 05 – Gezielte Kamerabefahrungen am Gaserfassungssystem

Die 5. Untersuchungskampagne integriert die Inspektion ausgewählter Gasbrunnen und Leitungen mittels Kamerabefahrung in die Bewertung des Gaserfassungssystems. Diese ermöglicht die direkte Identifikation von Schadstellen wie:

- Verblockungen und Ablagerungen,
- Rohrdefekte und Undichtigkeiten,
- Wassereinstauungen,
- konstruktive Schwachstellen.

3.2 Ergänzende messtechnische Verfahren

Die beschriebenen Kampagnen können durch ergänzende empirische Methoden weiter unterstützt werden, insbesondere:

- Oberflächenemissionsmessungen (z. B. FID, Haubenmessungen) – hier zum Detektieren von Undichtigkeiten
- Einsatz optischer Gasdetektionsverfahren (z. B. Infrarotkameras),
- Messungen von Sauerstoff- und Stickstoffgehalten zur Bewertung von Lufteinträgen,
- Temperatur- und Feuchtemessungen in Gasbrunnen.

Diese Verfahren liefern wichtige Hinweise auf Fehlfunktionen wie Übersaugung, Randluftzutritte oder ineffiziente Brunnenplatzierungen.

3.3 Bedeutung empirischer Daten für die Modellkalibrierung

Gerade die vor Ort und standortspezifisch bestimmten empirischen Daten bilden die Grundlage für die Kalibrierung und Validierung der im Vorfeld erstellten Deponiegasprognose, u.a. nach IPCC. Insbesondere ermöglichen sie:

- die Anpassung von Abbaukonstanten (k-Werten),
- die Plausibilisierung von DOC-Ansätzen gemäß BQS 10-1,
- die Rückrechnung realer Gasbildungsraten aus gemessenen Fördermengen unter Berücksichtigung des Erfassungsgrades.

Damit wird aus der rein theoretischen Prognose ein standortspezifisches, belastbares Modell, das sowohl für die Bewertung der Klimarelevanz als auch für die Dimensionierung von Gasbehandlungssystemen geeignet ist.

4 AUSWERTUNG UND BEWERTUNG (ANALYSEPLÄNE)

Die Auswertung der empirischen Untersuchungen erfolgt dann strukturiert anhand definierter sog. Analysepläne. Diese dienen der Visualisierung der Messergebnisse und werden als Grundlage für die Defizitanalyse des Gaserfassungssystems herangezogen.
Ziel ist eine konsistente Zusammenführung von Betriebsdaten, Untersuchungsergebnissen und Modellrechnungen, sodass ein Gesamtbild des Deponiegaspotenzials entsteht.

4.1 Datenauswertung

Die Datenauswertung erfolgt standortbezogen und vergleichend über die einzelnen Untersuchungskampagnen hinweg. Dabei werden Messwerte aus dem Regelbetrieb, aus gezielten Besaugungsversuchen sowie aus ergänzenden Zustands- und Funktionsprüfungen zusammengeführt. Auf diese Weise lassen sich sowohl kurzfristige Betriebszustände als auch längerfristige Entwicklungen der Gasfassung nachvollziehen.

Zentrale Auswerteparameter sind:

- Gasvolumenströme je Brunnen, Strang und Gesamtanlage,
- Methan-, Kohlendioxid- und Sauerstoffgehalte,
- Unterdrücke und Betriebszustände,
- zeitliche Entwicklung (Trendanalysen).

Die Daten werden für unterschiedliche Betriebsszenarien ausgewertet:

- Regelbetrieb (Bestandssituation),
- optimierte Besaugung (aus Kampagnen),
- Maximalabsaugung (Potenzialermittlung).

4.2 Bewertung des Gaserfassungssystems

Auf Basis der ausgewerteten Daten wird das Gaserfassungssystem hinsichtlich seiner technischen Funktionsfähigkeit und seiner tatsächlichen Erfassungsleistung bewertet. Im Mittelpunkt stehen dabei die Frage, welche Bereiche des Deponiekörpers wirksam erfasst werden, welche Anlagenteile Einschränkungen aufweisen und inwieweit die vorhandene Betriebsführung das standortspezifische Gaspotenzial ausschöpft.

Die Bewertung erfolgt anhand technischer und funktionaler Kriterien:

- Leistungsfähigkeit einzelner Gasbrunnen (Erfassungsradius, spezifische Förderleistung),
- Homogenität der Absaugung (Verteilung im Deponiekörper),
- Hinweise auf Fehlfunktionen:
  - Sauerstoffeindringungen (zu hohe O_2-Gehalte),
  - Wassereinstauungen (stark reduzierte Förderleistung),
  - verblockte oder beschädigte Brunnen (Kamerabefahrung).

Ein konservativer Bewertungsansatz ist erforderlich, um eine Übersaugung (mit verstärktem Lufteintrag) zu vermeiden.

5 ABLEITUNG DES GASERFASSUNGSGRADES (REGELBETRIEB VS. POTENZIAL)

Dieser initiale Gaserfassungsgrad basiert auf der Gegenüberstellung der gemessenen Gasfassung im Regelbetrieb und der modellierten Methanbildungsrate aus der Deponiegasprognose nach IPCC beziehungsweise unter Berücksichtigung der Vorgaben der BQS 10-1. Er stellt damit eine rechnerische Kenngröße dar, die aufgrund der Unsicherheiten in der Modellierung sowie der realen Systemzustände jedoch nur eingeschränkt die tatsächliche Leistungsfähigkeit der Gasfassung widerspiegelt.

Bei aktuellen Bestimmungen von Deponiegaserfassungsgraden tritt zunehmend der Fall auf, dass aus dem Quotienten von erfasster Methanmenge und prognostizierter Methanbildungsrate ein initialer Gaserfassungsgrad von über 100 % ermittelt wird. Ein solcher Wert ist aus physikalischer Sicht nicht plausibel, da eine Deponiegasfassung nicht mehr Methan erfassen kann als im Deponiekörper tatsächlich gebildet wird. Gaserfassungsgrade oberhalb von 100 % stellen daher einen deutlichen Hinweis darauf dar, dass die zugrunde liegende Gasprognose die tatsächliche Methanbildung unterschätzt oder die zeitliche Entwicklung der Gasbildung nicht zutreffend abbildet.

Insbesondere bei älteren Deponien zeigt sich häufig, dass die modellierte Methanbildungsrate bereits deutlich zurückgegangen ist, während in der Praxis weiterhin vergleichsweise hohe Methanmengen erfasst werden. Ursache hierfür können konservative Annahmen hinsichtlich der Abbaukinetik, unzureichend dokumentierte Ablagerungsdaten oder standortspezifische Verzögerungen der biologischen Abbauprozesse sein. Der tatsächliche Abbau organischer Substanz verläuft unter realen Deponiebedingungen oftmals langsamer und über einen längeren Zeitraum als durch das Modell prognostiziert. Als Beispiel zeigt die Abb die prognostizierte Deponiegasbildung nach der FOD Methode einer Beispieldeponie, gemeinsam mit den Mengen der jährlichen Deponiegasfassung seit 1987 und dem empirisch ermittelten Gaspotenzial im Jahr 2024. Es ist zu sehen, dass im regulären Betrieb seit dem Jahr 2020 theoretische Gaserfassungsgrade von bis über 400 % erzielt werden. Hinzu kommt das im Rahmen eines Absaugversuchs festgestellte Gaspotenzial welches um einen Faktor von etwa 48 höher liegt als das prognostizierte Gaspotenzial.

Werden derartige Gaserfassungsgrade von über 100 % ungeprüft übernommen, führt dies zwangsläufig zu Fehlinterpretationen des tatsächlichen Deponiegaspotenzials. Die Gasprognose würde suggerieren, dass ein unrealistisch hoher Anteil des erzeugten Methans erfasst wird, obwohl tatsächlich die Methanbildungsrate nicht zutreffend beschrieben wird. In der Folge ergeben sich systematische Fehleinschätzungen hinsichtlich der verbleibenden Gasreserven, der zukünftigen Gasbildung und der zu erwartenden Emissionen, was unter anderem auch die Auslegung und Dimensionierung von Deponiegasbehandlungsanlagen erschwert.

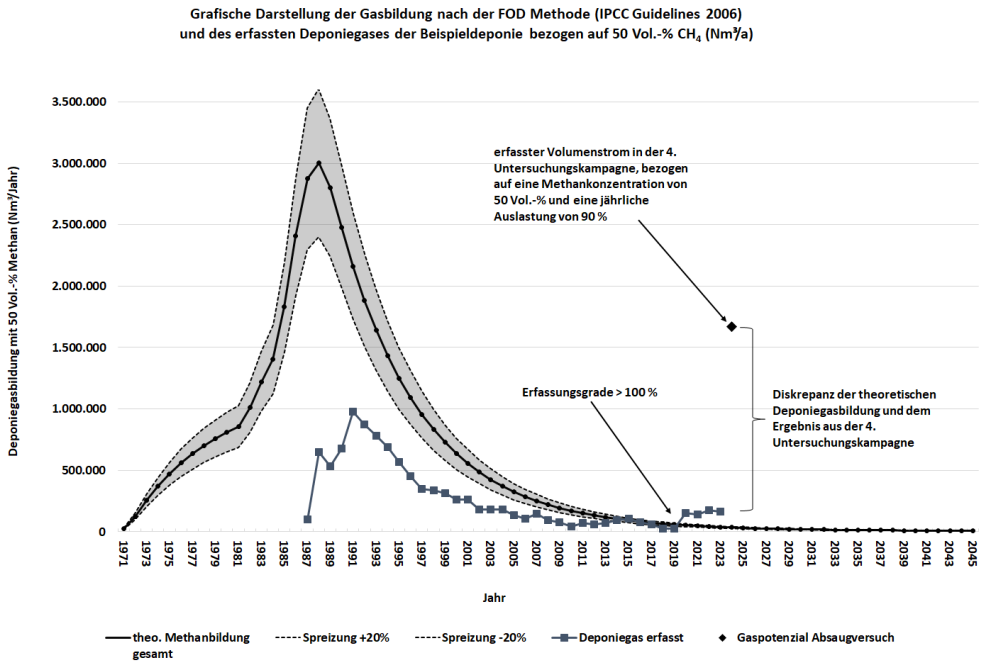


Abb. 1: Grafische Darstellung der Deponiegasbildung nach der FOD Methode einer Beispieldeponie sowie der jährlichen Deponiegasfassung seit 1987 und dem empirisch bestimmten Gaspotenzial im Jahr 2024.

5.1 Ermittlung des tatsächlichen Gaserfassungsgrades

Der tatsächlich wirksame Gaserfassungsgrad kann alternativ durch eine integrative Bewertung des Zustandes des Gaserfassungssystems bestimmt bzw. abgeschätzt werden. Grundlage hierfür bilden die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen sowie ergänzende Informationen zur Ausführung, zum Betrieb und zur Historie der Deponiegasfassung.

In die Bewertung fließen insbesondere ein:

- Ergebnisse aus den Untersuchungskampagnen (Einzelbrunnen- und Strangbesaugung, Absaugversuche),
- Zustandsanalysen aus Kamerauntersuchungen (z. B. Verblockungen, Defekte, Wassereinstau),
- Messdaten zu Gasmengen, Methan- und Sauerstoffgehalten,
- Hinweise auf Lufteintrag und Übersaugung,
- Entwicklung der Gasfassung über die Betriebszeit der Deponie.

Durch diese gesamtheitliche Betrachtung wird eine realistische Einschätzung desjenigen Anteils der Methanbildung ermöglicht, der unter den gegebenen technischen und betrieblichen Randbedingungen tatsächlich erfasst werden kann. Der so abgeleitete Gaserfassungsgrad ist als kalibrierter Gaserfassungsgrad zu verstehen.

5.2 Kalibrierung und Verschiebung der Gasprognose

Der kalibrierte Gaserfassungsgrad dient im nächsten Schritt als zentrales Instrument zur Anpassung der Gasprognose. Ziel ist es, die Diskrepanz zwischen modellierter Methanbildungsrate und empirisch belegbarer Gasfassung systematisch auszugleichen.

Hierzu wird die Gasprognose zeitlich so lange verschoben beziehungsweise verzögert, bis sich ein konsistentes Verhältnis zwischen prognostizierter Methanbildung und tatsächlich erfasster Gasmenge ergibt. Formal bedeutet dies, dass der Quotient aus erfasster Gasmenge und prognostizierter Methanbildungsrate dem zuvor bestimmten kalibrierten Gaserfassungsgrad entspricht.

Diese Vorgehensweise berücksichtigt, dass:

- die reale Gasbildung im Deponiekörper zeitlich gegenüber der Modellprognose verzögert auftreten kann,
- hydraulische und biologische Prozesse zu einer Streckung des Gasbildungszeitraums führen,
- das tatsächlich erschließbare Gaspotenzial nicht exakt dem theoretischen Maximum entspricht.

Die Verschiebung der Prognose stellt somit keine rein mathematische Anpassung dar, sondern eine empirisch begründete Kalibrierung des Modells an die standortspezifischen Gegebenheiten. Abb. zeigt, wie die Kalibrierung bzw. Verzögerung der Gasprognose anhand des zuvor vorgestellten Beispiels ablaufen kann. Hierbei wurde das empirisch bestimmte Maximalpotenzial der Gasbildung konservativ betrachtet und es wurden und angenommen, dass etwa 75 % dessen einer realistischen Deponiegasneubildung entsprechen. Die Deponiegasprognose wurde anschließend verschoben, bis dieses Verhältnis erreicht wurde. Die in dem Jahr 2023 am Standort installierte Gaserfassung erreichte somit einen kalibrierten Gaserfassungsgrad von etwa 11 %. Die Darstellung zeigt zudem, welches zusätzliche Gaspotenzial durch eine Optimierung der Gaserfassung genutzt werden könnte und ist somit relevant für eine zukünftige Auslegung und Dimensionierung neuer Anlagentechniken.

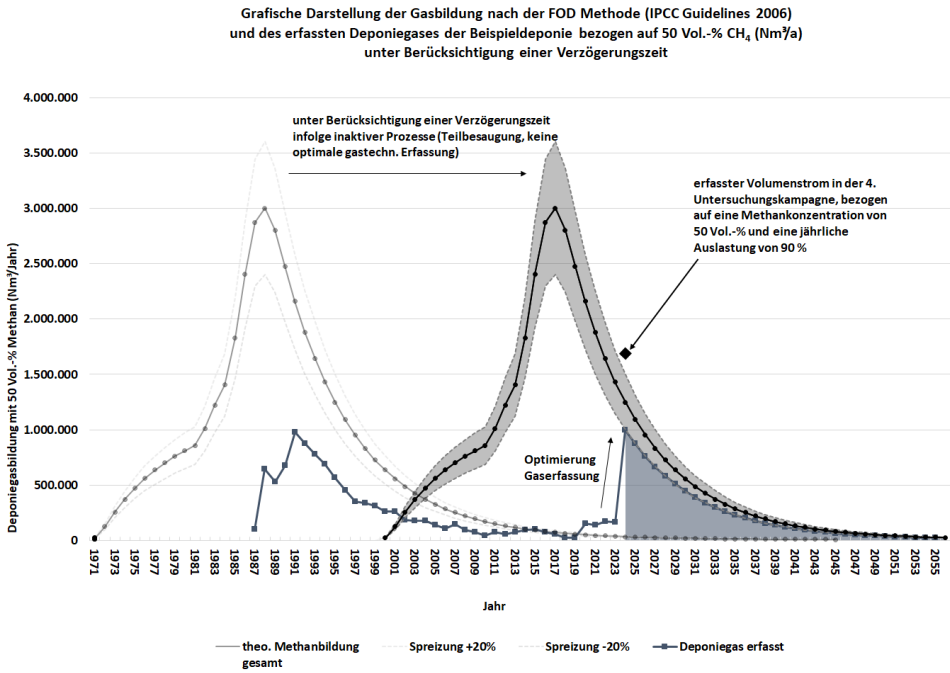


Abb. 2: Grafische Darstellung der Deponiegasbildung nach der FOD Methode einer Beispieldeponie unter Berücksichtigung einer Verzögerungszeit sowie der jährlichen Deponiegasfassung seit 1987, dem empirisch bestimmten Gaspotenzial im Jahr 2024 und einer möglichen Optimierung der Gaserfassung.

5.3 Nutzen der kalibrierten Deponiegasprognose – Bestimmung des realen Deponiegas-dargebots und der möglichen Erfassung

Die auf diese Weise angepasste und kalibrierte Gasprognose bildet das tatsächlich verfügbare Gaspotenzial deutlich realistischer ab als eine unkalibrierte Modellrechnung. Daraus ergeben sich wesentliche Vorteile:

- **Verbesserte Prognosegüte** der zukünftigen Methanbildung,
- **realistische Abschätzung langfristiger Erfassungs- und Emissionsverläufe**,
- **fundierte Grundlage** für die Dimensionierung von Gasfassungs- und Gasbehandlungs-anlagen,
- **optimierte Betriebsführung**, insbesondere hinsichtlich Besaugungsstrategien und Anlagenauslastung,
- **erhöhte Planungssicherheit** im Hinblick auf Rückbau- und Nachsorgephasen.

Insgesamt ermöglicht die Kombination aus empirisch ermitteltem Gaserfassungsgrad und kalibrierter Gasprognose eine standortangepasste, technisch belastbare Bewertung der Deponiegasentwicklung. Dies stellt eine wesentliche Voraussetzung dar, um sowohl ökologische Zielsetzungen (Emissionsminderung) als auch betriebliche Anforderungen (Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Gasnutzung) nachhaltig zu erfüllen.

6 AUSBLICK UND WEITERE VORGEHENSWEISE

In den letzten mehr als 20 Jahren, insbesondere in den letzten zwölf Jahren im Rahmen der Erstellung geförderter Machbarkeitsstudien im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative, wurde die Herangehensweise zur empirischen Bestimmung an mehreren Dutzend Standorten erfolgreich angewandt.

Bei vielen dieser Projekte werden auf Basis der Datenauswertung und fachgutachterlichen Begleitung Optimierungsarbeiten zur Verbesserung der Gaserfassung und -behandlung durchgeführt. Im Mittel werden durch die Maßnahmen pro Standort und Verfahrensanwendung Gaserfassungsgrade von mehr als 80 % erreicht. Die Treibhausgaseinsparpotenziale bezogen auf die Ausgangssituation können je nach Standort zwischen 6.500 und 12.500 Mg/a liegen.

Auch wenn bereits einzelne Aufgabenfelder erfolgreich bearbeitet wurden, besteht weiterhin erheblicher Handlungsbedarf. Kontinuierlich werden anhand weiterer Studien und Projekte Daten gesammelt, die eingesetzte Verfahrenstechnik weiterentwickelt und mit theoretischen Erfahrungen abgeglichen. Ein weiterer Austausch mit allen Beteiligten ist ausdrücklich erwünscht. Dieser erfolgt unter anderem in verschiedenen Arbeitsgruppen (z. B. AK Deponiegas BW) und Gremien (VDI-Richtlinien).

Neben weiteren anstehenden Masterarbeiten werden auch Referenzprojekte vorangetrieben. Längerfristige und aussagekräftige Versuche in Deponiesimulationsreaktoren auf Basis ungestörter Bohrproben sollen ebenfalls durchgeführt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 10-1 „Deponiegas“, LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“, 2021.

IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006: Chapter 3 des Volume 5, verfügbar unter http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp.

NV Afvalzorg Multiphase Landfill Gas Model 2025

Nachhaltige Potenziale Deponiegas/Optimierung Gaserfassung/praktische Bestimmung Gaserfassungsgrad, Jürgen Forsting, Frank Otto, Leoben 2022.

KONTAKT

CDM Smith SE
Am Umweltpark 3 – 5
44793 Bochum
Tel.: +49 234 68 775 0
Fax: +49 234 68 775 10
melina.simon@cdmsmith.com
konstantin.meier@cdmsmith.com
juergen.forsting@cdmsmith.com
www.cdmsmith.com

Ermittlung der Gasbildungsrate an Deponien zur Bestimmung des Erfassungsgrades

Gerhard Rettenberger
Hochschule Trier, Deutschland

KURZFASSUNG: Nach dem Qualitätsstandard Deponiegas 10-1 in Deutschland ist der Erfassungsgrad vom Deponiebetreiber zu ermitteln. Ist dieser zu gering hat der Betreiber Maßnahmen zur Verbesserung des Erfassungsgrades auszuarbeiten und umzusetzen. Als Basis zur Ermittlung wird standardmäßig auf die Modellierung der Gasentwicklung in Relation zum tatsächlich abgeleiteten Gasmassenstrom zurückgegriffen. Besonders bei kleinen Massenströmen wird dieser Quotient ungenau. Daher müssen auf andere Techniken zur Bestimmung der Gasbildung zurückgegriffen werden. Hierzu gehört insbesondere die Durchführung eines Absaugversuches gemäß VDI Regel.
Ein Absaugversuch ist die systematische Absaugung unterschiedlicher Massenströme mit paralleler Beobachtung der Gaszusammensetzung. Bei geeigneter Durchführung und Auswertung kann auf die Gasbildung geschlossen werden. In der Praxis werden hierbei allerdings verschiedene Fahler gemacht, so dass die ermittelten Werte zu verwerfen sind.
In dem vorgeschlagenen Beitrag soll einerseits der Hintergrund der Erfassungsgradermittlung dargestellt werden und andererseits die Durchführung von Absaugversuchen gemäß VDI Regelwerk dargestellt werden. Die Frage nach weiteren Alternativen soll ebenfalls beantwortet werden.

1 WARUM IST DIE BESTIMMUNG DES ERFASSUNGSGRADES VON DEPONIEENTGASUNGSANLAGEN BEDEUTSAM?

Deponien, in denen abbaubare, organische Stoffe abgelagert wurden, stellen eine wesentliche Quelle für Methan dar. Sie tragen weltweit zum gesamten Treibhausgaseffekt mit etwa 15-18 % bei. Obwohl es damit das Beste wäre, solche Abfälle überhaupt nicht zu deponieren, so wie dies bereits in einigen Ländern der Fall ist, emittieren ältere Deponien bzw. Deponien in solchen Ländern, wo dies noch erlaubt ist, nach wie vor erhebliche Mengen an Methan. Es ist daher ein großes Anliegen, durch technische Maßnahmen zur Gaserfassung, solche Emissionen von Methan zu unterdrücken. Die Frage ist natürlich dabei, wie effektiv solche Maßnahmen sein können bzw. sind. Der Quotient aus erfasstem Deponiegas zu gebildetem Deponiegas über einen gleichen Zeitraum, wobei hier üblicherweise eine Periode von einem Kalenderjahr gewählt wird, wird als Erfassungsgrad bezeichnet. Weltweit betrachtet liegen die Werte für solche Quotienten bei 15-30 %. In Europa werden Werte um 30-50 1% erreicht. Dies bedeutet, dass über die Hälfte der jährlichen Gasbildung in die Atmosphäre abgegeben werden. Nur ein geringer Anteil wird durch mikrobielle Methanoxidation abgebaut.

In Deutschland sind die wesentlichen technischen Elemente einer Deponieentgasungstechnik nach dem Stand der Technik in der VDI Richtlinie 3899 Blatt 2 (Deponiegas-, Systeme zur Deponiegaserfassung und Belüftung) enthalten. Auf dieser Basis wurde anschließend der Qualitätsstandard 10-1 Deponiegas in Deutschland durch die LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) veröffentlicht. Hierin ist die Ermittlung des Erfassungsgrads vom Deponiebetreiber zu ermitteln und in einem Qualitätsmanagementplan (QMP) anzugeben. Ist dieser zu gering hat der Betreiber Maßnahmen zur Verbesserung des Erfassungsgrades für die bestehende Entgasungsanlageauszuarbeiten und umzusetzen. Dies bedeutet nicht zwangsläufig den Neubau von Entgasungselementen, aber die Optimierung der bestehenden Anlage. Erfassungsgrade über 50 % sollten damit gesichert möglich sein.

2 DER OPTIMALE ERFASSUNGSGRAD

Der optimale Erfassungsgrad wird dann erzielt, wenn der abgesaugte Methanmassenstrom an einem Gaskollektor (Gasbrunnen) ein Optimum erreicht hat. Dies soll mit der nachfolgender Abbildung 1 verdeutlicht werden. Wie aus der Abbildung 1 oben hervorgeht, nimmt mit zunehmendem Volumenstrom für Methankonzentration im abgesaugten Gasstrom ab. Durch den aufgebauten Unterdruck in der Deponie wird Luft aus der Atmosphäre mit angesaugt. Wird aber jetzt die untere Abbildung betrachtet, so wird deutlich, dass trotz abfallender Methankonzentration der Methanmassenstrom weiter zunimmt. Die Kurve zeigt dabei ein ausgeprägtes asymptotisches Verhalten. Ab einem bestimmten Volumenstrom nimmt der Methanmassenstrom nicht mehr weiter zu. Dieser Zustand stellt sich häufig bei einer Methankonzentration um 25-30 % ein. Das Deponieinnere wird dann weitgehend im negativen Differenzdruckbereich sein. Dieser Zustand kann hinsichtlich des erfassten Methanvolumenstroms als optimaler Betriebszustand bezeichnet werden. Eine Gasverwertung dürfte dabei eher problematisch sein.

3 DIE ERMITTLUNG DES ERFASSUNGSGRADES

Als Basis zur Ermittlung wird standardmäßig auf die Modellierung der Gasentwicklung in Relation zum tatsächlich abgeleiteten Gasmassenstrom zurückgegriffen. Damit werden hier jährliche Daten, die in die Modellierung eingehen, also die verwogenen Abfallmassen mit jährlich gemessenen Daten zum Volumenstrom miteinander verglichen. Damit ist trotz der Modellierung eine vergleichsweise gute Datenbasis gegeben. Besonders bei kleinen Massenströmen wird dieser Quotient jedoch ungenau. In den letzten Jahren sind Methoden zur Emissionsmessung entwickelt worden. Solche Verfahren sind landgestützt (unmittelbar am Deponierand), können jedoch auch von Drohnen, Helikoptern, Flugzeugen oder Satelliten aus die Emissionen messen. Der generelle Nachteil dieser Verfahren ist es aber, dass sie nur kurzzeitig messen und damit Schwankungen, die an Deponien auftreten können (Stichwort: Wind und Luftdruckschwankungen) nicht berücksichtigen.

Die Frage ist, ob auf andere Techniken zur Bestimmung der Gasbildung zurückgegriffen werden kann.

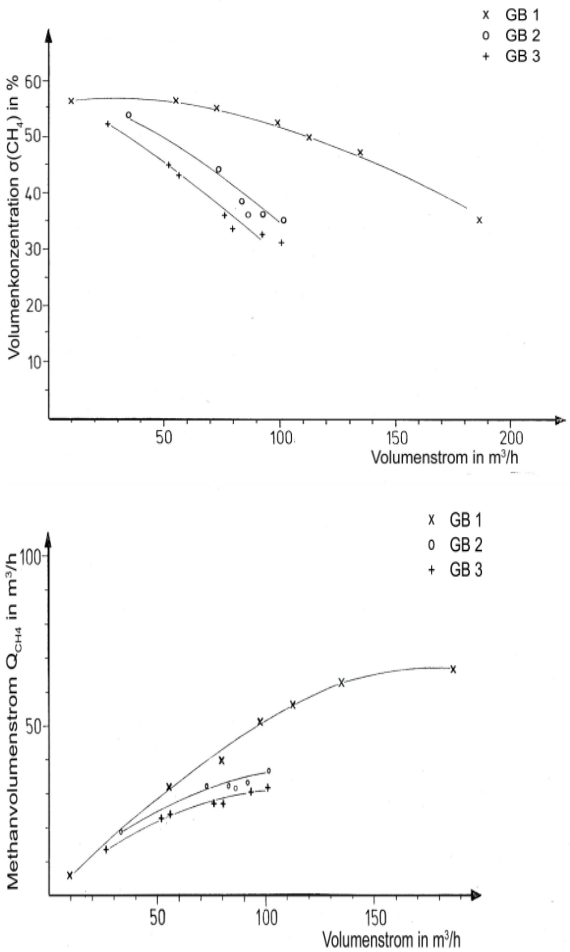


Abb. 1: Verhalten der Methankonzentration und des Methanmassenstroms in Abhängigkeit des Absaugvolumenstroms (Abbildung Autor)

Hierzu gehört insbesondere die Durchführung eines Absaugversuches gemäß VDI Regel.

4 DIE DURCHFÜHRUNG VON ABSAUGVERSUCHEN

Ein Absaugversuch ist die systematische Absaugung unterschiedlicher Massenströme mit paralleler Beobachtung der Gaszusammensetzung. Bei geeigneter Durchführung und Auswertung kann auf die Gasbildung geschlossen werden. Dies trifft insbesondere auf abgeschlossene und komplettmit Kunststoffmembranen abgedichtete Deponien zu. Erfahrungsgemäß können bei solchen Deponien Erfassungsgrade von bis zu 100 % erzielt werden. In der Praxis werden hierbei allerdings verschiedene Fehler gemacht, so dass die ermittelten Werte zu verwerfen sind. Generell muss zwischen Kurz- und Langzeitabsaugversuch unterschieden werden. Beide Techniken lassen sich sinnvoll einsetzen, aber nur der Langzeitabsaugversuch kann zu einer Bestimmung des Gaspotenzials führen. Aber auch nur dann, sofern die Deponie über ein komplettes Absaugsystem verfügt und dieses auch komplett besaugt wird. Zur Frage der Abdichtung an der Oberfläche wurden bereits Hinweise gegeben.

Ein Absaugversuch ist eine Methode zur Absaugung einer Deponie unter definierten stationären Bedingungen. Messungen der relevanten Absauggrößen und Konzentrationen einschließlich Spurenstoffen und Temperaturen an der Absaugstelle und in der Umgebung werden damit zumeist verbunden. Damit können mehrere Ziele avisiert werden:

- Aussagen zur Höhe der Gasbildung in der Deponie,
- Leistungsfähigkeit des Gasabsaugsystems (gesamt oder in Teilen),
- Einzugsbereich der Gaskollektoren,
- Einzugsbereich und Gaswegsamkeit,
- Ertüchtigungsbedarf,
- Dynamik der Übersaugung (s.o. Abbildung 1)),
- Asymptote der Methanfracht,
- Auslegung und Auswirkung einer Aerobisierung.

Technische Vorgaben finden sich in VDI 3899 Blatt 2, Abschnitt 10.2 und VDI 3790 Blatt 2. Ganz wesentlich ist dabei, dass die unterschiedlichen Volumenströme, also auch die unterschiedliche Unterdrücke stufenweise bei den kleinen Volumenströmen beginnend, eingestellt und bis zu stationären Zuständen betrieben werden. Erst danach kann der Volumenstrom erhöht werden. Am Ende der Auswertung steht die Ermittlung der Beziehung:

$$\sigma(CH_4, CO_2, O_2, \text{Spurengase}) = f(v, p) \quad (1)$$

Dies Beziehung kann durch folgende Gleichung angenähert werden.

$$\sigma(CH_4) = \sigma(CH_{4\,\text{Anfang}})/(1 + b \cdot v^2) \quad (2)$$

mit:	$\sigma(CH_{4\,\text{Anfang}})$:	Methankonzentration bei v = 0 m³/h
	b:	Konstante
	v:	abgesaugter Volumenstrom in m³/h

Entsprechend den zwei Strategien (Kurzzeit-, Langzeitabsaugversuch) lassen sich unterschiedliche Schlussfolgerungen ziehen:

- kurzzeitige Versuche (nur wenige Stunden bis Tage), mit dem Risiko, dass sich keine stationären Zustände einstellen werden. Werden daher meist nur zur Ermittlung der erforderlichen Drücke, Druckverteilung, Tiefenzonierung genutzt. Sie sind nicht zur Bestimmung der Gasbildung (was in der VDI auch nicht angesprochen wird) nutzbar.
- Versuche über einen längeren Zeitraum (mehrere Wochen bis mehrere Monate, meist mindestens 3). Sind in der Regel erforderlich. Sofern der Absaugversuch gemäß Abbildung 1 durchgeführt wird und sich auf die komplette Deponie bezieht, die abgeschlossen und an der Oberfläche abgedichtet ist, kann erwartet werden, dass ein Erfassungsgrad von nahezu 100 % erreicht wird. Damit würde die abgesaugte Gasmenge der tatsächlichen Gasbildung entsprechen. Allerdings bezieht sich auch hier das Ergebnis auf einen nur kurzen Zeitraum und kann mögliche Schwankungen nicht berücksichtigen. Gegebenenfalls könnte dieser Effekt durch parallele Messungen z.B. der Drücke eingeschränkt werden. Nur damit könnten Hinweise zur Höhe der realen Gasbildung gewonnen werden. Der hohe Gaserfassungsgrad ließe sich so belegen.

LITERATURVERZEICHNIS

Rettenberger, G. (2004) Untersuchungen zur Charakterisierung der Gasphase in Abfallablagerungen, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 82, München, Kommissionsverlag Oldenbourg Industrieverlag GmbH.

VDI 3899 Blatt 2 (2020) Emissionsminderung, Deponiegas, Systeme zur Deponiegaserfassung und Belüftung, November 2020.

Sleeves - Einblicke über das Trennverhalten von Konsument*innen bei gesleevten Verpackungen

Naruporn Wootthikanokkhan[1], Manuel Pfitzner[1], Martin Novak[1], Alexia Tischberger-Aldrian[2], Vasiliki-Maria Archodoulaki[3], Norbert Fenkart[4], Julia Lettner[5], Manuel Seifert[6] & Viktoria Helene Gabriel[1]

[1)] Hochschule Campus Wien, Verpackungs- und Ressourcenmanagement, Wien, Österreich
[2)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[3)] TU Wien, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, Wien, Österreich
[4)] CCL Label GmbH, Research & Development, Dornbirn, Österreich
[5)] SPAR AG, Verpackungsmanagement, Salzburg, Österreich
[6)] Circular Analytics TK GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Verpackungen mit Sleeves gelten derzeit nur bedingt als recyclingfähig, da der Sleeve die korrekte Detektion des Hauptverpackungskörpers einschränken kann. Die Trennung durch Konsument*innen bei der Abfallentsorgung wurde bislang kaum erforscht. Ziel dieses Beitrages ist es, das Konsument*innen-Trennverhalten von Papier- und Kunststoff-Sleeves auf Kunststoffverpackungen systematisch in einem mehrstufigen Forschungsansatz zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass 82 % der befragten Personen Papier-Sleeves von der Kunststoffverpackungen abtrennen. Im Gegensatz dazu, trennen nur 54 % der Personen einen Kunststoff-Sleeve von einer Kunststoffverpackung ab. Gründe für dieses Trennverhalten liegen einerseits im offensichtlichen Materialunterschied sowie im Verpackungsdesign hinsichtlich diverser vorhandener Trennhinweise und Trennhilfen auf den untersuchten Verpackungen. Weitere Untersuchungen des tatsächlichen Trennverhaltens anhand von Experimenten finden im Herbst 2026 statt.

1 EINLEITUNG

Die Erreichung der Recyclingquote von 50 % bis 2025 bzw. 55 % bis 2030 für Kunststoffverpackungsabfälle bleibt weiterhin eine Herausforderung (European Parliament, 2025). Die aktuelle Recyclingquote für Kunststoffverpackungen lag bei nur 26,9 % für das Jahr 2023 in Österreich (Bernhardt, et al., 2025). Deswegen gab es in den letzten Jahren einige Bestrebungen, um die Kreislauffähigkeit von Kunststoffverpackungen in Österreich zu verbessern. Neben der Erreichung von Recyclingquoten ist zudem die Rezyklatqualität von immenser Bedeutung.

Eine kreislauffähige Verpackungsindustrie ist eine Grundvoraussetzung für eine hohe Recyclingquote an hochqualitativem Rezyklat. Um die geforderten Recyclingquoten zu erhöhen, müssen bestimmte Produkte und Prozesse neu gedacht werden. Daran knüpft das FFG-Projekt SLEEVE an, welches Kunststoffverpackungen mit Sleeves (ausgenommen Einwegpfandflaschen) adressiert. Shrink Sleeves ermöglichen eine 360°-Gestaltung der gesamten Verpackungsoberfläche und passen sich an die jeweilige Verpackungsform an, ohne dass Klebstoffsysteme eingesetzt werden. Es gibt eine Vielzahl an Kunststoffverpackungen mit Shrink-Sleeves wie beispielsweise Molkereiprodukte, Reiniger oder Waschmittel. Sleeves bieten einen Mehrwert in vielerlei Hinsicht, jedoch muss deren Kreislauffähigkeit verbessert werden. Der Abdeckungsgrad der Verpackungsoberfläche hat Einfluss auf die Sortier- und Recyclingfähigkeit des darunterliegenden Hauptverpackungskörpers. Aktuelle Design4Recycling-Vorgaben (D4R) empfehlen einen Bedeckungsgrad der Verpackungsoberfläche bei Flaschen ≤ 500 ml von maximal 50 % und bei Flaschen > 500 ml von maximal 70 % (Gürlich, Kladnik, & Pavlovic, 2022; RecyClass, 2024). Eine Studie von Jakobs und Kroell (Jakobs & Kroell, 2024) zeigte, dass nur 65,9 m-% an vollgesleevten Food-Flaschen und 72,1 m-% an vollgesleevten Non-Food Flaschen in die richtige Sortierfraktion gelangen. Vollgesleevte HDPE Food-Flaschen werden lediglich zu 43,3 m-% korrekt sortiert und

vollgesleevte PET Non-Food Flaschen nur zu 66,2 m-% (Jakobs & Kroell, 2024). Die geringe Sortierrate der HDPE Food-Flaschen liegt der Untersuchung selektiver Markenprodukte zugrunde, welche mit einem PET-Sleeve bedeckt sind (Jakobs & Kroell, 2024). Chen et al. (Chen, et al., 2023) haben Möglichkeiten zur verbesserten Sortierfähigkeit vollgesleevter Flaschen mittels NIR-Detektion untersucht und hinsichtlich des Sleeve-Designs identifiziert, dass durch die Vermeidung schwarz-gefärbter Sleeves, großflächiger Bedruckung und hoher Schrumpfraten bereits Verbesserungen möglich sind.
Nur wenn der Hauptverpackungskörper in der Sortierung korrekt detektiert wird und/oder die Shrink-Sleeves sich gut abtrennen lassen, können gesleevte Verpackungen einen Beitrag zur Qualitätssteigerung von Rezyklaten leisten. Im Rahmen des Projektes SLEEVE fokussiert das Konsortium dabei mehrere Aspekte der Kreislaufwirtschaft wie das Verpackungsdesign, das Konsument*innen-Verhalten, die technische Sortierbarkeit und die erforderlichen Vorbereitungsschritte für das Recycling, um die Rezyklierbarkeit von gesleevten Verpackungen zu steigern.

Im Rahmen des Konferenzbeitrages wird das Potenzial des Konsument*innen-Verhaltens näher beleuchtet, das bislang unzureichend erforscht und hinterfragt wurde. Ziel dabei ist es anhand einer ersten systematischen Analyse die Einstellungen und das Wissen der Konsument*innen über deren derzeitiges Trennverhalten von gesleevten Verpackungen erstmalig zu erheben und mit dem tatsächlichen Trennverhalten gegenüberzustellen.

2 MATERIAL & METHODEN

Für die Erhebung des Konsument*innen-Verhaltens wurde ein Mixed Methods Ansatz, eine Kombination aus quantitativen und qualitativen Erhebungsmethoden, gewählt, um relevante Daten und Informationen in Bezug auf gesleevte Verpackungen mithilfe unterschiedlicher Ansätze zu erheben.

2.1 Quantitative Erhebung

Im Zuge einer quantitativen Erhebung wurde eine repräsentative Umfrage in Österreich mit 1.000 Personen durch ein Marktforschungsinstitut im Erhebungszeitraum von 13. bis 27. Oktober 2025 durchgeführt. Ziel dieser Erhebung war es, die Einstellungen und die Wahrnehmung der Österreicher*innen zu Verpackungen und deren Umgang, speziell in Bezug auf die Entsorgung und Abfalltrennung von gesleevten Verpackungen, zu ermitteln.

2.2 Qualitative Erhebung

Im zweiten Schritt wurden anhand qualitativer Erhebungsmethoden, in diesem Fall von Einzelinterviews, deren Wahrnehmung, Motive und Einstellungen zu sechs ausgewählten Verpackungen sowie deren tatsächliches Trennverhalten erhoben. Davon waren drei Verpackungen mit Papier-Sleeves und drei Verpackungen mit Shrink-Sleeves ausgestattet, die sich im Design der Sleeves als auch der Entsorgungs- und Trennhinweise auf den Verpackungen unterschieden. Die Einzelinterviews wurden mit sieben Personen durchgeführt, welche eine Convenience-Stichprobe repräsentieren und über die Hochschule Campus Wien rekrutiert wurden. Die Interviews fanden im Zeitraum von Februar bis April 2026 statt. Für die Einzelinterviews wurde ein Interviewleitfaden erstellt. Die Interviews wurden aufgezeichnet, mittels der Software Turboscribe transkribiert und mit der Software MAXQDA ausgewertet. Für die Auswertung wurde eine deduktive Kategorisierung nach Mayring (Mayring, 2014) erstellt.

2.3 Experiment

Das Ziel bei der Durchführung eines Experimentes ist es, das tatsächliche Konsument*innen-Verhalten bei der Entsorgung von gesleevten Verpackungen in einer realen Alltagsumgebung zu erheben. Dies ermöglicht die direkte Ermittlung von Rückschlüssen, ob unterschiedliche Trennhinweise und -hilfen auf den eingesetzten, gesleevten Produktverpackungen eine erhöhte Bereitschaft zur Abtrennung der Sleeves aufweisen. Zudem können potenzielle Einflüsse auf das tatsächliche Trennverhalten durch eine fehlende Testumgebung minimiert werden. Die Durchführung eines ersten Experiments ist für Herbst 2026 geplant.

3 ERGEBNISSE

3.1 Quantitative Erhebung

Die Ergebnisse der quantitativen Erhebung zeigen, dass 82 % der befragten Personen Papier-Sleeves getrennt von Kunststoffverpackungen (Hauptverpackungskörper) entsorgen, während nur 54 % der befragten Personen Kunststoff-Sleeves getrennt von Kunststoffverpackungen entsorgen (Abb. 1).

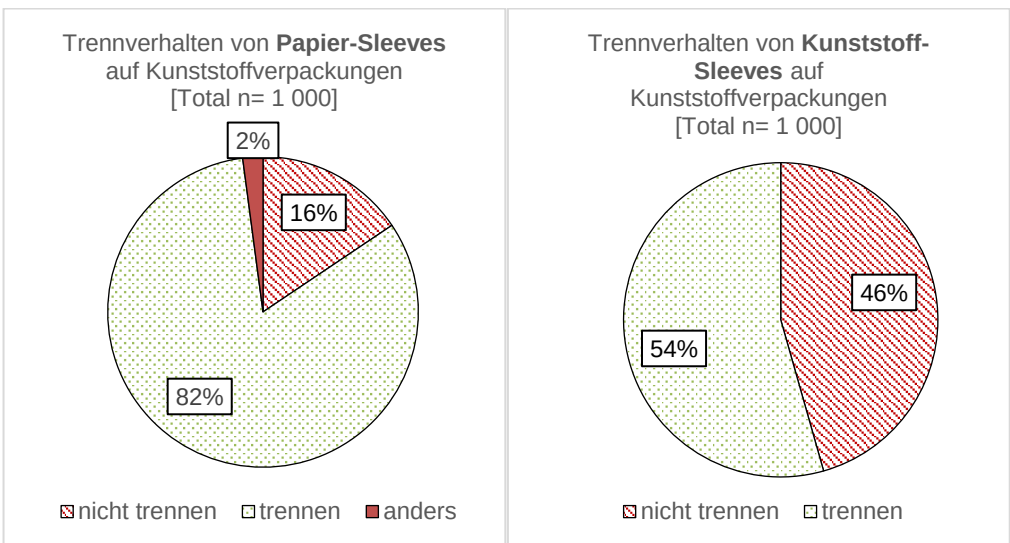


Abb. 1: Trennverhalten der Konsument*innen von Papier-Sleeves

Zusätzlich wurde das Trennverhalten je Verpackungstyp nach geographischen Regionen analysiert. Die Unterteilung erfolgte in ländliche Regionen bis 5.000 Einwohner*innen, urbane Regionen von >5.000 bis zu über 50.000 Einwohner*innen und der Bundeshauptstadt Wien (ca. 2.000.000 Einwohner*innen). Die Ergebnisse für Papier-Sleeves (Abb. 2) zeigen, dass Personen im ländlichen Bereich zu 91 % die Papier-Sleeves vom Hauptverpackungskörper getrennt entsorgen, während Personen in urbanen Gebieten 80 % bzw. in Wien 77 % die Papier-Sleeves abtrennen. Bei Kunststoff-Sleeves (Abb. 3) zeigt sich, dass beinahe 60 % der Personen in ländlichen Gebieten bzw. 55 % in urbanen Gebieten den Shrink-Sleeve getrennt von der Kunststoffverpackung entsorgen, während dieser Anteil bei Personen in Wien bei 46 % liegt.

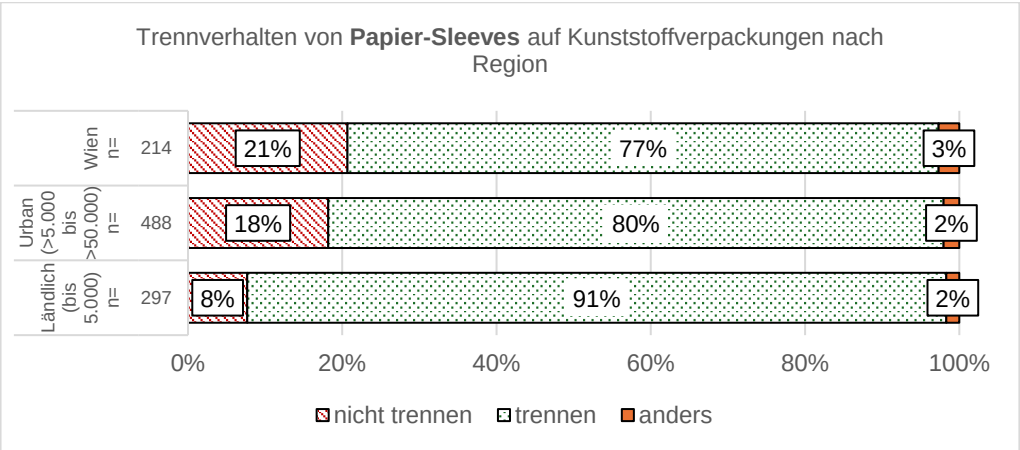


Abb. 2: Trennverhalten der Konsument*innen von Papier-Sleeves in urbanen und ländlichen Gebieten

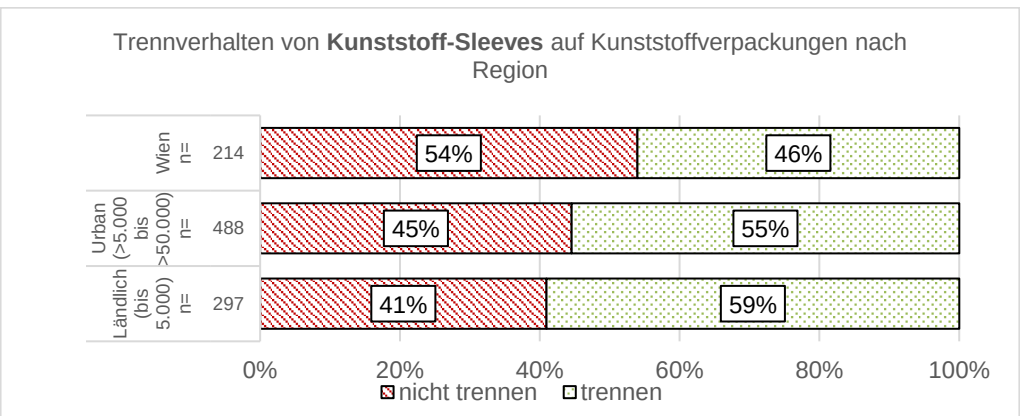


Abb. 3: Trennverhalten der Konsument*innen von Kunststoff-Sleeves in urbanen und ländlichen Gebieten

3.2 Qualitative Erhebung

Die Ergebnisse aus den Tiefeninterviews ergaben, dass überwiegend die Kunststoffverpackungen mit Kunststoff-Sleeves nicht getrennt entsorgt wurden. In puncto Entsorgungs-Convenience wurden überwiegend Kunststoffverpackungen mit Papier-Sleeves präferiert, da durch die unterschiedlichen Materialien, sich die Personen eher dazu veranlasst fühlten, diese abzutrennen. Zudem können konkrete Entsorgungshinweise sowie Trennhilfen (z.B. Perforationen) auf den Verpackungen das Trennverhalten beeinflussen. Erste positive Zusammenhänge wurden bei Papier-Sleeves hinsichtlich der Informationen auf der Verpackung und dem Trennverhalten identifiziert. Bei näherer Betrachtung der Verpackungen durch die Proband*innen wurden vorhandene Entsorgungshinweise und Trennhilfen bei Shrink-Sleeve-Verpackungen ebenfalls positiv assoziiert.

3.3 Experiment

Die Ergebnisse des Experiments werden nach Durchführung im Herbst 2026 direkt im Rahmen des Konferenzvortrages präsentiert.

4 DISKUSSION

Wie aus den obigen Ergebnissen dargelegt werden konnte, wurden die Ergebnisse aus der quantitativen Erhebung im Zuge der qualitativen Erhebung bestätigt. Kunststoffverpackungen mit Papier-Sleeves werden eher getrennt entsorgt als mit vorhandenen Shrink-Sleeves. Die Gründe für dieses Trennverhalten können einerseits auf die offensichtlichen Materialunterschiede zurückzuführen sein und deren Wahrnehmung, andererseits auch auf die erlernten Entsorgungspraktiken für bestimmte Packstoffe und deren Assoziationen und Wahrnehmung hinsichtlich Nachhaltigkeit (Langley, Turner, & Yoxall, 2011; Lindh, Olsson, & Williams, 2016). Dies geht einher mit Schlossnikl et al. (Schlossnikl, Hartl, Lipp, Lederer, & Archodoulaki, 2026), dass Kunststoff gegenüber anderen Packstoffen signifikant schlechter wahrgenommen wird. Klare und verständliche Entsorgungs- oder Trennhinweise können dabei auch maßgeblich eine Rolle spielen, wie bereits für andere Verpackungstypen nachgewiesen wurde (Allison, et al., 2024).

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Aus den dargelegten Ergebnissen des Mixed Methods Ansatzes konnte aufgezeigt werden, dass Personen eher dazu neigen, Papier-Sleeves statt Shrink-Sleeves von Kunststoffhauptverpackungskörper getrennt zu entsorgen. Zudem lassen sich regionale Unterschiede im Trennverhalten feststellen. Die Gründe für die getrennte Entsorgung beider Verpackungskomponenten (Sleeve und Hauptverpackungskörper) sind einerseits auf den wesentlichen Materialunterschied als auch auf die erlernten und wissentlichen Entsorgungspraktiken zurückzuführen. Vorhandene klare und verständliche Informationen können das Trennverhalten positiv beeinflussen. Inwiefern sich diese Ergebnisse im Rahmen einer Alltagsumgebung ohne vorherige Aufklärung über ein Experiment bestätigen lassen können, kann erst zu einem späteren Zeitpunkt gesagt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Allison, A. L., Băitanu, A., Purkiss, D., Lorencatto, F., Michie, S., & Miodownik, M. (2024). Enabling desired disposal of compostable plastic packaging: an evaluation of disposal instruction labels. *Frontiers in Sustainability, 5*. doi:10.3389/frsus.2024.1376519

Bernhardt, A., Broneder, C., Gold-Stoiber, C., Neubauer, C., Oliva, J., Roll, M., . . . Weißenbach, T. (2025). *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2025 für das Referenzjahr 2023.* Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wassserwirschaft (BMLUK). Abgerufen am 27. 06 2026 von https://www.bmluk.gv.at/service/publikationen/klima-und-umwelt/bestandsaufnahme-abfallwirtschaft-statusbericht-2025.html

Chen, X., Kroell, N., Althaus, M., Pretz, T., Pomberger, R., & Greiff, K. (2023). Enabling mechanical recycling of plastic bottles with shrink sleeves through near-infrared spectroscopy and machine learning algorithms. *Resources, Conservation and Recycling, 188*. doi:10.1016/j.resconrec.2022.106719

European Parliament, (22. 01 2025). Regulation (EU) 2025/40 of the European Parliament and of the Council of 19 December 2024 on packaging and packaging waste, amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC (Text with EEA relevance). 2025/40. *Official Journal of the European Union*. Von https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202500040 abgerufen

Gürlich, U., Kladnik, V., & Pavlovic, K. (2022). *Circular Packaging Design Guideline. Design Recommendations for Recyclable Packaging.* Wien: FH Campus Wien und Circular Analytics TK GmbH.

Jakobs, M., & Kroell, N. (2024). Influence of plastic packaging design on the sensor-based sortability in lightweight packaging waste sorting plants. *Resources, Conservation and Recycling, 207*. doi:10.1016/j.resconrec.2024.107599

Langley, J., Turner, N., & Yoxall, A. (2011). Attributes of packaging and influences on waste. *Packaging Technology and Science, 24*(3), 161-1765. doi:10.1002/pts.924

Lindh, H., Olsson, A., & Williams, H. (2016). Consumer Perceptions of Food Packaging: Contributing to or Counteracting Environmentally Sustainable Development? *Packaging Technology and Science, 29*(1), 3-23. doi:10.1002/pts.2184

Mayring, P. (2014). *Qualitative content analysis: theoretical foundation, basic procedures and software solution.* Klagenfurt. https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-395173.

RecyClass. (2024). *Design for Recycling Guidelines - RecyClass*. Von Design for Recycling Guidelines - RecyClass: https://recyclass.eu/protocols-guidelines/design-for-recycling-guidelines/packaging/ abgerufen

Schlossnikl, J., Hartl, B., Lipp, A.-M., Lederer, J., & Archodoulaki, V.-M. (2026). How consumers perceive different materials, packaging, and waste: a plastic-focused analysis. *Detritus*. doi:10.31025/2611-4135/2026.19591

KONTAKT

Viktoria Helene Gabriel, BSc, MSc
viktoria_helene.gabriel@hcw.ac.at
+43 1 606 68 77 - 3562
Fachbereich Verpackungs- und Ressourcenmanagement
Hochschule Campus Wien
https://www.hcw.ac.at/

Untersuchungen zur sortenreinen Trennung von Schleifkörnern aus kunstharzgebundenen Schleifwerkzeugen

Claudia Maurer[1], Samuel Griza[1] & Daniel Vollprecht[1]
[1)] Universität Augsburg, Institut für Material Resource Management, Lehrstuhl Resource and Chemical Engineering. Augsburg, Deutschland

KURZFASSUNG: Kunstharzgebundene Schleifwerkzeuge enthalten wertvolle Schleifkörner, deren Herstellung mit einem hohen Energie- und Ressourcenaufwand verbunden ist. Aufgrund der festen Einbettung in die Harzmatrix werden gebrauchte Werkzeuge bislang überwiegend deponiert oder lediglich minderwertig verwertet. Ziel der Tastversuche war die Identifikation geeigneter Trennverfahren zur sortenreinen Aufbereitung von Schleifkorngemischen aus dem Recycling kunstharzgebundener Schleifwerkzeuge. Hierzu wurden Dichtetrennung, elektrostatische Separation, Magnetscheidung und Flotation untersucht. Die Dichtetrennung erreichte bei den untersuchten Kornmischungen ein Wertstoffausbringen von über 70 % sowie Reinheiten von mindestens 95 % mit einer Ausnahme. Elektrostatische und magnetische Trennverfahren zeigten dagegen nur begrenzte Trenneffekte. Die Flotation erwies sich für hochreine Korundqualitäten als vielversprechend. Die Ergebnisse geben Hinweise auf das Potenzial einer sortenreinen Aufbereitung von Schleifkörnern und bilden die Grundlage für die Entwicklung wirtschaftlicher Verfahrenskonzepte zur werkstofflichen Rückführung mineralischer Schleifmittel.

1 EINLEITUNG

Kunstharzgebundene Schleifwerkzeuge enthalten in der Regel Mischungen unterschiedlicher Schleifkornarten, die gezielt an die Anforderungen des jeweiligen Schleifprozesses angepasst werden. Siliciumcarbid, Zirkonkorund und verschiedene andere Korunde kommen dabei zum Einsatz, deren unterschiedliche Härte-, Zähigkeits- und Verschleißeigenschaften das Einsatzverhalten der Werkzeuge maßgeblich beeinflussen. Während sprödere Kornarten wie Siliciumcarbid überwiegend Mikroverschleiß zeigen, weisen zähere Korunde eher Makroverschleiß auf. Darüber hinaus besitzen bestimmte Korundsorten, beispielsweise keramische oder zirkonhaltige Korunde, selbstschärfende Eigenschaften und ermöglichen dadurch eine verlängerte Standzeit im Schleifprozess.
Im Zuge eines Vorgängerprojektes der Universität Augsburg, gefördert durch die Forschungsgemeinschaft Schleifmittel e. V., wurde ein Verfahren entwickelt, das die Rückgewinnung von Schleifkörnern aus diesen Verbundwerkstoffen ermöglicht (Pentz, Lämmermaier, & Diller, 2024). Aufgrund der ursprünglich eingesetzten Kornmischungen liegen die Rezyklate jedoch als heterogene Gemische vor, wodurch eine direkte Rückführung in die Herstellung neuer Schleifwerkzeuge nicht sortenrein erfolgen kann. Für eine hochwertige werkstoffliche Verwertung ist daher eine sortenreine Aufbereitung der einzelnen Kornarten erforderlich.
Die besondere Herausforderung besteht darin, dass sich die verschiedenen Schleifkornarten teilweise nur geringfügig hinsichtlich ihrer trennrelevanten Eigenschaften unterscheiden. Während sich Korund, Siliciumcarbid und Zirkonkorund aufgrund ihrer unterschiedlichen Dichten grundsätzlich voneinander abgrenzen lassen, weisen einzelne Korunde, wie Normalkorund und Halbedelkorund sehr ähnliche Eigenschaften auf. Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist daher die Bewertung unterschiedlicher Trennverfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur sortenreinen Aufbereitung von Schleifkörnern. Hierzu werden Tastversuche zur Dichtetrennung (Schwimm-Sink-Trennung), Trennung mittels elektrischer Felder, Flotation sowie magnetische Trennverfahren untersucht und hinsichtlich Reinheit und Wertstoffausbringen bewertet. Damit ein Trennverfahren mit den Tastversuchen als erfolgreich angesehen werden kann, wurde ein Wertstoffausbringen von 70 % und eine Reinheit von mindestens 95 % definiert.

2 TRENNVERFAHREN ZUR SORTIERUNG DES RECYCELTEN SCHLEIFKORNS

Für die experimentellen Untersuchungen wurden verschiedene industriell eingesetzte Schleifkornarten ausgewählt und hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften charakterisiert. Die Bestimmung der Partikeldichte erfolgte im Zentrallabor des Instituts für Materials Resource Management der Universität Augsburg mittels Gaspyknometrie unter Verwendung eines AccuPyc II 1340 (Micromeritics). Die ermittelten Dichten sowie die untersuchten Schleifmittel und Korngrößen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.
Die betrachteten Korunde unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich ihres Aluminiumoxidgehalts. Normalkorund weist gemäß Literatur Al_2O_3-Gehalte von etwa 94 bis 98 % auf, während Halbedelkorund Gehalte zwischen 98 und 99 % erreicht. Einkristallkorund zeichnet sich durch eine Reinheit von 99,5 bis nahezu 100 % Al_2O_3 aus. Keramikkorund unterscheidet sich dagegen weniger durch seine chemische Zusammensetzung als vielmehr durch seine feinkristalline Mikrostruktur, welche maßgeblich für die spezifischen Verschleiß- und Selbstschärfungseigenschaften verantwortlich ist (CUMI AWUKO Abrasives GmbH, 2026).
Die Unterschiede in chemischer Reinheit, Mikrostruktur und Dichte stellen wesentliche materialtechnische Eigenschaften dar, die das Trennverhalten der einzelnen Korundsorten beeinflussen und somit als potenzielle Trennmerkmale für die sortenreine Aufbereitung von Schleifkornrezyklaten genutzt werden können.

Tab. 1: Schleifmittel für die Untersuchungen und deren Dichte sowie Korngröße.

Schleifmittel	Korngröße	Dichte, g/cm^3
Halbedelkorund (HEK)	F24	3,97
Halbedelkorund ummantelt (HEKumm)	F24	3,96
Keramikkorn (KerK)	F24	3,99
Siliciumcarbid (SiC)	F24	3,20
Zirkonkorund (Zk)	F24	4,58
Normalkorund ummantelt (Nkumm)	F20	3,93
Normalkorund ummantelt (Nkumm)	F46	3,94
Siliciumcarbid (SiC)	F46	3,19
Halbedelkorund (HEK)	F46	3,97
Keramikkorn (KerK)	F46	3,99
Einkristall (Ek)	F46	3,98
Keramikkorn (KerK)	P220	3,91
Halbedelkorund (HEK)	P220	3,96

2.1 Vorgehensweise bei der Auswahl und Hierarchie der Trennungsversuche

Zur Bewertung geeigneter Trennverfahren für die Schleifkornsorten wurden zunächst potenzielle physikalische Trennmerkmale der untersuchten Kornarten identifiziert. Aufgrund ihrer aufbereitungstechnischen Relevanz wurden Dichteunterschiede, elektrische und magnetische Eigenschaften sowie die Benetzbarkeit der Partikeloberflächen betrachtet. Die Dichtetrennung mittels Schwimm-Sink-Verfahren diente als erste Bewertungsstufe, da die Dichte ein wesentliches Merkmal für die stoffliche Separation darstellt. Für Kornarten mit geringen Dichteunterschieden wurden elektrostatische und magnetische Trennverfahren untersucht. Darüber hinaus wurde die Eignung der Schleifmittel für eine flotative Trennung anhand ihrer Benetzbarkeit bewertet. Die systematische Untersuchung der unterschiedlichen Trennprinzipien ermöglicht eine Bewertung ihres Potenzials zur sortenreinen Aufbereitung von Schleifkornsorten. Exemplarisch wird im Folgenden auf die Schwimm-Sink-Trennung eingegangen.

2.1.1 Dichtetrennung: Schwimm – Sink – Trennversuche

Die Auswahl der Schleifmittel für das Schwimm – Sink – Trennverfahren und die Körnung wurden anhand der Dichte und der zur Verfügung stehenden Körnungen ausgewählt (vgl. Tab. 1). Die Auswahl erfolgte, da SiC die geringste Dichte und Zk die höchste Dichte hatte und die

Korundsorte mit „Normalkorund ummantelt (Nkumm)“ als ausgewähltem Vertreter für die Korunde mit einer Dichte von 3,9 g/cm^3 dazwischen liegt. Dies hat den Hintergrund, dass aus einer Trennbarkeit von SiC und Zk von Nkumm folgt, dass auch die Dichtedifferenz zwischen SiC und Zk hinreichend hoch ist. Die Tastversuche wurden im Labormaßstab durchgeführt. Für die Untersuchungen wurden Mischungen der Schleifmittel Siliciumcarbid und Normalkorund ummantelt, in der Körnung F24 und F20 sowie F46 und F46 entsprechend hergestellt, sowie Zirkonkorund F24 und Normalkorund ummantelt F20. Insgesamt wurden sechs Proben/Mischungen hergestellt, wobei immer zwei Proben Schleifmittel aus denselben Materialien enthielten.
Die Durchführung der Trennversuche erfolgte mit einer Schwereflüssigkeit von TC-Tungsten Compounds SPT-4 für Dichten > 3,0 g/cm^3 mit einer Toleranz von 0,05 g/cm^3. Die Schwereflüssigkeit besteht aus Natriumpolywolframat und Wolframcarbid. Für die Proben 1, 2, 3, 4 wurde eine Schwereflüssigkeit für die Dichte 3,6 g/cm^3 gewählt und für die Proben 5 und 6 eine Schwereflüssigkeit für Dichten 4,3 g/cm^3.

Tab. 2: Einwaage der Schleifmittel für die jeweilige Versuche.

		Einwaage, g				
	Mischung aus	SiC F24	Nkumm F20	Zk F24	SiC F46	Nkumm F46
Versuch 1:	SiC F24, Nkumm F20	5,27	4,15			
Versuch 2:	SiC F24, Nkumm F20	4,02	4,33			
Versuch 3:	SiC F46, Nkumm F46				4,03	4,14
Versuch 4:	SiC F46, Nkumm F46				4,08	4,03
Versuch 5:	Zk F24, Nkumm F20		4,05	4,18		
Versuch 6:	Zk F24, Nkumm F20		4,20	4,30		

3 ERGEBNISSE DER DICHTETRENNUNG

Ziel war es mindestens 70% Wertstoffausbringen zu erreichen und wenn möglich eine Sortenreinheit von >95% in den jeweiligen Fraktionen zu erhalten. Das heißt für die untersuchten Mischungen der Proben 1-4, dass mindestens 70% der Einwaage von SiC sich im Schwimmgut befinden sollte und mindestens 70% von Nkumm sich in der Sinkschicht befinden sollte. Bestenfalls mit Verunreinigungen durch das jeweils andere Schleifmittel von weniger als 5%, bezogen auf das Gewicht. Weiterhin sollten sich mindestens 70 % von Zk bei den Proben 5 und 6 im Sinkgut befinden und 70% NKumm im Schwimmgut, wieder bestenfalls mit max. 5% Verunreinigung durch das jeweils andere Schleifmittel.
Das Schwimm- und Sinkgut der Proben 1, 2, 5 und 6 wurde mit dem digitalen Mikroskop VHX 7000 4K von Keyence analysiert. Das Sink- bzw. Schwimmgut der Proben wird in den Probenteller überführt und es werden die nicht gewünschten Körner der Schleifmittel markiert und automatisch ausgezählt. Für die Analyse mit dem Lichtmikroskop war die Körnung der Proben 3 und 4 zu klein und sie wurden deshalb mit dem Rasterelektronenmikroskop und einer anderen Methode ausgewertet.
Nach dem Auszählen unterm Lichtmikroskop werden die einzelnen Körner der nicht gewünschten Schleifmittel aus den Fraktionen sowie die Schleifmittel in den Fraktionen in Probenröhrchen überführt und danach mit der Feinwaage gewogen und mit folgenden Formeln berechnet:

$$\text{Wertstoffausbringen} = \frac{\text{Masse des Wertstoffes in der Zielfraktion}}{\text{Masse des Wertstoffes Input}} * 100\% \quad (1)$$

$$\text{Sortenreinheit} = \frac{\text{Masse des Wertstoffes in der Zielfraktion}}{\text{Masse der Zielfraktion}} * 100\% \quad (2)$$

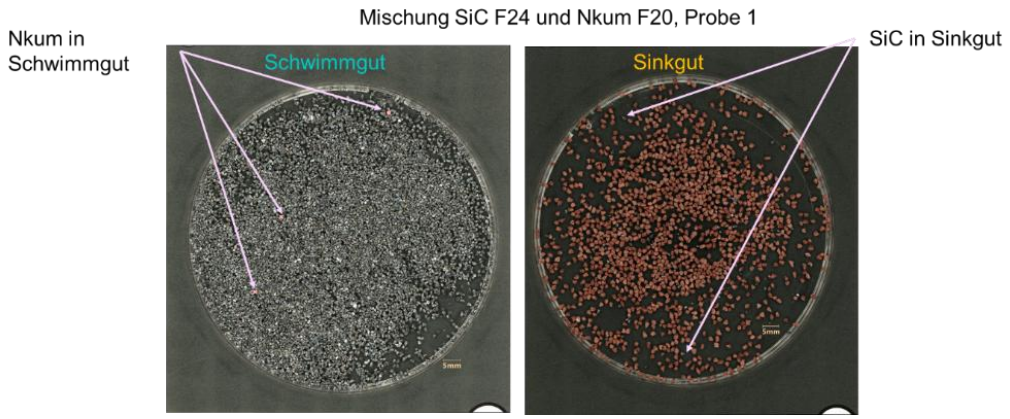


Abb. 1: Schwimmgut überwiegend SiC (links) und Sinkgut überwiegend Nkumm (rechts) der Probe 1, rosa markiert die Verunreinigung durch NKumm bzw. SiC.

Die Ergebnisse in Tabelle 3 zeigen, dass es im Labormaßstab möglich war ein Wertstoffausbringen von mehr als 70% bei allen Mischungen zu erreichen und die Sortenreinheit konnte in allen Fraktionen bis auf das Sinkgut der Probe 6 (mit nur 93% Sortenreinheit) erreicht werden. Auch bei den anderen beiden Proben, bei denen nicht ausgezählt werden konnte aufgrund der Körung, konnte in der Sinkfraktion keine SiC-Körner identifiziert werden.

Tab. 3: Wertstoffausbringen und Sortenreinheit der Versuche zur Dichtetrennung mit SiC F24, Nkum F20 und Zk F24.

		Wertstoffausbringen		Sortenreinheit	
		Schwimmgut	Sinkgut	Schwimmgut	Sinkgut
Versuch 1:	Mischung SiC F24, Nkumm F20	99 %	99 %	100 %	99 %
Versuch 2:	Mischung SiC F24, Nkumm F20	99 %	100 %	100 %	100 %
Versuch 5:	Mischung Zk F24, Nkumm F20	95 %	99 %	99 %	96 %
Versuch 6:	Mischung Zk F24, Nkumm F20	92 %	98 %	99 %	93 %

LITERATUR

CUMI AWUKO Abrasives GmbH (2025): „https://awuko.com/article_awuko_abrasives_technologies_grain.html“ besucht am 30.06.2026

Pentz, S.; Lämmermaier, L.; Vollprecht, D. (2024): Recycling kunstharzgebundener Schleifwerkzeuge. 13. DGAW-Wissenschaftskongress. S. 277 – 280.

KONTAKT

Dr. Claudia Maurer
claudia.maurer@uni-a.de
+49 821 598 69135
Universität Augsburg
Institut Material Resource Management
Lehrstuhl Resource and Chemical Engineering

Kreislaufwirtschaft in der Praxis am Beispiel des Lösemittelrecyclings in der Halbleiterindustrie

Roman Pöltner[1] & Jonathan Welte[2]
[1)] Infineon Technologies Austria AG, Business Continuity & Sustainability, Villach, Österreich
[2)] Infineon Technologies Austria AG, Environment and Safety, Villach, Österreich

KURZFASSUNG: Der Produktionsprozess von Halbleitern ist geprägt durch komplexe Prozesseschritte. Es benötigt hoch spezialisierte Fertigungsanlagen, ein Trägermedium, den sogenannten Wafer sowie viele weitere Materialien und Betriebsstoffe. Besonders wichtig sind hierbei hochreine Lösemittel. Sie sind für die Chipproduktion und die Bearbeitungsprozesse unerlässlich, vermeiden die Partikelkontamination und beeinflussen die Zuverlässigkeit von elektronischen Bauteilen. Im Sinne einer gezielten Kreislaufführung werden die Lösemittelabfälle nach ihrem Einsatz in spezifischen Produktionsprozessen gesammelt und einem fachgerechten Recycling zugeführt. Das recycelte Lösemittel substituiert damit Neuware und ist ein wertvoller Beitrag zur Ressourcenschonung.

1 EINLEITUNG

Die Herstellung moderner Halbleiter gehört zu den komplexesten industriellen Fertigungsverfahren. Hochreine Lösemittel sind dabei unverzichtbare Prozessmedien und kommen insbesondere in der Fotolithografie sowie in Reinigungs- und Strippingprozessen zum Einsatz. Im Gegensatz zu vielen anderen Industriebereichen wirken sich Verunreinigungen nicht nur auf den Prozess, sondern unmittelbar auf die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der gefertigten Bauelemente aus. Entsprechend werden Reinheiten von mindestens 99,999 % gefordert, während metallische Verunreinigungen im Sub-Mikrogramm-Bereich pro Liter liegen müssen.

2 MATERIAL- UND PROZESSGRUNDLAGEN

2.1 Prozessbereiche mit Lösemitteleinsatz

Die Verwendung von Lösemitteln am Standort Villach lässt sich innerhalb der Front-End-Halbleiterfertigung drei Prozessbereichen zuordnen.

Die Fototechnik stellt den lösemittelintensivsten Prozessbereich dar. Mithilfe fotolithografischer Verfahren werden Bauelement- und Leiterbahnstrukturen auf den Wafer übertragen. Vor dem Belacken wird die Waferoberfläche mit Lösemittel benetzt und anschließend mit lösemittelhaltigem Fotolack beschichtet.

Das nasschemische Ätzen umfasst Reinigungs-, Ätz-, Spül- und Trocknungsschritte unter Einsatz unterschiedlicher Chemikalien. Die Ätztechnik überträgt die in der Fototechnik erzeugten Lackstrukturen oder entfernt Schichten ganzflächig.

DieTeilereinigung ist kein direkter Fertigungsschritt am Wafer, sondern ein unterstützender Prozessbereich. Im Rahmen von Wartungsarbeiten werden Maschinenteile demontiert, gereinigt und wieder montiert. Lösemittel werden dabei ausschließlich für Anlagenteile aus dem Bereich der Fotolithografie eingesetzt.

3 STOFFSTRÖME IM KONTEXT DER VERSORGUNG/ENTSORGUNG

3.1 Interne Versorgungs- und Sammelsysteme

Am Standort Villach werden mehr als 100 Produktionsanlagen über zentrale Versorgungssysteme mit Frischlösemitteln aus Gebinden à 1.000 Liter beliefert. Die entstehenden Lösemittelabfälle werden über Sammelleitungssysteme fraktionsspezifisch in dedizierte Entsorgungsgebinde geleitet. Zur Vermeidung von Querkontaminationen und zur Gewährleistung einer lückenlosen Rückverfolgbarkeit wird ein geschlossener Gebindekreislauf betrieben. Dabei wird das Abfalllösemittel aus einem definierten Gebinde entnommen, beim Dienstleister aufbereitet und in denselben Behälter zurückgeführt. Dadurch kann auf unvorhergesehene Verunreinigungen einzelner Chargen gezielt reagiert werden, ohne andere Gebinde oder Fraktionen zu beeinträchtigen. Die hierfür erforderliche Infrastruktur ist technisch anspruchsvoll und auf eine konsequente Trennung der einzelnen Stoffströme ausgelegt. Prozessbedingt lassen sich geringe Restmengen anderer Lösemittel in einzelnen Fraktionen jedoch nicht vollständig ausschließen. Diese Quereinträge müssen bei der Auslegung des Recyclingprozesses berücksichtigt werden und stellen zusätzliche Anforderungen an Eingangskontrolle, Anlagenauslegung und Aufbereitung beim Recyclingdienstleister.

3.2 Recyclingfähige Lösemittelfraktionen

Im Geschäftsjahr 2024/25 wurden fünf sortenreine Lösemittelfraktionen an einen externen Dienstleister zur stofflichen Rückgewinnung übergeben. Ihre Recyclingfähigkeit ergibt sich vor allem aus einer günstigen destillativen Trennbarkeit, ausreichend hoher thermischer Stabilität sowie der Art der prozessbedingten Verunreinigungen.

Propylenglycolmethyletheracetat (PGMEA) ist das mengenmäßig bedeutendste Lösemittel und dient als Träger- und Prozesslösemittel für Fotoresist-Formulierungen. Aufgrund des niedrigen Wassergehalts, des fehlenden Azeotrops mit Wasser und eines Siedepunkts von 146 °C ist PGMEA destillativ gut handhabbar.

N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP) wird als aprotisches Stripping-Lösemittel zur Lackentfernung eingesetzt. Sein hoher Siedepunkt von 202 °C begünstigt die Abtrennung leichtsiedender Verunreinigungen.

Dimethylformamid (DMF) kommt in Reinigungsschritten zum Einsatz. Als aprotisches Lösemittel mit einem Siedepunkt von 153 °C lässt es sich ebenfalls gut destillativ aufbereiten.

Cyclopentanon (CP) wird für spezielle Resist-Formulierungen eingesetzt. Der Siedepunkt von 130 °C ermöglicht eine gute destillative Trennung, gleichzeitig ist das Lösemittel unter den Prozessbedingungen ausreichend thermisch stabil.

Butyldiglykol (BDG) wird als Spezialreiniger eingesetzt. Aufgrund seines hohen Siedepunkts von 230 °C lässt sich diese Fraktion sehr gut destillativ trennen.

3.3 Gesamtbilanz Recycling

Von insgesamt 848.254 kg übergebener Abfalllösemittel wurden 611.990 kg als Recyclat aufbereitet. Dies entspricht einer Gesamtrecyclingrate von 72 %.

Tab. 1: Aufstellung der spezifischen Recyclingraten.

Fraktion	Abfallmenge (kg)	Recyclat (kg)	Recyclingrate
PGMEA	246.588	161.263	65%
NMP	323.112	281.580	87%
DMF	123.444	66.082	54%
CP	150.374	98.372	65%
BDG	4.736	4.693	99%
Gesamt	848.254	611.990	72%

Die unterschiedlichen Recyclingraten spiegeln vor allem die Komplexität der jeweiligen Prozessverunreinigungen wider und sind nicht unmittelbar als Maß für die Qualität des Destillationsverfahrens zu interpretieren. Entscheidend ist die Erreichung der geforderten Halbleiterreinheit von 99,999 %. Zugleich markieren diese Ergebnisse die Grenze zwischen stofflich verwertbaren Fraktionen und jenen Stoffströmen, bei denen technische oder wirtschaftliche Hemmnisse eine Rückführung in den Produktionskreislauf verhindern.

4 VERSORGUNGSSICHERHEIT DURCH RECYCLING

Die in der Halbleiterfertigung eingesetzten Lösemittel sind keine Standardprodukte der chemischen Industrie, sondern halbleiterspezifische Sonderqualitäten mit Reinheitsanforderungen von 99,999 %. Diese Spezialqualitäten werden in der Regel nicht auf Vorrat produziert, sondern in geplanten Produktionskampagnen hergestellt und sind daher am Markt nicht kurzfristig verfügbar.
Durch das Lösemittelrecycling können wir den Anteil der benötigten Neuware reduzieren und dadurch einen Beitrag zu Kreislaufwirtschaft als auch zur Versorgungssicherheit des Standortes leisten.

5 GRENZEN DES LÖSEMITTELRECYCLINGS

Während die zuvor dargestellten Fraktionen unter definierten Bedingungen stofflich rückgewonnen werden können, bestehen für Isopropanol, Aceton und Fotolacke technische oder wirtschaftliche Grenzen des Recyclings. Diese Stoffströme werden daher vollständig der thermischen Verwertung zugeführt.

5.1 Isopropanol (IPA) – Trennproblem

Die Aufbereitung wird durch die Ausbildung eines Azeotrops mit Wasser begrenzt. Bei 87,7 Gewichtsprozent IPA und 80,3 °C ist eine weitere Trennung durch einfache Destillation nicht möglich. Die für den halbleiterspezifischen erhöhten Reinheitsgrad erforderlichen niedrigen Wassergehalte lassen sich damit nicht erreichen. Technische Alternativen wie Druckwechseldestillation, Pervaporation oder der Einsatz von Molekularsieben sind grundsätzlich verfügbar, jedoch deutlich aufwendiger und kostenintensiver als eine einfache Destillation. Der wirtschaftliche Vorteil des Recyclings geht dadurch verloren. IPA wird daher vollständig dem Lösemittelgemisch-Strom zur thermischen Verwertung zugeführt.

5.2 Aceton – Reaktivitätsproblem

Beim Kontakt mit prozessspezifischen Verunreinigungen aus der Chipfertigung können Folgeprodukte entstehen, deren Siedepunkte nahe am Siedepunkt von Aceton liegen und die sich destillativ nur schwer abtrennen lassen. Der erforderliche Aufbereitungsaufwand steht in keinem angemessenen wirtschaftlichen Verhältnis zur anfallenden Menge, zumal Aceton die kleinste Einzelfraktion darstellt. Zusätzlich erschweren für die Teilereinigung typische Verunreinigungen, insbesondere eingetrocknete Lackreste, eine stoffliche Aufbereitung.

5.3 Fotolacke – zu hoher Feststoffanteil

Fotolacke sind aufgrund ihres hohen Polymer- und Feststoffanteils nicht für ein lösemittelbasiertes Recycling geeignet. Eine strikte Trennung von Fotolackströmen und recyclingfähigen Lösemittelfraktionen ist daher erforderlich, um die Qualität der aufbereitbaren Stoffströme nicht zu beeinträchtigen.

5.4 Wasseranteil in der thermischen Verwertung

Eine besondere Herausforderung des Lösemittelgemisch-Stroms zur thermischen Verwertung stellt der erhöhte Wasseranteil dar. Ein erhöhter Wasseranteil reduziert den Heizwert des Gemisches und erschwert damit die thermische Nutzung.

Zur Begrenzung des Wasseranteils im Lösemittelstrom muss bereits an den Produktionsanlagen eine wirksame Trennung zwischen Lösemittel- und Abwasserstrom sichergestellt werden. Dies stellt sowohl an die technische Auslegung der Anlagen als auch an die Prozessführung im laufenden Betrieb hohe Anforderungen.

Die Analyse der nicht recyclingfähigen Stoffströme verdeutlicht, dass industrielle Kreislaufwirtschaft nur innerhalb technischer, chemischer und wirtschaftlicher Grenzen realisierbar ist. Daraus ergeben sich Anforderungen, die nicht allein den Produktionsstandort betreffen, sondern auch die Leistungsfähigkeit und Spezialisierung der eingebundenen Entsorgungsdienstleister erfordern.

6 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Das Beispiel des Lösemittelrecyclings am Standort Villach zeigt, dass Kreislaufwirtschaft in der Halbleiterindustrie technisch realisierbar und industriell relevant ist. Gleichzeitig stellt sie hohe Anforderungen an Reinheit, Prozessstabilität, Logistik und Qualitätssicherung. Die Rückgewinnung von 611.990 kg Recyclat aus 848.254 kg übergebenen Abfalllösemittel verdeutlicht das Potenzial zur Substitution von Neuware und zur Schonung von Ressourcen. Zugleich zeigen nicht recyclingfähige Fraktionen wie IPA, Aceton und Fotolacke, dass Kreislaufführung nicht allein von der Abfallmenge abhängt, sondern wesentlich durch chemisch-physikalische Eigenschaften, Verunreinigungsprofile und wirtschaftliche Rahmenbedingungen bestimmt wird. Für die weitere Entwicklung sind eine frühzeitige Abstimmung bei Prozessänderungen, robuste Liefer- und Recyclingketten sowie eine kontinuierliche Verbesserung der Stoffstromtrennung zentrale Erfolgsfaktoren.

LITERATURVERZEICHNIS

Der Beitrag stellt einen Praxisbericht aus der Front-End-Halbleiterfertigung der Infineon Technologies Austria AG dar. Die beschriebenen Prozessabläufe, Stoffströme und betrieblichen Zusammenhänge beruhen überwiegend auf dem Fachwissen und den praktischen Erfahrungen der Autoren sowie auf internen Auswertungen und Kennzahlen des Standorts. Stoffbezogene Angaben wurden durch öffentlich zugängliche Stoffdatenbanken sowie Sicherheitsdatenblätter verifiziert.

Der Weg zu einer CO_2-neutralen Zementklinkerproduktion: Vom Laborversuch bis hin zur industriellen Umsetzung

Wolfram Waldl[1], Cornelia Bauer[2], Florian Gomernik[3] & Helmut Flachberger[1]
[1)] Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Department Mineral Resources Engineering, Montanuniversität Leoben, Österreich
[2)] Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, Wien, Österreich
[3)] Alpacem Zement Austria GmbH, Klein St Paul, Österreich

KURZFASSUNG: Die europäische Zementindustrie steht aufgrund steigender CO_2-Kosten und strenger Umweltauflagen vor großen Herausforderungen. Im Rahmen der Roadmap 2050, der österreichischen Zementindustrie, wird daher der Einsatz alternativer Rohstoffe (ARMs) systematisch vorangetrieben. Hierfür wurde eine umfassende Rohstoffdatenbank aufgebaut und potenzielle Ersatzrohstoffe vom Labor- über den Pilot- bis in den Industriemaßstab entwickelt und validiert. Erstmals konnte ein CEM I 52,5 mit einem deutlich unter dem österreichischen Durchschnitt liegenden CO_2-Fußabdruck hergestellt werden, wobei der entwickelte Klinker bei hohen Substitutionsraten eine vergleichbare Leistungsfähigkeit zum Referenzklinker zeigt. Die Untersuchungen nach EN 197-1 sind derzeit noch nicht abgeschlossen. Als nächste Schritte sind zwei weitere industrielle Großversuche geplant: Zum einen die Herstellung eines Klinkers mit hohem Sulfatwiderstand (SR-Klinker) zur Erhöhung des Einsatzes von Konverterschlacke aus der Stahlindustrie, zum anderen die Herstellung eines konventionellen Portlandklinkers mit einem maximal möglichen Anteil alternativer Rohstoffe, um das technische und ökologische Potenzial des entwickelten Konzepts weiter auszuschöpfen.

1 EINLEITUNG

Die österreichische Zementindustrie (VÖZ) ist sich ihrer Verantwortung als bedeutender Verursacher von CO_2-Emissionen bewusst. In der im Jahr 2022 veröffentlichten Roadmap (Waldl & Papsch 2022) hat sich die VÖZ zum Ziel gesetzt, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen. Mit diesem Projekt sollen wesentliche Beiträge zur Erreichung der österreichischen Klimaziele geleistet, die Ressourceneffizienz gesteigert und damit die Versorgungssicherheit verbessert sowie die Kreislaufwirtschaft gestärkt werden. Darüber hinaus werden positive gesellschaftliche und wirtschaftliche Effekte erwartet, darunter der Erhalt von Arbeitsplätzen in der österreichischen Zementindustrie sowie in den mit ihr verbundenen Industriezweigen (Waldl & Papsch 2022, Mauschitz, 2025).

Die aktuelle Roadmap der VÖZ (Abb. 1) sieht unter anderem eine Reduktion der gesamten CO_2-Emissionen aus der Klinkerproduktion um 16 % bis zum Jahr 2050 vor. Dieses Ziel soll in erster Linie durch den Ersatz fossiler Brennstoffe durch grünen Wasserstoff oder vergleichbare CO_2-neutrale Energieträger erreicht werden. Vor dem Hintergrund des derzeitigen Stands der Technik ist jedoch kritisch zu hinterfragen, ob die künftig für die Klinkerproduktion benötigten über 10.000 Tonnen grüner Wasserstoff pro Jahr tatsächlich in ausreichender Menge verfügbar sein werden (Waldl & Papsch 2022). Aus diesem Grund erscheint es strategisch sinnvoll, die CO_2-Emissionen zusätzlich durch eine Erhöhung des Einsatzes alternativer Rohmaterialien (ARMs) mit geringem CO_2-Fußabdruck in der Rohmehlherstellung zu reduzieren.

Aufbauend auf den früheren Untersuchungen Waldl et al. (2025) sowie Waldl et al. (2026) werden in der vorliegenden Arbeit die entwickelten Konzepte aus Labor- und Pilotversuchen in den industriellen Maßstab überführt. Im Mittelpunkt steht die Bewertung ihrer Leistungsfähigkeit unter realen Betriebsbedingungen sowie die Erfassung der praktischen Auswirkungen einer

industriellen Umsetzung. Besonderes Augenmerk liegt auf der Identifikation maßstabsabhängiger Effekte und betrieblicher Herausforderungen, die erst im industriellen Betrieb auftreten.

Darüber hinaus werden Erkenntnisse aus erweiterten Industrieversuchen herangezogen, um das Prozessverständnis zu vertiefen, die Nutzung alternativer Rohmaterialien weiter zu optimieren sowie die Prozessstabilität und die Produktqualität unter kontinuierlichen Betriebsbedingungen zu bewerten.

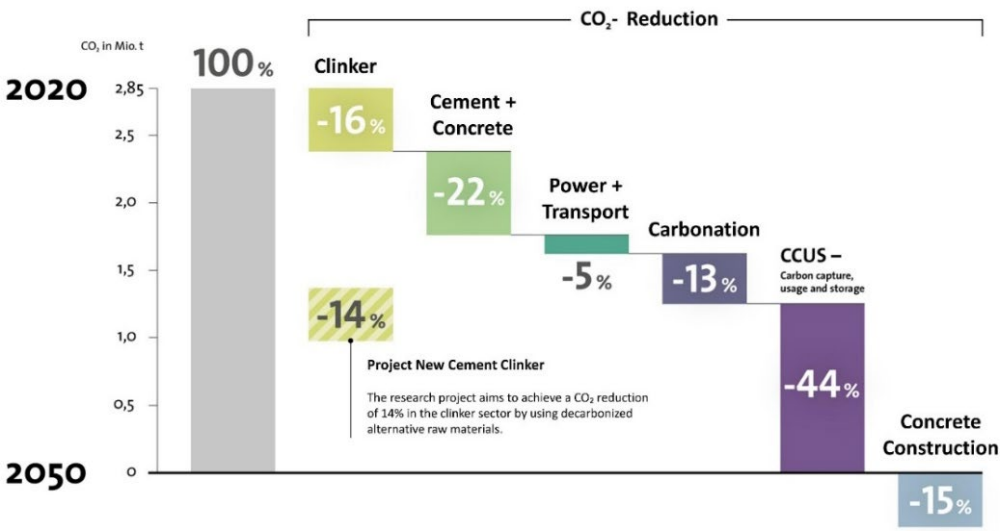


Abb. 1: Roadmap der österreichischen Zementindustrie zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2050, nach (Waldl et al. 2025)

2 VERSUCHSBESCHREIBUNG

2.1 Rohgutcharakterisierung

Die potenziellen Ersatzrohstoffe wurden aus ganz Österreich sowie aus angrenzenden Standorten in einem Umkreis von bis zu 500 km erhoben. Berücksichtigt wurden unter anderem Nebenprodukte der Metallgewinnung (Schlacken, Schlämme, Stäube), Rotschlamm, Aschen aus Müllverbrennungs-, Biomasse- und Klärschlammbehandlungsanlagen, Nebenprodukte der Papierindustrie, Materialien aus ehemaligen Kraftwerksdeponien, calciumreiche Altlasten (z. B. Altbetone aus dem Urban Mining), vulkanische Aschen sowie Calciumfällungsprodukte aus verschiedenen industriellen Prozessen. Insgesamt wurden 112 Stoffe hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eignung für die Klinkerherstellung analytisch charakterisiert. Die Erstbewertung fokussierte sich auf die chemische Hauptzusammensetzung und das daraus resultierende Potenzial zur Reduktion des rohstoffbedingten CO_2-Eintrags gegenüber konventionellem Kalkstein. Parallel wurden Verfügbarkeit, jährliche Mengen und Versorgungssicherheit berücksichtigt. Spurenelemente und weitere qualitätsrelevante Inhaltsstoffe wurden anschließend in Bezug auf ihre Auswirkungen auf Rohmehlmischung und Brennprozess bewertet, um CO_2-Reduktion, Prozessstabilität und Produktqualität in Einklang zu bringen.

2.2 Labor, Pilot und Industrieversuche

2.2.1 Laborversuche

Die Methodik der Laborversuche ist in Waldl et al. (2025) im Detail beschriebenen. Die Rohstoffkomponenten wurden zunächst separat gemahlen, homogenisiert und zu Presslingen definierter Geometrie und Masse verarbeitet. Die Brennversuche erfolgten im Muffelofen bis 1450 °C mit definierter Aufheizung, 30-minütiger Haltezeit und kontrollierter Abkühlung. Ein besonderer Fokus lag auf dem Einfluss der Feinheit der SiO_2-Träger auf die Brennbarkeit und Reaktionskinetik. Zusätzliche Mahlversuche in Stab- und Kugelmühlen erlaubten die Optimierung der Partikelgrößenverteilung und damit der Klinkerbildung. Auf Basis umfangreicher Brennversuche wurde die Temperaturführung an die thermodynamischen Bedingungen des $CaO–Al_2O_3–SiO_2–Fe_2O_3$-Systems angepasst: Aufheizen auf 1450 °C, 30 min Haltezeit, anschließend Abkühlung mit 5 °C/min bis knapp oberhalb des invarianten Punkts (~1335–1340 °C unter Luft), gefolgt von rascher Abkühlung zur Stabilisierung der gewünschten Mineralphasenverteilung. Dabei wurde berücksichtigt, dass Alkali- und Sulfatgehalte das relevante Temperaturfenster verschieben können. Als geeignete Basis für die weiteren Untersuchungen wurde eine optimierte Rohmehlrezeptur ausgewählt, die sich durch niedrige CO_2- und SO_3-Gehalte, hohe Anteile der klinkerrelevanten Phasen (C_2S, C_3S) sowie einen geringen MgO-Gehalt auszeichnete. Diese Zusammensetzung ließ eine stabile Mineralphasenbildung während des Brennprozesses sowie eine günstige Volumenstabilität des späteren Zements erwarten.

2.2.2 Pilotversuche

Aufbauend auf den Laborergebnissen wurden ausgewählte Rohmehlmischungen in einer Pilotanlage mit etwa 100 kg/h Kapazität in einem direkt gasbeheizten Drehrohrofen (7,2 m Länge, 0,4 m Durchmesser) gebrannt. Zur praxisnahen Durchführung wurde das Rohmehl in einer industriellen Mahlanlage hergestellt. Nach Funktionsprüfungen erfolgten systematische Brennversuche. Anschließend wurden die erzeugten Klinker röntgenografisch analysiert und mikroskopisch die Klinkerphasen bewertet. Insgesamt wurden im kontinuierlichen Betrieb rund 800 kg Klinker bei etwa 1500 °C produziert. Die Pilotversuche lieferten essenzielle Erkenntnisse zur Prozessführung und Klinkerqualität, bildeten jedoch industrielle Randbedingungen nur eingeschränkt ab (u. a. lediglich eine Zyklonstufe, Erdgas-Luft-Betrieb, kein Einsatz von Ersatzbrennstoffen und keine Materialkreisläufe). Mikrostruktur und Mineralogie wiesen auf prozessseitige Limitierungen hin: Der Klinker zeigte eine poröse, inhomogene Gefügestruktur, geringe Reaktivität, erhöhten Anteil an freiem CaO und eine Dominanz von Belit bei geringem Alit-Gehalt. Dies deutet auf unzureichende Brenntemperatur und/oder Verweilzeit hin. Zusätzlich beeinflussten eisenreiche Ersatzrohstoffe die Phasenbildung während des Sinterprozesses.

2.2.3 Industrieversuche

Aussichtsreiche Labor- und Pilotrezepturen wurden zur Validierung in den industriellen Maßstab überführt. In iterativen Kampagnen wurden qualitative, verfahrenstechnische und emissionsrelevante Zielgrößen adressiert und bei Abweichungen Rezeptur und Prozessparameter angepasst. Insgesamt wurden etwa 2000 t Klinker produziert, von denen rund 500 t den Anforderungen an einen CO_2-reduzierten Öko-Klinker entsprachen; außerhalb des Zielbereichs liegende Mengen resultierten überwiegend aus Einfahr- und Umstellphasen. Aus dem Versuchsklinker wurde unter Werksbedingungen CEM I (Portlandzement) sowie darauf aufbauend CEM II/C (Portlandkompositzement mit reduziertem Klinkeranteil) hergestellt und umfassend charakterisiert (u. a. Mahlfeinheit, SO_3-Gehalt, Hauptbestandteile, Sulfatträger, Chromatreduzierer, Mahlhilfsmittel). Der Zement wurde abgepackt und für weiterführende Betonuntersuchungen bereitgestellt.

3 ERGEBNISSE

Die priorisierte Zielgröße war die Reduktion des rohstoff- und prozessbedingten CO_2-Fußabdrucks bei gesicherter Verfügbarkeit geeigneter Materialströme und ohne Beeinträchtigung der Prozessstabilität. Die optimierte Laborbrandführung bestätigte ausreichende Flüssigphasenbildung und C_3S-Entstehung. Trotzdem zeigte der Pilotmaßstab Grenzen bei der Erreichung eines stabilen, ausreichend C_3S-reichen Klinkers. Im industriellen Maßstab konnten spezifische prozessbedingte Emissionen von etwa 355 kg CO_2, fossil pro Tonne Klinker erzielt werden. Gegenüber dem österreichischen Durchschnitt des Jahres 2024 (493 kg CO_2, fossil/t) (Mauschitz 2025) entspricht dies einer Reduktion um circa 30 %. Die Emissionen im Werk wichen beim Einsatz des ARM-Mixes nur moderat vom langjährigen Regelbetrieb ab. Im Zementvergleich zeigte der auf dem neuen Klinker basierende CEM I weitgehend übereinstimmende Eigenschaften mit dem Referenzzement. Die Druckfestigkeiten des Referenzzements lagen tendenziell etwas höher und stiegen erwartungsgemäß mit der Expositionsklasse.

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Pilotversuche sind zur Technologieentwicklung wertvoll, ersetzen jedoch Großversuche nicht. Trotz erheblichen Aufwands konnte im Pilotdrehrohrofen innerhalb zweier Versuchstage kein stabiler, ausreichend C_3S-reicher Klinker erzeugt werden. Zwar zeigte der Pilotklinker eine deutliche Festigkeitsentwicklung, erfüllte aber die geltenden Normanforderungen nicht. Die Beschränkungen des Pilotmaßstabs (eine Zyklonstufe, Erdgas-Luft-Betrieb, kein Einsatz von Ersatzbrennstoffen, keine Materialkreisläufe) limitieren die Übertragbarkeit auf den Regelbetrieb. Daher wurde der Schwerpunkt im weiteren Projektverlauf auf Großversuche mit begleitenden Laboruntersuchungen gelegt. Für das nachhaltige Erreichen hoher Ersatzrohstoffraten empfiehlt sich eine schrittweise Erhöhung, da Ofenführung und Brennbedingungen signifikant von konventionellen Fahrweisen abweichen. Ein wesentlicher Erfolg des Vorhabens ist die Erzeugung eines Klinkers mit spezifischen prozessbedingten Emissionen von 355 kg CO_2, fossil/t und damit rund 30 % unter dem aktuellen österreichischen Durchschnitt. Die laufenden Mörtel- und Betonuntersuchungen (mechanische Kennwerte, Dauerhaftigkeit, mikrostrukturelle Analysen) werden nach Abschluss der erforderlichen Aushärtungs- und Prüfzeiträume berichtet. Die vollständige Auswertung der Industrieversuche erfolgt in nachfolgenden Publikationen.

LITERATURVERZEICHNIS

Mauschitz, G. (2025). Emissionen aus ANlagen der österreichischen Zementindustrie, Jährliche Ausgabe Berichtsjahr 2024. Wien: Technische Universität Wien.

Waldl, G., & Papsch, F. (2022). Roadmap zur CO2-Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050. Berg Huettenmaenn Monatsh 167, S. 342-348.

Waldl, W., Bauer, C., & Flachberger, H. (2025). Ressourcen- und CO2-optimierte Herstellung inno-vativer Zementklinker. Berg Huettenmaenn Monatsh 170, S. 323-329.

Waldl, W., Bauer, C., F., G., & Flachberger, H. (2026). Ressourcen- und CO2-optimierte Herstellung innovativer Zementklinker – Zwischenbericht zum von der FFG geförderten Branchenprojekt der österreichischen Zementindustrie. Berg Huettenmaenn Monatsh 171, S. 330-337.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Wolfram Waldl
wolfram.waldl@unileoben.ac.at
+43 3842 402 1819
Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung/Department Mineral Resources Engineering
Montanuniversität Leoben
https://aufbereitung.unileoben.ac.at

Verwertung von MVA-Rostasche in Betonanwendungen

Gisela Weibel[1], Alexander Weh[1], Philipp Hänggi[1] & Patrick Kämpfer[1]
[1)] Universität Bern, Fachstelle Sekundärrohstoffe, Bern, Schweiz

KURZFASSUNG: Die thermische Verwertung von Siedlungsabfällen erzeugt in der Schweiz jährlich rund 700.000 t MVA-Rostasche. Während Metalle heute weitgehend zurückgewonnen werden, wird die mineralische Fraktion überwiegend deponiert. Ziel dieser Studie ist die Bewertung unterschiedlich aufbereiteter Schweizer MVA-Rostaschen als alternative Gesteinskörnung für Betonfertigteile. In Vorversuchen wurden verschiedene Aufbereitungsverfahren hinsichtlich materialtechnischer und umweltrelevanter Eigenschaften untersucht. Gewaschene und mineralisch optimierte Fraktionen zeigten gegenüber konventionell aufbereiteten Rostaschen verbesserte Eigenschaften und erreichten Betoneigenschaften, die mit hochwertigen Recyclingbetonen vergleichbar sind. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für laufende Großversuche zur Bewertung der technischen Eignung, Umweltverträglichkeit und Kreislauffähigkeit.

1 EINFÜHRUNG

Die nachhaltige Nutzung mineralischer Ressourcen gehört zu den zentralen Herausforderungen des Bauwesens. Gleichzeitig entstehen bei der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen in der Schweiz jährlich große Mengen MVA-Rostasche, deren mineralische Fraktion bislang überwiegend deponiert wird. Obwohl sich die Aufbereitung in den vergangenen Jahren wesentlich auf die Rückgewinnung wertvoller Metalle konzentrierte, rückt zunehmend die stoffliche Nutzung der verbleibenden mineralischen Bestandteile in den Fokus. Eine hochwertige Verwertung könnte sowohl den Verbrauch natürlicher Gesteinskörnungen als auch den Bedarf an Deponieraum reduzieren und damit einen wichtigen Beitrag zur Ressourceneffizienz leisten. Der Einsatz von MVA-Rostasche als Gesteinskörnung stellt jedoch hohe Anforderungen an die Materialqualität.

Ziel der Studie ist die Untersuchung unterschiedlicher Aufbereitungsverfahren für MVA-Rostasche und deren Einfluss auf die Eigenschaften von Betonfertigteilen. Das Projekt gliedert sich in Vorversuche und Großversuche. Während die Vorversuche bereits abgeschlossen sind und die Grundlage für die Auswahl geeigneter Rostaschenfraktionen sowie die Festlegung der Qualitätskriterien bildeten, werden die Großversuche derzeit gemeinsam mit Industriepartnern und Behörden durchgeführt. Ihr Abschluss ist für Herbst 2026 vorgesehen.

2 MATERIALIEN UND METHODEN

Für die Vorversuche wurden verschiedene Schweizer MVA-Rostaschen eingesetzt. Die untersuchten Materialien unterschieden sich hinsichtlich Austragssystem, Aufbereitungstechnologie und Korngrößenbereich. Neben konventionell trocken aufbereiteten Rostaschen wurden insbesondere nass aufbereitete sowie sensorisch sortierte Fraktionen untersucht, deren Aufbereitung gezielt auf eine Verbesserung der mineralischen Qualität ausgerichtet war (Tab. 1).

Tab. 1: Übersicht der in den Vorversuchen untersuchten MVA-Rostaschefraktionen mit Angaben zu Austragssystem, Aufbereitungsverfahren und Prozessschwerpunkt.

MVA-Rostaschen	Austrag & Aufbereitungstyp	Prozesstypus
Kiesersatz 8-16 mm		
M03	Trockenaustrag und Trockenaufbereitung	Fokus Metallrückgewinnung und Deponierung
M04	Trockenaustrag und Trockenaufbereitung, Sensorsortierung (Abtrennung dunkle, poröse Partikel aus M03)	Fokus Aufbereitung Mineralik für eine Verwertung
M05	Nassaustrag und Nassaufbereitung	Fokus Aufbereitung Mineralik für eine Verwertung
Kiesersatz 4-8 mm		
M02	Trockenaustrag und Trockenaufbereitung	Fokus Metallrückgewinnung und Deponierung
M06	Nassaustrag und Trockenaufbereitung	Fokus Metallrückgewinnung und Deponierung
M08	Nassaustrag und Nassaufbereitung (Technikumsprobe)	Fokus Aufbereitung Mineralik für eine Verwertung
Sandersatz 0-2 mm		
M07	Nassaustrag und Nassaufbereitung (Technikumsprobe)	Fokus Aufbereitung Mineralik für eine Verwertung

Die Charakterisierung der Gesteinskörnungen erfolgte in Anlehnung an die Anforderungen der SN EN 12620. Hierzu wurden Kornverteilung, Kornform, Kornrohdichte, Wasseraufnahme sowie die Abriebfestigkeit bestimmt. Ergänzend wurden Verunreinigungen wie Glas-, Keramik- und Metallanteile sowie chemische Kennwerte, darunter Gesamtschwefel, elementares Aluminium, wasserlösliche Chlorid- und Sulfatgehalte sowie die Leitfähigkeit des Eluats untersucht. Diese Parameter dienten der Bewertung der Eignung der unterschiedlichen Aufbereitungsverfahren für die geplanten Großversuche.

Für die betontechnologischen Untersuchungen wurden im Umfang der Vorversuche Laborbetone hergestellt. Dabei wurden definierte Anteile natürlicher Gesteinskörnungen durch aufbereitete MVA-Rostasche ersetzt. Die Untersuchungen umfassten Frischbetoneigenschaften wie Konsistenz, Luftporengehalt, Rohdichte und Wasser-Zement-Wert sowie Festbetonprüfungen hinsichtlich Druckfestigkeit, Frost-Tausalz-Widerstand, Chloridwiderstand und Wasseraufnahme.

3 RESULTATE UND DISKUSSION

3.1 Vorversuche

Die Vorversuche zeigen, dass sämtliche untersuchten MVA-Rostaschen eine deutlich höhere Wasseraufnahme als natürliche Gesteinskörnungen aufweisen. Ursache hierfür ist die ausgeprägte Porosität der mineralischen Partikel. Ohne ausreichende Vornässung entzieht die Rostasche dem Frischbeton während des Mischvorgangs Wasser, wodurch sich die Verarbeitbarkeit verschlechtert und lokal ein unzureichender Hydratationsverlauf entstehen kann. In den Laborversuchen führte dies bei nicht vorgenässten Rostaschen zu Rissbildungen in den

Betonprodukten. Ein weiterer wesentlicher Parameter war die Kornstabilität der mineralischen Fraktionen. Die Los-Angeles-Versuche ergaben höhere Abriebwerte als bei natürlichen Gesteinskörnungen, was auf die poröse Mikrostruktur der Rostasche zurückzuführen ist. Gleichzeitig zeigte sich jedoch, dass die Kornstabilität in engem Zusammenhang mit dem Aufbereitungsverfahren steht. Nass aufbereitete beziehungsweise intensiv gewaschene Fraktionen wiesen eine homogenere Kornstruktur auf und verhielten sich im Beton deutlich günstiger als trocken aufbereitete Vergleichsproben.

Neben den mechanischen Eigenschaften wurden umfangreiche chemische Untersuchungen durchgeführt. Insbesondere die elektrische Leitfähigkeit des Eluats sowie der Gesamtschwefelgehalt erwiesen sich als geeignete Indikatoren zur Bewertung der Aufbereitungsqualität (Abb. 1). Gewaschene Rostaschen (blau) zeigten deutlich reduzierte Konzentrationen löslicher Bestandteile als konventionell aufbereitete Materialien (grün).

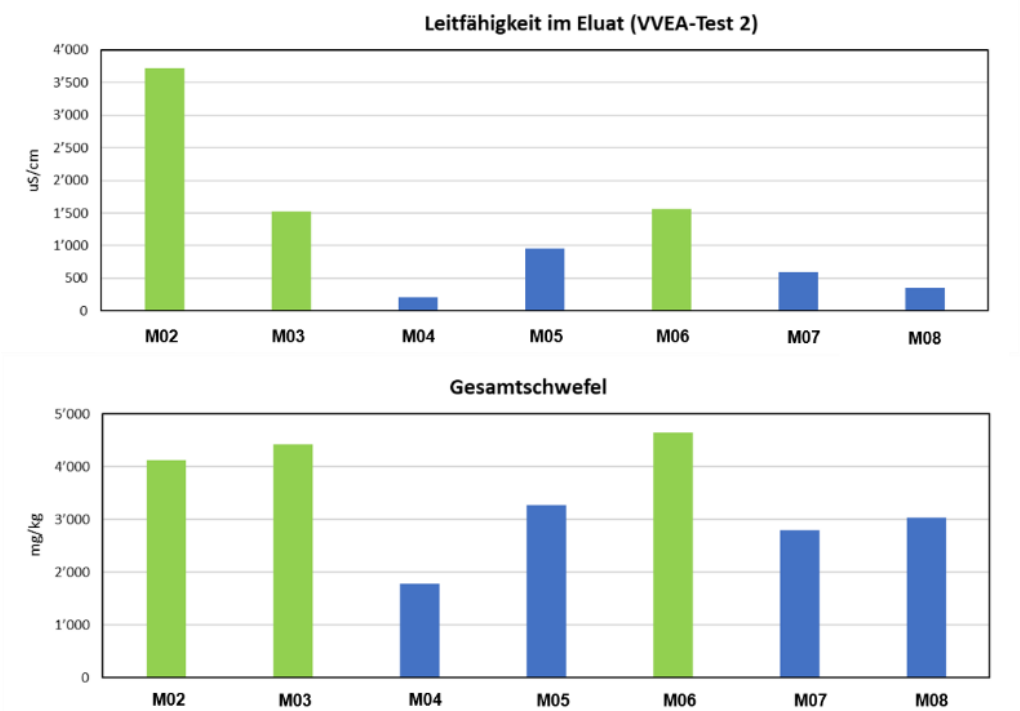


Abb. 1: Leitfähigkeit im Eluat und Gesamtschwefelgehalt der in den Vorversuchen untersuchten MVA-Rostaschen. Blau kennzeichnet gewaschene bzw. mineralisch optimierte Fraktionen, grün konventionell aufbereitete Rostaschen mit Fokus auf Metallrückgewinnung und Deponierung.

Die betontechnologischen Untersuchungen zeigen insgesamt ein positives Bild. Betone mit gewaschenen Rostaschen erreichten Frisch- und Festbetoneigenschaften, die mit hochwertigen Recyclingbetonen vergleichbar sind. Besonders auffällig war, dass Glas- und Keramikanteile innerhalb der untersuchten Konzentrationen keinen maßgebenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften ausübten. Deutlich stärker wirkten sich dagegen Porosität und Wasseraufnahme der Rostaschen auf Festigkeit und Dauerhaftigkeit aus. Daraus ergibt sich, dass zukünftige Optimierungen vor allem auf eine Verbesserung der Kornstruktur und eine Verringerung der offenen Porosität abzielen sollten. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse der Vorversuche, dass ein teilweiser Ersatz natürlicher Gesteinskörnungen im Bereich von etwa 10 bis 20 Gew.% für ausgewählte

Betonfertigteile technisch realisierbar erscheint, sofern geeignete Qualitätsanforderungen eingehalten werden.

3.2 Großversuche

Ziel der Großversuche bei einem national tätigen Betonproduzenten ist die Untersuchung des Einflusses der MVA-Rostasche auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie auf die Umweltverträglichkeit der hergestellten Bauteile unter praxisnahen Produktionsbedingungen. Basierend auf den Resultaten der Vorversuche wurden als Versuchskörper ein Betonrohr im Drycast-Verfahren (erdfeuchter Beton) sowie ein Betonblock im Wetcast-Verfahren (selbstverdichtender Beton) ausgewählt. Beide Produkte zeichnen sich durch vergleichsweise geringe Anforderungen an den mechanischen Widerstand sowie den Frost-Tausalz-Widerstand aus und eignen sich daher besonders für die Erprobung von MVA-Rostasche als alternative Gesteinskörnung. Die Großversuche werden aktuell durchgeführt und für beide Betonprodukte wird die natürliche Gesteinskörnung durch aufbereitete MVA-Rostasche mit Substitutionsraten von 10 bzw. 20 Gew.% ersetzt. Zusätzlich werden Referenzbetone ohne Rostaschenzugabe hergestellt, um den Einfluss der Substitution auf die Frisch-, Festbeton- und Produkteigenschaften beurteilen zu können.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Vorversuche wurden projektspezifische chemische Qualitätskriterien für die Großversuche definiert. Die Gesamtmetallgehalte der einzusetzenden MVA-Rostaschen müssen die in Tab. 2 aufgeführten Zielwerte einhalten. Neben den Gesamtmetallgehalten wurden Parameter zur Beurteilung der Wirksamkeit des Waschprozesses definiert. Der Gesamtschwefelgehalt der Rostasche darf 3.500 mg/kg nicht überschreiten. Zusätzlich wurde die elektrische Leitfähigkeit des Eluats als Indikator für verbleibende lösliche Bestandteile bestimmt. Hierfür wurde der VVEA-Test 2 (Flüssig-Feststoff-Verhältnis 10:1, Schütteldauer 24 h, Filtration über 0,45 µm gemäß BAFU 2016) angewendet. Die Leitfähigkeit des Eluats der MVA-Rostaschen darf für die Großversuche 1.200 µS/cm nicht überschreiten (Tab. 2). Die Einhaltung dieser Qualitätskriterien stellt sicher, dass ausschließlich Rostaschen mit ausreichender materialtechnischer und umweltrelevanter Qualität in den Großversuchen eingesetzt werden.

Tab. 2: Zielwerte der Gesamtmetallgehalte (analog Vorversuche nach HF-Aufschluss) und Qualitätskriterien zur Beurteilung der Wäsche für die im Projekt eingesetzten MVA-Rostaschen.

Gesamtmetallgehalte

Element	Zielwert (mg/kg)
Antimon (Sb)	<150
Arsen (As)	<30
Blei (Pb)	<2.000
Cadmium (Cd)	<5
Chrom (Cr)	<1.000
Cobalt (Co)	<250
Kupfer (Cu)	<6.000
Nickel (Ni)	<500
Zink (Zn)	<4.000
Zinn (Sn)	<500
Thallium (Tl)	<3

Parameter zur Beurteilung der Wäsche

Parameter	Zielwert
Gesamtschwefel in der Rostasche	<3.500 mg/kg
Leitfähigkeit im Eluat gemäß VVEA Test 2	<1.200 µS/cm

Die hergestellten Betonmischungen innerhalb der Großversuche werden umfassend charakterisiert. Neben den Frischbetoneigenschaften (Setzfließmaß, Rohdichte, Luftgehalt, Temperaturen und Wasser-Zement-Gehalt) werden die mechanischen Eigenschaften des Festbetons, einschließlich Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit sowie Frost-Tausalz-Widerstand, untersucht. Ergänzend erfolgen produktspezifische Prüfungen wie Wasseraufnahme, Tragfähigkeit bzw. Scheiteldruckfestigkeit sowie mikroskopische Untersuchungen der Grenzfläche zwischen Rostaschekorn und Zementmatrix.

3.3 Beurteilung der Umweltverträglichkeit und der Rezyklierfähigkeit

Die Umweltverträglichkeit der großtechnisch hergestellten Betone wird im weiteren Projektverlauf mittels dynamischer Auslaugversuche unter praxisnahen Bedingungen bewertet. Ziel ist es, den Einfluss unterschiedlicher Aufbereitungsverfahren auf das Freisetzungsverhalten relevanter Stoffe sowie die langfristige Umweltverträglichkeit von Betonprodukten mit MVA-Rostasche zu untersuchen. Zur Simulation von Niederschlagsabflüssen an Fassaden sowie von Wechselwirkungen zwischen Betonbauteilen und Grundwasser wird die dynamische Oberflächenauslaugprüfung nach DIN EN 16637-2 durchgeführt. Hierfür werden Betonprüfkörper vollständig in Wasser eingetaucht. Während einer Prüfdauer von 64 Tagen werden acht aufeinanderfolgende Eluatfraktionen gewonnen und nach jedem Probenahmeintervall das Elutionsmedium vollständig erneuert. Dieses Verfahren ermöglicht die zeitaufgelöste Erfassung der Stofffreisetzung unter standardisierten Randbedingungen. Ergänzend wird ein dynamischer IMC-Leaching-Test durchgeführt, der eine realitätsnahe Simulation kontinuierlich abfließenden Wassers an geneigten Betonoberflächen ermöglicht. Hierbei werden Prüfkörper unter einer Neigung von 60° geprüft. Das Wasser wird mit einer konstanten Umlaufmenge von 370 L/h im Kreislauf geführt und über einen Zeitraum von acht Monaten regelmäßig beprobt.

Darüber hinaus wird die Recyclingfähigkeit der hergestellten Betone im Rahmen eines Mehrfachrecyclingkonzepts untersucht. Ziel ist es, zu bewerten, ob Betone mit MVA-Rostasche nach dem Rückbau erneut als Recyclinggesteinskörnung eingesetzt werden können und damit die Grundlage für einen geschlossenen mineralischen Stoffkreislauf schaffen. Die Untersuchungen sollen einen Beitrag zur langfristigen Bewertung der Kreislauffähigkeit von Betonprodukten mit MVA-Rostasche leisten und deren Potenzial für eine mehrfache stoffliche Nutzung aufzeigen. Zur Einordnung der Ergebnisse werden sowohl ein Referenzbeton aus Primärrohstoffen als auch Betone mit konventionellem Betongranulat (RC-C) als Vergleichssysteme berücksichtigt. Das Versuchsprogramm umfasst zwei aufeinanderfolgende Recyclinggenerationen. Während die erste Generation aus Primärrohstoffen bzw. 20 Gew.% MVA-Rostasche und Betongranulat hergestellt wird, dient der daraus gewonnene Betonbruch als Gesteinskörnung für die jeweils folgende Generation.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Vorversuche zeigen, dass die Aufbereitung einen entscheidenden Einfluss auf die Eignung von MVA-Rostasche als alternative Gesteinskörnung besitzt. Insbesondere gewaschene und mineralisch optimierte Fraktionen weisen geringere Gehalte löslicher Bestandteile, eine homogenere Kornstruktur und günstigere betontechnologische Eigenschaften auf als konventionell aufbereitete Rostaschen. Für eine hochwertige Verwertung sind neben chemischen Grenzwerten insbesondere Wasseraufnahme, Porosität und Kornstabilität maßgebend. Die laufenden Großversuche sollen die Praxistauglichkeit unter industriellen Produktionsbedingungen bestätigen sowie Erkenntnisse zur Umweltverträglichkeit und zur Recyclingfähigkeit liefern. Damit werden wichtige Grundlagen für den zukünftigen Einsatz von MVA-Rostasche als Sekundärrohstoff im Betonbau geschaffen.

LITERATURVERZEICHNIS

BAFU (2016). *Methoden zur Untersuchung von Abfällen. Vollzugshilfe zur Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA).* Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.

DIN EN 16637-2 (2016). Bauprodukte – Bewertung der Freisetzung gefährlicher Stoffe – Teil 2: Dynamische Oberflächenauslaugprüfung. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin.

SN EN 12620 (2008). Gesteinskörnungen für Beton. Schweizerische Norm (SN EN), Schweizerische Normen-Vereinigung (SNV), Winterthur.

KONTAKT

Dr. phil. nat. Gisela Weibel
gisela.weibel@unibe.ch
M +41 79 588 61 80 | T +41 31 684 89 53

Fachstelle Sekundärrohstoffe
Universität Bern, Schweiz
www.fachstelle-sekundaerrohstoffe.unibe.ch

Innovative Bindemittelkomponenten in Beton – Auswirkungen von thermochemisch aufbereiteten Mineralwolleabfällen auf Festigkeiten und Dauerhaftigkeiten

Sarah Steiner[1], Anna Krammer[2], Gerold Schnedl[3], Klaus Doschek-Held[2], Martin Billes[4] & Theresa Sattler[4]

1) Technische Universität Graz, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, Graz, Österreich
2) Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Leoben, Österreich
3) Holcim CTEC GmbH
4) Rohrdorfer Umwelttechnik GmbH

KURZFASSUNG: Das ab 2027 geltende Deponierungsverbot für Mineralwolleabfälle und die künftig sinkende Verfügbarkeit von Hüttensand erfordern neue Verwertungswege und alternative Zementhauptbestandteile. In den vorliegenden Untersuchungen wurden Mineralwolleabfälle in einem Lichtbogenofen (LbO) sowie einem Induktions-Tiegelofen (ITO) zu glasigen, hüttensandähnlichen Schlacken aufbereitet. Nach der chemisch-mineralogischen Charakterisierung und Bewertung der hydraulischen Reaktivität kamen diese als Hüttensandersatz in CEM II/B-M (S-LL)- und CEM II/C-M (S-LL)-Zementen zum Einsatz. Die LbO-Schlacken erreichten Aktivitätsindizes von 112 bis 125 und führten bei den hergestellten Betonen zu den höchsten 28-Tage-Druckfestigkeiten sowie überwiegend gleichwertigen oder verbesserten Frost- und Karbonatisierungswiderständen gegenüber den Betonproben aus hüttensandhaltigen Referenzzementen. Die weniger basischen ITO-Schlacken zeigten eine geringere Reaktivität, jedoch teilweise Vorteile beim Chloridwiderstand. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse das Potenzial thermochemisch aufbereiteter Mineralwolleabfälle als alternative Zementhauptbestandteile.

1 EINLEITUNG

Väntsi und Kärki (2014) prognostizierten für Europa für das Jahr 2020 ein Mineralwolleabfallaufkommen von rund 2,55 Mio. Tonnen. Obwohl dieser Stoffstrom im Vergleich zu anderen mineralischen Bauabfällen mengenmäßig geringer ausfällt, besitzt er doch eine hohe abfallwirtschaftliche Relevanz. Mineralwolleabfälle aus dem Rückbau von Gebäuden werden aufgrund ihrer häufig unbekannten Herkunft sowie des aufwändigen Nachweises der Nichtgefährlichkeit vielfach als gefährliche Abfälle eingestuft und dem gefahrenrelevanten Merkmal HP7 („karzinogen“) zugeordnet. Darüber hinaus stellen Mineralfasern bei der Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen einen Störstoff dar und müssen gemäß der Recycling-Baustoffverordnung im Zuge eines recyclingorientierten Rückbaus getrennt erfasst werden. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der Novellierung der Deponieverordnung ein Deponierungsverbot von künstlichen Mineralfasern (KMF) ab 2027 verankert (Bundeskanzleramt 2021). Dadurch entsteht ein dringender Bedarf an technisch und wirtschaftlich tragfähigen Verwertungswegen für diesen bislang überwiegend deponierten Abfallstrom.Gleichzeitig steigt seitens der Zementindustrie die Nachfrage nach geeigneten, alternativen Zementzumahlstoffen. Aktuell ist in Österreich Hüttensand, ein latent-hydraulisches Nebenprodukt der Roheisengewinnung, eine der meistverwendeten Bindemittelkomponenten und kann bis zu 95% des Zementklinkers ersetzen (ÖNORM EN 197-1). Dies ist insofern von Bedeutung, da durch eine Substitution des CO_2-intensiven Portlandzementklinkers durch andere Bindemittelkomponenten die Umwelteinwirkungen von Zement und Beton deutlich verringert werden können. Jedoch wird es, durch das Bestreben der Stahlindustrie, einen klimafreundlicheren Produktionsweg weg von der klassischen Hochofenroute hin zu Direktreduktions- und Elektrostahlverfahren zu etablieren (IEA 2020), künftig zu stark reduzierten Verfügbarkeiten von Hüttensand kommen (Scrivener et al. 2018). Durch eine gezielte thermochemische

Aufbereitung lassen sich Reststoffe wie künstliche Mineralfasern und metallurgische Nebenprodukte zu reaktiven, hüttensandähnlichen Schlacken verarbeiten (Doschek-Held et al. 2024, Krammer et al. 2024). Das Verfahren bietet somit eine Möglichkeit, Mineralwolleabfälle als Sekundärrohstoffe für die Zementindustrie zu nutzen. Für diesen Beitrag wurden entsprechend behandelte KMF-Mischungen im Technikumsmaßstab hergestellt und als Hüttensandersatz in CEM-II/B- und CEM-II/C-Zementen eingesetzt. Anschließend wurden die Festigkeitsentwicklung und Dauerhaftigkeit der Betone untersucht, insbesondere der Frost-, Karbonatisierungs- und Chloridwiderstand.

2 MATERIAL UND METHODIK

2.1 Upscaling der Laborversuche auf den Betrieb im Technikumsmaßstab.

Die Prozessparameter für die Upscaling-Versuche bauen auf Vorarbeiten aus den Projekten RecyMin und BitKOIN auf, und sollen die Übertragbarkeit in den Technikumsmaßstab absichern (Sattler 2024, Doschek-Held et al. 2025). Für die Schmelzversuche im Maßstab von rund je 100 Kilogramm Outputmaterial, wurden sortierte, vorzerkleinerte und konditionierte, Fraktionen an Mineralwolleabfällen (Glas- und Steinwolle) in einem elektrisch beheizten Lichtbogenofen (LbO) sowie in einem Induktions-Tiegelofen (ITO) thermochemisch behandelt. Ziel war die vollständige Zerstörung der Faserstruktur, der vollständige Abbau organischer Bestandteile sowie die Überführung in eine glasige Schlacke, die hinsichtlich Chemismus und Reaktivität einem herkömmlichen Hüttensand nachempfunden ist. Für die Versuche im Lichtbogenofen wurden die Glas- und Steinwolleabfälle zunächst sortiert und anschließend getrennt eingesetzt, während im Induktions-Tiegelofen gemischte Mineralwolleabfälle verwendet wurden. Zur gezielten Einstellung der Schlackenchemie wurde CaO-reiche Papierverbrennungsasche aus dem Recycling als Korrekturmaterial eingesetzt. Ein an der Montanuniversität Leoben (Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik) entwickelter Mischungsrechner bestimmt die optimalen Anteile der Ausgangsstoffe, um nach der thermochemischen Behandlung die gewünschten chemischen Eigenschaften zu erreichen. Die dafür festgelegten Grenzwerte beruhten auf normativen Anforderungen, Literaturdaten zu Viskosität und Reaktivität sowie empirischen Erfahrungswerten. Die verwendeten Grenzwerte sind unter anderem in (Doschek-Held et al. 2024) beschrieben. Die diskontinuierlich beschickten Aggregate wurden im Bereich von 1450 °C bis 1600 °C betrieben, wobei eine stufenweise Aufgabe eine kontrollierte Entgasung und die Ausbildung einer homogenen Schmelze ermöglichte. Die flüssige Schlacke wurde anschließend nassgranuliert, um eine gezielt amorphe Matrix zu erzeugen. Tab. 1 zeigt das Mischverhältnis der Inputmaterialien für die konditionierten Schlacken.

Tab. 1: Übersicht der konditionierten Schlacken. LbO: Lichtbogenofen, ITO: Induktions-Tiegelofen, GW: Glaswolle, SW: Steinwolle. Als Korrekturmaterial wurde Papierverbrennungsasche verwendet.

	OFENTYP	KMF	KORREKTUR-MATERIAL
LbO-SW-01 bis -03	LbO	SW (55 M.%)	45 M.%
LbO-SW+GW	LbO	SW (45 M.%) + GW (10 M.%)	45 M.%
ITO-LP	ITO	gemischte Abfälle (65 M.%)	35 M.%
ITO-HP	ITO	gemischte Abfälle (55 M.%)	50 M.%

2.2 Herstellung von Beton aus Zementen mit thermochemisch aufbereiteten KMF

Zur Bewertung der Eignung der konditionierten Schlacken als Zementhauptbestandteil wurden CEM II/B-M (S-LL)- und CEM II/C-M (S-LL)-Zemente vom Projektpartner Holcim CTEC GmbH hergestellt. Handelsüblicher Hüttensand wurde hierbei durch die konditionierten Schlacken ersetzt, wobei die im Lichtbogenofen hergestellten Chargen zu einer Schlackenfraktion (LbO) vereint wurden. Zusätzlich wurde jeweils ein Referenzzement mit einem in Österreich üblichen

Hüttensand hergestellt. Die CEM II/B-Zemente enthielten 29 M.-% Schlacke und 6 M.-% Kalksteinmehl, die CEM II/C-Zemente 30 M.-% Schlacke und 20 M.-% Kalksteinmehl. Sämtliche Zemente wurden auf eine Feinheit von 4665 ± 55 cm²/g (Blaine) vermahlen. Anschließend stellte der Projektpartner Rohrdorfer Umwelttechnik GmbH Betonmischungen der Betonsorte B2 sowie die erforderlichen Probekörper für die nachfolgenden normgerechten Prüfungen auf Frost-, Karbonatisierungs- und Chloridwiderstand her.

2.3 Methoden

Die erzeugten Schlacken wurden zunächst chemisch und mineralogisch charakterisiert. Die chemische Zusammensetzung wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) an Schmelztabletten bestimmt. Die mineralogische Charakterisierung erfolgte mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) an Presstabletten unter Verwendung eines Bruker D8 Endeavor (Messbereich 8–65° 2 Theta, Cu-Kα-Strahlung, 45 kV, 30 mA). Die quantitative Phasenanalyse und die Bestimmung des amorphen Anteils wurden mittels Rietveld-Auswertung der Diffraktogramme unter Verwendung der Software Bruker Topas durchgeführt.

Die Einschätzung der hydraulischen Reaktivität erfolgte nach dem R^3-Schnellverfahren (Li et al. 2018) anhand der kumulativ freigesetzten Hydratationswärme nach 7 Tagen sowie der Bestimmung des Aktivitätsindex in Anlehnung an EN-15167-1 mit einem Mischungsverhältnis von 50 M.% CEM I 42,5 R zu 50 M.% Schlacke. Aufbauend auf den Ergebnissen der Materialcharakterisierung wurden Betonmischungen der Betonsorte B2 hergestellt und hinsichtlich ihrer Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Die Druckfestigkeit wurde an 150-mm-Würfeln nach 1, 7 und 28 Tagen gemäß ÖNORM EN 12390-3 bestimmt. Darüber hinaus wurden ausgewählte Dauerhaftigkeitseigenschaften der Betone untersucht. Diese umfassten den Frostwiderstand unter XF1-Bedingungen, den Karbonatisierungswiderstand gemäß ÖNORM EN 12390-12 unter Verwendung von Thymolphthalein als Indikatorlösung sowie den Chloridwiderstand. Letzterer wurde anhand des säurelöslichen Chloriddiffusionskoeffizienten bestimmt, wobei der Säureaufschluss mit Salpetersäure erfolgte.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Hydraulische Reaktivität der konditionierten Schlacken (HÜS 2.0)

Abb. 1 zeigt den Aktivitätsindex und die hydraulische Reaktivität der konditionierten Schlacken. Die im Lichtbogenofen (LbO) erzeugten Schlacken erreichen Aktivitätsindizes von 112 bis 125 und übertreffen damit sowohl die CEM-I-Referenz als auch die Anforderung der EN 15167-1 von mindestens 90 nach 28 Tagen. Sie weisen zudem die angestrebte Basizität ($(CaO+MgO)/SiO_2$) von 1,4 ± 0,1 auf. Demgegenüber beträgt die Basizität der im Induktions-Tiegelofen (ITO) hergestellten Schlacken lediglich 0,5 für den Low Performer (LP) beziehungsweise 0,6 für den High Performer (HP). Die Unterschiede sind vermutlich auf Dosierschwankungen bei der Mineralwolleabfallbehandlungsanlage mit Schneckenförderern zurückzuführen. Bei nicht gravimetrisch überwachten Beschickung könnte die tatsächliche Korrekturstoffzugabe variieren. Die Abweichung des Zielchemismus der Schlacken zeigt sich ebenfalls im niedrigeren Aktivitätsindex des LP von 84, während der HP trotz geringer Basizität einen Wert von 100 erreicht und damit sowohl das Niveau der CEM-I-Referenz als auch das Normkriterium erfüllt.

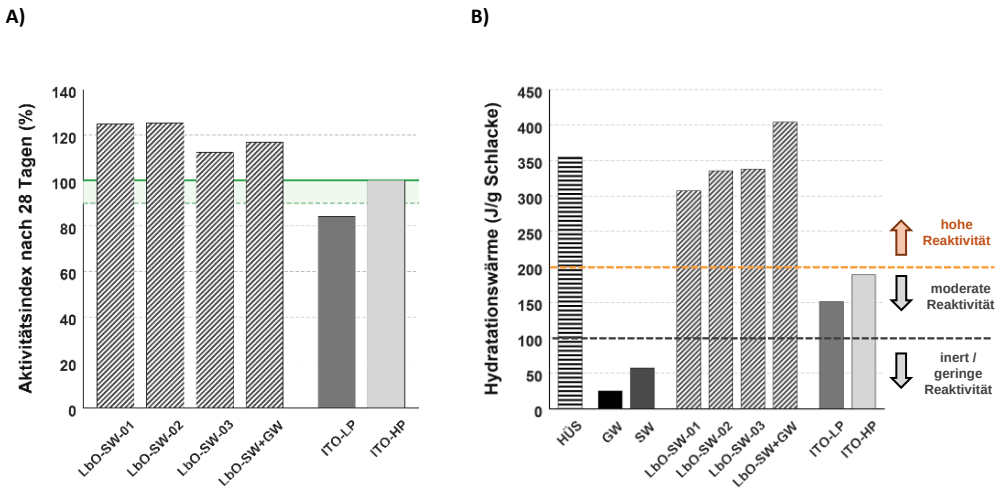


Abb. 1: A) Aktivitätsindex nach 28 Tagen und B) kumulative Hydratationswärme (R3-Test) nach 7 Tagen als Maß der Reaktivität. HÜS: Hüttensand, GW: Glaswolle, SW: Steinwolle

Die in Abb. 1 B) dargestellte kumulative Hydratationswärme dient als Maß für die hydraulische Reaktivität. Während die ITO-Schlacken eine moderate Reaktivität zeigen, weisen die Ergebnisse der LbO-Schlacken auf eine hohe hydraulische Reaktivität hin. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse jedoch, dass die thermochemische Aufbereitung gegenüber den Ausgangsmaterialien Glaswolle (GW) und Steinwolle (SW) bei beiden Systemen eine deutliche Steigerung der Reaktivität bewirkt.

3.2 Einfluss der konditionierten Schlacken auf Festigkeitsentwicklung und Dauerhaftigkeit

Die in Abb. 2 dargestellte Festigkeitsentwicklung folgt den Ergebnissen des Aktivitätsindex. Die LbO-Schlacke zeigt in beiden Zementgruppen die höchsten Werte und übertrifft nach 28 Tagen mit 62,2 MPa bei CEM II/B bzw. 50,4 MPa bei CEM II/C die jeweilige HÜS-Referenz. ITO-HP erreicht bei CEM II/B ein vergleichbares Festigkeitsniveau, bleibt bei CEM II/C jedoch ebenso wie ITO-LP unterhalb der Referenzbetone mit hüttensandhaltigem Zement. Die Ergebnisse der Untersuchungen deuten zudem darauf hin, dass die konditionierten Schlacken ein mit konventionellem Hüttensand vergleichbares oder verbessertes Dauerhaftigkeitsverhalten erreichen können. Bei den CEM-II/B-Betonen unterschreitet die LbO-Schlacke mit einem Karbonatisierungskoeffizienten von $K_{\mathrm{AC,reg}}$ = 0,8 den Wert der HÜS-Referenz von 1,0 und weist damit einen höheren Karbonatisierungswiderstand auf. ITO-HP erreicht mit 1,0 ein nahezu identisches Ergebnis, während ITO-LP mit 1,3 leicht ungünstiger abschneidet. Auch bei CEM II/C erzielt LbO mit 1,1 einen deutlich niedrigeren Karbonatisierungskoeffizienten als die HÜS-Referenz mit 1,6. Dagegen liegen ITO-LP und ITO-HP mit jeweils 1,7 geringfügig oberhalb der Referenz.

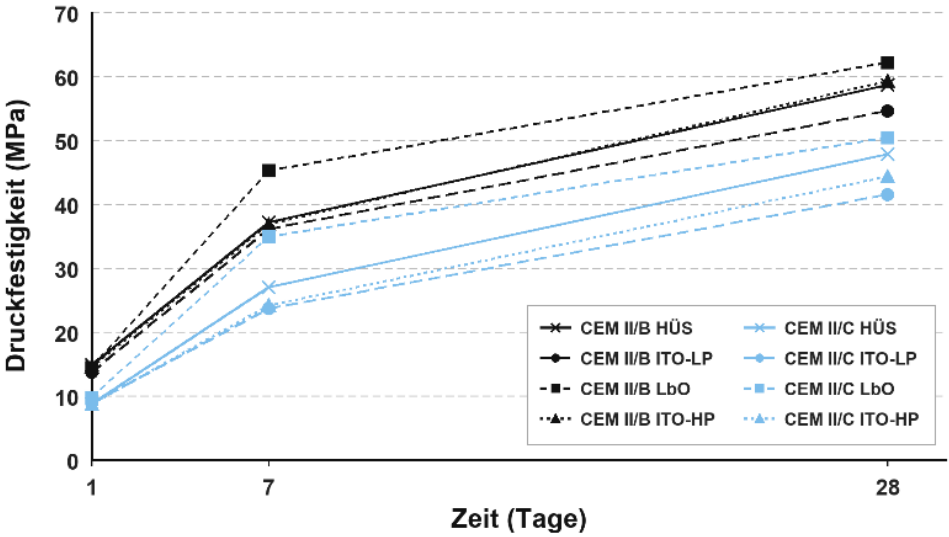


Abb. 2: Festigkeitsentwicklung der Betone mit Zementen aus konditionierten Schlacken (ITO-LP, LbO und ITO-HP) im Vergleich zu Referenzbetonen mit hüttensandhaltigen Zementen.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Prüfung zum Frostwiderstand. Die Ergebnisse der XF1 Prüfung nach 56 Frost-Tau-Wechseln dienen als Maß für die frostbedingte Oberflächenschädigung der Betone, wobei die LbO-Betone bei CEM II/B keinen und bei CEM II/C nur 0,1% Masseverlust bestimmt werden konnte. Damit liegen sie für CEM II/B im Bereich der HÜS-Referenzen (0,1 %). Die ITO-Betone entsprechen bei CEM II/B mit jeweils 0,2 % annähernd dem Referenzniveau. Bei CEM II/C weisen ITO-LP und ITO-HP zwar höhere Werte von 0,6 % beziehungsweise 0,8 % auf, bleiben jedoch deutlich unterhalb der HÜS-Referenz (1,3 %). Auch beim Chloridwiderstand erzielen die konditionierten Schlacken überwiegend ein mindestens gleichwertiges Ergebnis. Bei CEM II/B liegen sämtliche Chloriddiffusionskoeffizienten unterhalb der HÜS-Referenz von $6{,}03 \cdot 10^{-12}$ m^2/s, wobei ITO-HP mit $3.09 \cdot 10^{-12}$ m^2/s den niedrigsten Wert erreicht. Bei CEM II/C unterschreitet ITO-HP mit $4.55\ 10^{-12}$ m^2/s die HÜS-Referenz von $4.61\ 10^{-12}$ m^2/s geringfügig, während LbO ($5.46\ 10^{-12}$ m^2/s) und ITO-LP ($6.09\ 10^{-12}$ m^2/s) höhere Werte aufweisen. Insbesondere LbO-Schlacken zeigen eine höhere Festigkeit sowie einen besseren Karbonatisierungs- und Frostwiderstand als HÜS. ITO-HP zeigt vor allem beim Chloridwiderstand Vorteile, während ITO-LP die Referenz nicht in allen untersuchten Dauerhaftigkeitskennwerten erreicht. Vor dem Hintergrund, dass die ITO-Schlacken die angestrebte Basizität nicht erreichten und somit noch Optimierungspotenzial besteht, sind die erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Festigkeitsentwicklung und der Dauerhaftigkeitskennwerte dennoch als zufriedenstellend zu bewerten. Damit bestätigen die Ergebnisse grundsätzlich das Potenzial der konditionierten Schlacken als Alternative zu konventionellem Hüttensand, zeigen zugleich jedoch eine Abhängigkeit von der Schlackenqualität und der Zementzusammensetzung.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Durch die thermochemische Aufbereitung im Technikumsmaßstab konnten Mineralwolleabfälle in reaktive, hüttensandähnliche Schlacken überführt werden. Insbesondere die LbO-Schlacke erreichte hinsichtlich Reaktivität, Festigkeitsentwicklung und Dauerhaftigkeit ein mit konventionellem Hüttensand vergleichbares oder verbessertes Leistungsniveau. Die Ergebnisse der ITO-Schlacken zeigen trotz nicht erreichter chemischer Zielzusammensetzung ebenfalls ein grundsätzliches Anwendungspotenzial, erfordern jedoch eine weitere Optimierung der Prozessführung. Insgesamt eröffnet das Verfahren einen vielversprechenden Verwertungsweg für Mineralwolleabfälle und eine mögliche Alternative zum künftig knapper werdenden Hüttensand.

5 DANKSAGUNG

Der vorliegende Beitrag wurde im Zuge des Forschungsprojekts „BitKOIN“ (Pr.-Nr.: 897739), gefördert von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Rahmen des Programms „FTI-Kreislaufwirtschaft“, erstellt.

LITERATURVERZEICHNIS

Bundeskanzleramt (2021): Deponieverordnung 2008, Fassung vom 1.07.2024. Online verfügbar unter https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20005653, zuletzt geprüft am 10.11.2024.

Doschek-Held, K.; Krammer, A.; Steindl, F. R.; Sattler, T.; Juhart, J. (2024): Recycling of mineral wool waste as supplementary cementitious material through thermochemical treatment. In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association,* DOI: 10.1177/0734242X241237199.

IEA (Hg.) (2020): Iron and Steel Technology Roadmap. Licence: CC BY 4.0. Paris. Online verfügbar unter https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap.

Doschek-Held, K.; Krammer A.; Steiner S.; Steindl, F. R.; Sedlazeck, K. P.; Vydrenkova A. (2025): Valorisation of Mineral Wool Waste into Supplementary Cementitious Material. In: KU Leuven (Hg.): Proceedings of the 9th Slag Valorisation Symposium - From Residues to Resources and Resilience, S. 250–253.

Krammer, A.; Doschek-Held, K.; Steindl, F. R.; Weisser, K.; Gatschlhofer, C.; Juhart, J. et al. (2024): Valorisation of metallurgical residues via carbothermal reduction: A circular economy approach in the cement and iron and steel industry. In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association,* DOI: 10.1177/0734242X241240040.

Li, X.; Snellings, R.; Antoni, M.; Alderete, N.; Ben Haha, M.; Bishnoi, S. et al. (2018): Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267-TRM phase 1. In: *Mater Struct* 51 (6) DOI: 10.1617/s11527-018-1269-x.

Sattler, T. (2024): Development of Innovative Recycling Processes for Mineral Wool Waste. Dissertation. Montanuniversität Leoben, Leoben. Chair of Waste Processing Technology and Waste Management. Online verfügbar unter https://pure.unileoben.ac.at/files/26589483/AC17130074.pdf, zuletzt geprüft am 06.03.2025.

Scrivener, K. L.; John, V. M.; Gartner, E. M. (2018): Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. In: *Cement and Concrete Research* 114, S. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.

Väntsi, O.; Kärki, T. (2014): Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. In: *J Mater Cycles Waste Manag* 16 (1), S. 62–72. DOI: 10.1007/s10163-013-0170-5.

ÖNORM EN 197-1, 2018 12 01: Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement.

Nachhaltiges Bauen durch den systematischen Einsatz von recycelten Baumaterialien am Beispiel des Abfallwirtschaftszentrums Harrislee

Peter Riegl[1] & Holger Bratz[2]
[1)] GEO-POLYMER Trading e.U., Bad Hall, Österreich
[2)] Balzersen GmbH.&Co.KG, Harrislee, Deutschland

KURZFASSUNG: Im nördlichsten Teil Deutschlands, nahe Flensburg, betreibt ein privates Unternehmen auf einer Fläche von 54 Hektar ein vollintegriertes Abfallwirtschaftssystem. Mineralische und biogene Baustoffe (z. B. Beton, Holz etc.) werden aus Abbruchmaterialien gewonnen, getrennt, gereinigt und wiederaufbereitet. Insgesamt werden über 50 verschiedene natürliche Baustoffe recycelt und einer neuen Verwendung zugeführt, darunter als Betonschotter, Straßenbaumaterialien, Sandgrubenfüllmaterial, Filtermaterialien, Füllkies und Mutterboden. Reststoffe und nicht recycelbare Materialien werden auf einer Deponie mit einem Volumen von rund 2 Millionen Kubikmetern gelagert, die nach höchsten deutschen Standards (BAM-Verordnung) geplant, gebaut und betrieben wird. Zusätzlich wird seit 2014 eine weitere sogenannte „Klasse-0-Deponie“ zur Entsorgung schwach kontaminierter Böden betrieben. Großflächige PV-Anlagen und ein eigenes Windkraftwerk tragen zur CO_2-neutralen Energieversorgung bei.

1 EINFÜHRUNG

Im hohen Norden Deutschlands, unweit von Flensburg, betreibt ein seit vielen Jahren ansässiges Familienunternehmen ein Entsorgungsunternehmen, das weit über die Grenzen Schleswig-Holsteins hinaus bekannt ist. Das Unternehmen hat sich zum Ziel gesetzt, die ohnehin schon sehr strengen gesetzlichen Vorgaben Deutschlands hinsichtlich Abfallsammlung, -verwertung und -lagerung zu übertreffen. Im Einklang mit dem Green Deal der Europäischen Kommission wird besonderer Wert auf die Verwertung und Aufbereitung von Bauabfällen gelegt. In Abstimmung mit den Behörden der Stadt Flensburg und des Landes Schleswig-Holstein werden alle notwendigen Baumaßnahmen frühzeitig geplant, von externen Experten begutachtet und anschließend umgesetzt.

1.1 Überblick über die gesetzlichen Anforderungen in Deutschland

In allen Bereichen der Abfallwirtschaft und Deponierung ist das Bundesinstitut für Materialforschung und -prüfung (BAM) von der Bundesrepublik Deutschland mit der Erstellung und Umsetzung von Richtlinien beauftragt (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 2025). Zu diesem Zweck wurde ein Beirat mit Experten verschiedener Fakultäten eingerichtet, der sich mit aktuellen Entwicklungen in Gesetzen und Verordnungen sowie deren Umsetzung in den entsprechenden BAM-Richtlinien befasst. Die Anforderungen an temporäre und permanente Lager- und Behandlungsanlagen richten sich nach dem zu erwartenden Deponieinhalt. Dies geschieht im Wesentlichen gemäß Deponieverordnung, die je nach Gefährlichkeit der Bestandteile folgende Deponieklassen unterscheidet (LfU Bayern, 2020):

- DK 0: für nicht gefährliche Inertabfälle: insbesondere Boden, untergeordnet Bauabfälle
- DK I: für nicht gefährliche und gefährliche Abfälle, wie zum Beispiel Bodenaushub, Bauabfälle, KMF und Asbest
- DK II: für nicht gefährliche und gefährliche Abfälle, wie zum Beispiel Bauabfälle, Straßenaufbruch und Aschen
- DK III: für gefährliche Abfälle: Sonderabfälle, die oberirdisch abgelagert werden können
- DK IV: für gefährliche Abfälle: Sonderabfälle, die unterhalb der Erdoberfläche abgelagert werden müssen, zum Beispiel Filterstäube

Mit steigender Deponieklasse erhöhen sich auch die technischen Anforderungen an Bau und Planung, die in der DepV geregelt sind.

1.2 Implementierung gesetzlicher Anforderungen

In Zusammenarbeit mit den lokalen Behörden und externen Experten achtet der Betreiber bei der Planung und dem Bau der einzelnen Bereiche besonders darauf, möglichst viele relevante Vorschriften zu erfüllen, auch wenn beispielsweise einzelne Betriebsbereiche innerhalb des Abfallwirtschaftszentrums verlegt werden. Bei der Planung der Deponie war es folgerichtig, nach höchsten deutschen Deponiestandards zu bauen, um für zukünftige Änderungen von Normen und Gesetzen gerüstet zu sein.

2 GEOGRAFIE, GEOLOGIE UND STANDORT

Der Standort der Anlage befindet sich in unmittelbarer Nähe der dänischen Grenze und ist allseitig von landwirtschaftlichen Flächen umgeben. Bei der Planung wurde darauf geachtet, die Belastung für die Anwohner so gering wie möglich zu halten. So wurde beispielsweise eine separate Zufahrtsstraße gebaut, um den Containerverkehr außerhalb des Siedlungsgebiets zu leiten. Die rechtzeitige Investition in zusätzliche Flächen gewährleistet zudem einen großen Abstand zwischen der Anlage und der nächstgelegenen Siedlung. Dadurch werden Geruchs- und Lärmbelästigung auf ein Minimum reduziert.

Geologisch gesehen befindet sich der Standort auf sandigen Böden und Moränen mit vereinzelten, unregelmäßigen Tonablagerungen. Daher sind bei der Oberflächenabdichtung, insbesondere auf der Deponie, besonders hochwertige bauliche Maßnahmen erforderlich, da aufgrund der Bodenbeschaffenheit keine natürliche geologische Barriere vorhanden ist.



Abb. 1: Überblick über das Abfallwirtschaftszentrum Harrislee

3 MATERIALABLAGERUNG UND BEHANDLUNG

Das Abfallwirtschaftszentrum nimmt große Mengen verschiedener mineralischer und Bauabfälle entgegen. Das Einzugsgebiet erstreckt sich von Nord-Hamburg bis zu den vorgelagerten Inseln der Nordsee. Besonderer Wert wird auf die reine und schadstofffreie Anlieferung gelegt. Zu diesem Zweck werden die Mitarbeiter an den dezentralen Sammelstellen regelmäßig geschult, um ihr Fachwissen und ihr Umweltbewusstsein kontinuierlich zu verbessern.
Alle Materialien werden im Rahmen der Wareneingangskontrolle quantitativ und qualitativ geprüft, um eine bestmögliche, technisch und ökologisch sinnvolle Behandlung zu gewährleisten.

3.1 Mineralisches Aushubmaterial

Der angelieferte Aushub wird von einem externen Labor beprobt (100 Kubikmeter), bevor über die weitere Behandlung entschieden wird. Üblicherweise wird das Material gesiebt, gegebenenfalls gewaschen, von Verunreinigungen befreit und in verschiedene Fraktionen getrennt. Das aufbereitete Material wird anschließend im Tiefbau, z. B. zum Verfüllen von Baugruben, verwendet. Die recycelte Menge beträgt etwa 60.000 Tonnen pro Jahr.

3.2 Holz

Dieses Material, das typischerweise beim Abriss von Gebäuden anfällt, wird im Entsorgungszentrum gemäß den geltenden Vorschriften (Schleswig-Holstein, 2020) getrennt:

- A1: Unbelastetes Naturholz: wird zerkleinert und in der Spanplattenproduktion wiederverwendet.
- A2/A3: Möbelholz: wird thermisch recycelt.
- A4: Stark kontaminiertes Holz (druckimprägniert): wird als Sonderabfall separat entsorgt.

Die Gesamtmenge des verarbeiteten Holzes beträgt ca. 15.000 Tonnen pro Jahr.

3.3 Abbruchmaterial

Hierbei handelt es sich um Baumaterialien aller Art, die beim Abriss von Gebäuden anfallen. Nach Ankunft im Entsorgungszentrum werden Laboranalysen durchgeführt, um mögliche Verunreinigungen sofort zu erkennen und das Material entsprechend sachgemäß zu lagern und zu behandeln. Anschließend werden Fremdkörper, Metalle und Schadstoffe aussortiert und das Baumaterial in großen Brechanlagen zerkleinert. Die weitere Lagerung erfolgt nach der entsprechenden Sieblinie, sodass Kornmischungen speziell für den jeweiligen Anwendungszweck hergestellt werden können. Diese werden dann sinnvoll im Bau von Parkplätzen, als Fundamente für Windkraftanlagen oder im Straßenbau wiederverwendet. Auf diese Weise werden jährlich rund 60.000 Tonnen recycelt.

3.4 Asphaltrecycling

Das gleiche Verfahren wird für diese Materialien angewendet, die aus dem Straßenbau stammen und jährlich etwa 30.000 Tonnen ausmachen. Dabei wird bei der Wareneingangskontrolle besonders auf mögliche Verunreinigungen durch Kraftstoffe, Öle usw. geachtet. Die Bruchstücke werden in jedem Fall gewaschen und anschließend wiederverwendet, da sie sich hervorragend als Zuschlagstoff im Straßenbau, als Drainagematerial oder zur Bodenstabilisierung eignen.

3.5 Kompost

Die Anlieferung von Bioabfällen erfolgt durch gewerbliche und private Kunden und beträgt jährlich rund 7.000 Tonnen. Da diese Abfälle aufgrund des biologischen Abbauprozesses oft noch höhere Temperaturen aufweisen, wird das Material großflächig gelagert, zerkleinert und kontinuierlich durchmischt, um eine vollständige Fermentation zu gewährleisten. Nach Abschluss der Fermentation wird der Kompost gelagert und für die Wiederverwendung im privaten Gartenbau verpackt. Aufgrund der intensiven Landwirtschaft in dieser Region sind die Böden meist stark geschädigt und bringen kaum noch wirtschaftliche Erträge. Durch die Zugabe von 30 % des gewonnenen Komposts zum ursprünglichen Oberboden kann die Bodenqualität deutlich verbessert und das Wachstum von Getreide, Mais und anderen Nutzpflanzen erheblich gesteigert werden.

4 DEPONIEBAU

Zusätzlich zu den oben genannten Recyclingarten ist es notwendig, eine Lagerstätte für Abfälle zu errichten, die nicht recycelbar sind oder aufgrund ihrer Zusammensetzung deponiert werden müssen. Um die Umweltbelastung durch Transport und Emissionen zu vermeiden, wurde die Deponie mit einer Kapazität von 80.000 Tonnen pro Jahr direkt auf dem Firmengelände angelegt. Hierfür wurde eine 9,5 Hektar große Deponiefläche geschaffen, die abschnittsweise bebaut und befüllt wird. Derzeit werden ca. 7 Hektar Untergrundabdichtung und 6 Hektar Oberflächenabdichtung hergestellt bzw. sind in Betrieb. Weitere 20 Hektar Fläche stehen für zukünftige Erweiterungen zur Verfügung.

4.1 Projektbeschreibung

Um sicherzustellen, dass die Deponie auch künftigen gesetzlichen Anforderungen entspricht und gegebenenfalls weitere kontaminierte Stoffe gelagert werden müssen, erfolgte die Planung und der Bau der Deponie nach höchsten in Deutschland geltenden Standards und unter Berücksichtigung der BAM-Richtlinien. Für alle Komponenten der synthetischen Abdichtung (HDPE-Abdichtungsbahnen, Geotextilien, Dränageverbundstoffe) wurden ausschließlich Produkte mit gültiger BAM-Zulassung verwendet. Die Montage und Verschweißung erfolgte durch qualifizierte Fachkräfte mit AGAS-Zertifizierung (AGAS, 2026). Alle Montagearbeiten wurden von einer unabhängigen Prüfstelle begleitet und kontrolliert. Bei den mineralischen Materialien wurde besonderer Wert auf eine möglichst ökologische Vorgehensweise gelegt. So bestehen beispielsweise die Rekultivierungsschicht und die Kiesdrainage der Oberflächenabdichtung sowie der Dränekies entlang der Dränagerohre aus Recyclingprodukten der eigenen Produktion.

4.2 Basisabdichtung

Um sicherzustellen, dass die Deponie auch künftigen gesetzlichen Anforderungen entspricht und gegebenenfalls weitere kontaminierte Stoffe gelagert werden müssen, erfolgte die Planung und der Bau der Deponie nach höchsten in Deutschland geltenden Standards und unter Berücksichtigung der BAM-Richtlinien. Für alle Komponenten der synthetischen Abdichtung (HDPE-Abdichtungsbahnen, Geotextilien, Dränageverbundstoffe) wurden ausschließlich Produkte mit gültiger BAM-Zulassung verwendet. Die Montage und Verschweißung erfolgte durch qualifizierte Fachkräfte mit AGAS-Zertifizierung nach der BAM-Richtlinie für Verlegefachbetriebe (Bundesanstalt für Materialforschung und - prüfung, 2025). Alle Montagearbeiten wurden von einer unabhängigen Prüfstelle begleitet und kontrolliert. Bei den mineralischen Materialien wurde besonderer Wert auf eine möglichst ökologische Vorgehensweise gelegt. So bestehen beispielsweise die Rekultivierungsschicht und die Kiesdrainage der Oberflächenabdichtung sowie der Dränekies entlang der Dränagerohre aus Recyclingprodukten der eigenen Produktion.

4.3 Oberflächenabdichtung

Nach dem Verfüllen der rund 150 m langen und 20 m breiten Deponieabschnitte wurde die Oberflächenabdichtung hergestellt. Dazu wurde eine Ausgleichsschicht aus aufbereitetem Feinmaterial aufgebracht und die Oberfläche profiliert. Anschließend wurde eine 2,5 mm dicke PEHD-Abdichtungsbahn mit strukturierter Oberfläche verlegt und verschweißt. Ein weiteres Geotextil mit 800 g/m² dient als Schutzschicht, auf die eine weitere 30 cm dicke Schicht aus Kies mit einer Korngröße von 2/8 aufgebracht wird. Darüber befindet sich eine 1 bis 3 m dicke Rekultivierungsschicht – je nach gewünschter Lage der endgültigen Oberfläche.
Da die Abdichtungsbahnen der Basis- und Oberflächenabdichtung ebenfalls miteinander verschweißt sind, ist eine vollständige, dauerhaft dichte und sichere Einkapselung des gelagerten Abfalls gewährleistet.

4.4 Sickerwasserfassung

Um das Sickerwasser, insbesondere während der Bau- und Befüllungsphase, sicher behandeln zu können, wurde ein Rohrleitungsnetz aus PE100-Rohren mit Durchmessern von 160 mm bis 400 mm und entsprechenden Schächten errichtet. Ein ebenfalls mit PEHD-Abdichtungsmembranen ausgekleidetes Speicherbecken dient der Zwischenlagerung des Sickerwassers, bevor es zur kommunalen Kläranlage transportiert und dort entsorgt wird.

5 UMWELTRELEVANTE BEGLEITMASSNAHMEN

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Maßnahmen zur Erzielung höchstmöglicher Recyclingquoten hat der Betreiber weitere Anstrengungen unternommen, um ein möglichst nachhaltiges Management zu gewährleisten und die Akzeptanz des Betriebs in der Bevölkerung sicherzustellen. Darüber hinaus ist die Produktion und Nutzung nachhaltiger Energie ein strategisch wichtiger Bestandteil des Betriebs.

5.1 Windkraftanlage

Auf dem Gelände des Abfallwirtschaftszentrums befindet sich eine Windkraftanlage mit einer Nennleistung von 250 kW. Diese elektrische Energie wird zum Betrieb der Sieb- und Brechanlagen genutzt.

5.2 Photovoltaik

Auf dem Verwaltungsgebäude und weiteren Nebengebäuden, die stetig erweitert werden, sind Photovoltaikanlagen installiert. Der erzeugte Strom deckt je nach Jahreszeit den gesamten Stromverbrauch des Verwaltungsgebäudes (Büros, Waagen, Gemeinschaftsräume).

5.3 Nachnutzung der Deponiefläche

Nach dem Verfüllen und Abdichten der einzelnen Deponieabschnitte werden diese rekultiviert und bepflanzt. Trotz des geschäftigen Treibens auf dem Firmengelände haben sich bereits zahlreiche Wildtiere, Greifvögel, Hasen, Fasane, Füchse und Rehe angesiedelt, die die naturnahe Vegetation des Geländes besonders schätzen.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Anforderungen der Europäischen Kommission im CEAP (Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft) als wesentliche Säule des „Green Deals“ erfordern große Anstrengungen sowohl von der Industrie als auch von den Verbrauchern (COM2020(98)). Es ist wichtiger denn je, Verhaltensweisen zu ändern und dem Schutz unserer Umwelt mehr Bedeutung beizumessen. Durch die Aufbereitung und das Recycling von Materialien lassen sich Abfallmengen und die daraus resultierenden Deponieabfälle deutlich reduzieren. Intelligente Konzepte für die Verarbeitung von Gewerbeabfällen, insbesondere aus der Bauindustrie, können neben den ökologischen Vorteilen auch erhebliche wirtschaftliche Vorteile bringen. Das Beispiel dieses Projekts mit einer Recyclingquote von fast 95 % verdeutlicht dies eindrucksvoll. Die Verwendung von recycelten Baustoffen ist in vielen Bereichen bereits gängige Praxis und könnte in gleicher Weise auch auf andere Branchen übertragen werden. Doch auch hier sind makroökonomisches Denken und das Überwinden überholter Denkweisen notwendig, damit deutlich wird, dass recycelte Materialien wertvolle Materialien sind.

LITERATURVERZEICHNIS

AGAS. (2026). https://agas-ev.de/zertifikate/.

Bundesanstalt für Materialforschung und - prüfung, B. (2025). tes-bam.de. Von https://tes.bam.de/recht-und-regelwerke/abfallrecht#c8092 abgerufen

COM2020(98). (kein Datum). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098.

LfU Bayern. (2020). https://www.lfu.bayern.de/abfall/gefaehrliche_nichtgefaehrliche_abfaelle/index.htm.

Schleswig-Holstein, L. (2020). Umweltportal, ID8385.

KONTAKT

Peter Riegl
peter@geo-polymer.eu
+43 676 5549500
GEO-POLYMER Trading e.U.
www.geo-polymer.eu

Holger Bratz
hb@balzersen.sh
+49 151 15205150
Balzersen GmbH.&Co.KG
www.balzersen.sh

Untersuchung der thermischen Stabilität von reststoffbasierten Geopolymeren für Anwendungen im Hochtemperaturbereich

Klaus Doschek-Held[1], Anna Krammer[1], Christina Atzenhofer[2] & Cyrill Grengg[3]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Leoben, Österreich
[2)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde, Leoben, Österreich
[3)] Christian Doppler Labor für Reststoffbasierte Geopolymer Baustoffe in der CO_2-neutralen Kreislaufwirtschaft; Technische Universität Graz, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Diese Arbeit untersucht die thermische Stabilität reststoffbasierter Geopolymere für Hochtemperaturanwendungen und adressiert damit die Ressourceneffizienz und die CO_2-Minderung in energieintensiven Industrien. Drei metakaolinbasierte Rezepturen mit Kalium-Wasserglas und definierten Reststoffanteilen wurden geprüft: Konverterschlacke (LD), Ziegelbruch (ZB) sowie ein Gemisch aus künstlicher Mineralfaser und Brennofenstaub aus der Magnesiaherstellung (KMF/MAS). Bewertet wurden charakteristische Temperaturen mittels thermo-optischer Analyse (TOA) und die zugehörigen Massen-/Wärmeereignisse mittels simultaner thermischer Analyse (STA).
Die Ergebnisse zeigen eine konsistente thermische Stabilität. ZB erreicht hierbei das höchste Stabilitätsniveau, gefolgt von KMF-MAS, während LD eine frühere Erweichung zeigt, jedoch im Vergleich eine geringere Flächenänderung aufweist. Ergänzende STA an ZB-Pulver bestätigte typische Ereignisfenster für metakaolinbasierte Systeme. Identische Messungen für LD und KMF-MAS sind vorgesehen, um die Korrelation zwischen thermo-optischen Kennwerten und thermischen Signaturen zu vertiefen.
In erster Näherung im Labormaßstab bestätigen die Ergebnisse das Potenzial reststoffbasierter Geopolymere als Binder- beziehungsweise Matrixsysteme für Hochtemperaturanwendungen, vorausgesetzt, dass Rezeptur und angestrebte Anwendung zielgerichtet aufeinander abgestimmt werden.

1 MOTIVATION UND STAND DER TECHNIK

Energieintensive Branchen wie die Stahl-, Zement- und Feuerfestindustrie stehen vor der Herausforderung, Primärrohstoffe zu substituieren und ihre CO_2-Bilanz zu verbessern, während zugleich große Mengen mineralischer Reststoffe bislang unzureichend genutzt werden (Ratz, et al., 2025; IEA, 2020). Konventionelle Bindemittel und Alkalisilikate sind mit hohem Energie- und Rohstoffaufwand verbunden, was den Bedarf an alternativen, kreislauforientierten Lösungen erhöht (Provis, 2018). Geopolymere auf Basis von Sekundärrohstoffen gelten hier als vielversprechende Option, da sie als Ersatz für hydraulische oder tonbasierte Bindemittelkomponenten eingesetzt werden können und dabei Vorteile wie geringere Schwindung, höhere thermische Stabilität sowie verbesserte mechanische Eigenschaften bieten (Abdel-Aziem, Ewais, El-Gamal, & Meawad, 2021; Bezerra & Luz, 2024). Voruntersuchungen an reststoffbasierten Geopolymeren zeigen eine thermische Stabilität bis über 1200 °C, was ihr Potenzial für feuerfeste Anwendungen jenseits klassischer Schamotte-Systeme unterstreicht (Provis & van Deventer, 2014). Vor diesem Hintergrund besteht ein klarer Bedarf, die thermische Stabilität sowie die hochtemperaturbedingten Umwandlungs- und Verformungsprozesse solcher Bindemittelsysteme systematisch zu erfassen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die initialen Mischungen definiert sowie thermische Analysen durchgeführt, die die Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Bestimmung und Optimierung der Einflussgrößen bilden.

2 MATERIAL

2.1 Materialien und Reststoffbasis

Als Ausgangsstoffe für die Geopolymersynthese wurden Konverterschlacke (LD), Ziegelbruch (ZB), künstliche Mineralfasern (KMF) und Brennofenstaub aus der Magnesiaherstellung (MAS) eingesetzt und in Kombination mit Metakaolin und einem Kaliumwasserglas (Silikatmodul von 1,7 bzw. 45 % Massenanteil an Feststoff) aktiviert. Das Metakaolin, ein kalzinierter kaolinitischer Ton, diente als Korrekturstoff zur Einstellung definierter Si/Al-Verhältnisse. Die LD-Schlacke ist ein calciumreicher Reststoff der Stahlindustrie und mineralogisch von Phasen der Melilitgruppe sowie der Belit geprägt. Ziegelbruch ist ein Reststoff aus der Bau- und Abbruchindustrie, dessen Hauptphasen Quarz, Feldspäte und Glimmer sind. KMF aus Produktions- und Rückbauprozessen weisen einen überwiegend amorphen Charakter mit hohen Anteilen an SiO_2-, Al_2O_3- und CaO-haltigen Glasphasen auf. Der in der Feuerfestproduktion anfallende Brennofenstaub ist durch hohe MgO-Gehalte gekennzeichnet und besteht überwiegend aus Magnesit, während Periklas in untergeordneten Mengen vorliegt (Ratz, et al., 2025; Brandl, 2025)

2.2 Rezepturen und Massenanteile

Die Kurzbezeichnungen LD, ZB und KMF-MAS werden für die drei untersuchten Rezepturen einheitlich verwendet. Folgend die Rezepturzusammensetzungen als Massenanteile in % (Brandl, 2025):

- LD: Metakaolin 27,3; Kalium-Wasserglas 43,6; Wasser 1,7; LD 27,3;
- ZB: Metakaolin 26,3; Kalium-Wasserglas 42,0; Wasser 5,4; ZB 26,3;
- KMF-MAS: Metakaolin 26,7; Kalium-Wasserglas 42,7; Wasser 3,8; KMF 14,8; MAS 11,9.

In Abb. 1 werden die Hauptoxide der Rezepturen als Massenanteile in Prozent angegeben.

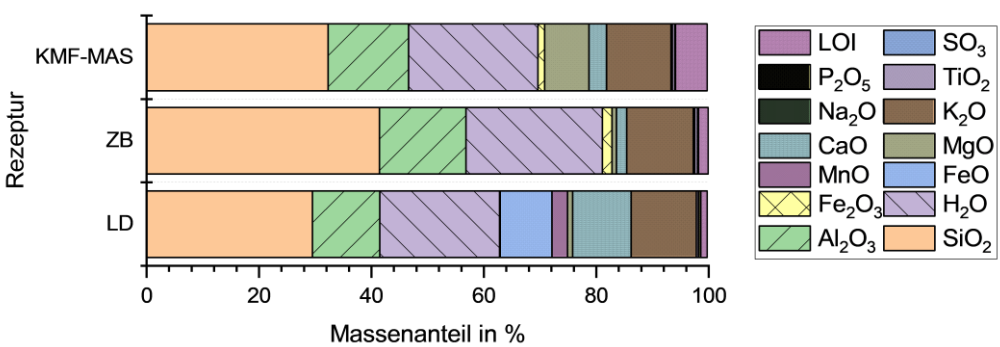


Abb. 1: Übersicht der Hauptoxidzusammensetzung der gegenständlichen Rezepturen als Massenanteile in Prozent

2.3 Probenherstellung und Vorkonditionierung

Zur Gewährleistung reproduzierbarer Probenherstellung wurde ein einheitlicher Misch- und Formgebungsablauf angewendet. Zunächst wurden die trockenen Ausgangsstoffe homogen vorgemischt. Anschließend erfolgte die Zugabe des Kalium-Wasserglases als alkalischer Aktivator unter kontinuierlichem Mischen, bis eine homogene Paste entstanden war. Die Frischmassen wurden anschließend in Quaderformen eingebracht.

3 METHODE

Dieses Kapitel behandelt thermo-optische und STA-Analysen von LD, ZB und KMF-MAS, leitet Kennwerte ab, bewertet die Hochtemperatureignung und skizziert den Validierungsbedarf.

3.1 Thermo-optische Analyse (TOA) – Probenkörper und Messprotokoll

Zur Bestimmung der Hochtemperaturstabilität wurden pro Rezeptur drei kubische Prüfkörper mit einer Seitenlänge von 3 mm bis 4 mm gefertigt (LD 1-3, ZB 1-3, KMF-MAS 1-3). Die Messung erfolgte mit dem Erhitzungsmikroskop EM201 (Fa. Hesse): Aufheizen von Raumtemperatur mit 50 °C min^{-1} bis 1000 °C, danach 10 °C min^{-1} bis zur Fließgrenze oder bis 1600 °C; Haltezeit 15 min bei 1600 °C; Spülgas: Luft mit 3,6 L min^{-1} und Probenträger: stempelgepresste Aluminiumoxidplättchen mit 99,7 % Al_2O_3. Die automatische Bestimmung der charakteristischen Temperaturen (Erweichung (T_{Erw}), Halbkugel (T_{HK}), Fließ (T_F)) erfolgt in Anlehnung an DIN 51730. Die formfaktorbasierte Auswertung der projizierten Schattenkontur dient der Vergleichbarkeit zwischen Rezepturen und wird zur Ergebnisdarstellung herangezogen.

3.2 Simultane thermische Analyse (STA) – Probenpräparation und Parameter

Zur Identifikation von Dehydratisierungs-, Entbinderungs- und Kristallisationsereignissen wurde die ZB-Probe mittels Mörser und Pistill zerkleinert. Die Analyse erfolgte mittels 449 F3 Jupiter (Fa. Netsch): Aufheizen von Raumtemperatur mit 10 °C min^{-1} bis 1600 °C, Spülgas: Luft mit 50 mL min^{-1} und Probentiegel: Platinum-Iridium.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Thermo-optische Analyse

In Abb. 2 werden die Ergebnisse der thermo-optischen Analyse sowie die Flächenänderung gegen Temperatur der Einzelmessungen der gegenständlichen Rezepturen dargestellt.

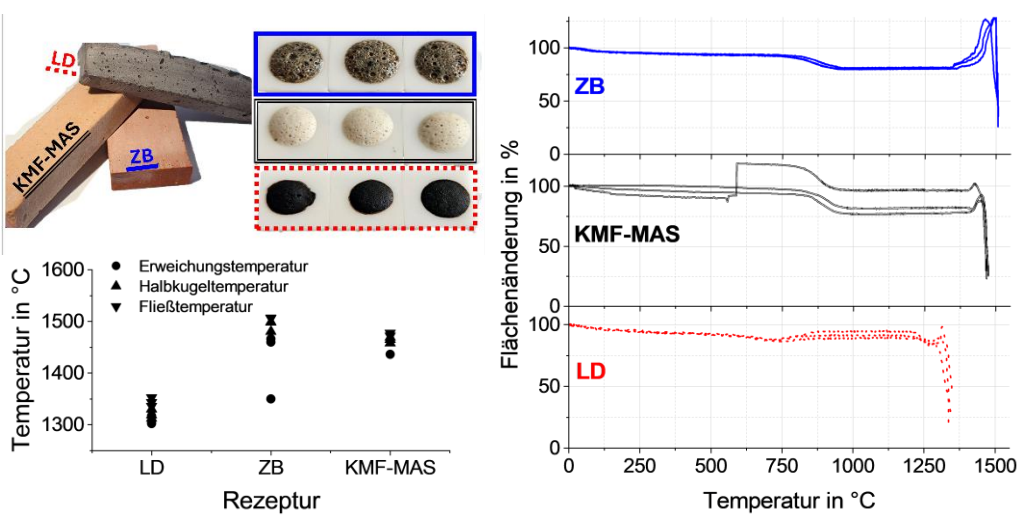


Abb. 2: Probenübersicht (links oben) und Ergebnisse der thermo-optischen Analyse (links) sowie die Flächenänderung in Abhängigkeit von der Temperatur (rechts) der Rezepturen LD, ZB und KMF-MAS

Entsprechend den gegenständlichen Analysen ergeben sich folgende Ergebnisableitungen:

- Charakteristische Temperaturen: Die Erhitzungsmikroskopie zeigt eine deutliche Reihenfolge der thermischen Beständigkeit. ZB erreicht die höchsten charakteristischen Temperaturen als Mittelwert $\bar{x}$ (T_{Erw} 1425 °C; T_{HK} 1492 °C; T_F 1507 °C), gefolgt von KMF-MAS (T_{Erw} 1436 °C; T_{HK} 1464 °C; T_F 1476 °C). LD weist die niedrigsten Werte auf (T_{Erw} 1310 °C; T_{HK} 1320 °C; T_F 1344 °C).
- Reproduzierbarkeit/Validität: Für ZB und LD sind die Abweichungen der Schattenbilder innerhalb der üblichen Schwankungsbreite der Messung, daher können die bestimmten Kennwerte als valide angenommen werden. Im Gegenzug zeigt KMF-MAS eine gewisse Schwankung, jedoch sind die qualitativen Trends der Messungen nachvollziehbar. Details zu chemisch-physikalischen Vorgängen bleiben ohne STA interpretationsoffen.
- Formänderungen (qualitative Trends): Die Auswertung der projizierten Flächenverläufe belegt für alle Rezepturen eine frühe Schrumpfung (Entbinderung/Entwässerung), gefolgt von einer stabilen Phase und einem ausgeprägten Abfall im Bereich der jeweiligen Erweich- bzw. Schmelzereignisse.

Zusammenfassend kann folgende Interpretation der Ergebnisse für die gegenständlichen Rezepturen abgeleitet werden:

1. ZB: Höchste T_{HK}/T_F weisen auf ein dichtes Netzwerk und einen verzögerten Viskositätsabfall im Hochtemperaturbereich hin.
2. KMF-MAS: Gute Hochtemperaturwerte, jedoch potenziell stärkere Streuungen aufgrund einer inhomogenen Faser-/Feinstpartikelverteilung als signifikanter Einflussfaktor.
3. LD: Niedrigere T_{HK}/T_F deuten auf eine frühere Erweichung hin, die sich auf die grundsätzlich andere Mikrostruktur aufgrund des höheren Ca-Gehalts und der dadurch bedingten höheren Integration von Hydroxidionen in der Struktur zurückzuführen ist.

4.2 Simultane Thermische Analyse

In Abb. 3 werden die gegenständlichen Ergebnisse der simultanen thermischen Analyse für die ZB-Probe als Massenverlust in % (TG-Kurve) und als Wärmefluss in Milliwatt je Milligramm (mW mg^{-1}) dargestellt.

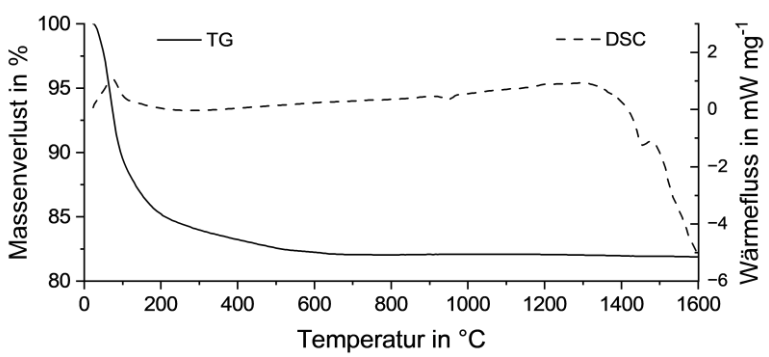


Abb. 3: STA-Diagramm der ZB-Probe, Darstellung von Massenverlust (TG-Kurve) und Wärmefluss (DSC-Kurve) bei 10 K min^{-1} Heizrate unter Luft

Entsprechend der gegenständlichen Analyse ergeben sich folgende Ergebnisableitungen. Typische TG/DSC-Signaturen metakaolinbasierter Geopolymere umfassen eine Dehydratisierung zwischen 50 °C bis 200 °C sowie Kondensationsreaktionen und Netzwerkverdichtungen von 200 °C bis 450 °C. Ab Temperaturen von 750 °C bis 1000 °C finden exotherme Kristallisationen statt, mit schwachen exothermen Beiträgen oberhalb von 1100 °C im Vorfeld der Schmelzphase. (He, Dai, & Wang, 2020). Der Abstand zwischen DSC-Onset und T_{Erw} aus der Erhitzungsmikroskopie liegt bei etwa 40 K bis 90 K.

4.3 Einordnung im Kontext von Hochtemperaturanwendungen

Die Ergebnisse bestätigen in erster Näherung das Potenzial reststoffbasierter Geopolymere für Hochtemperaturanwendungen. Die ZB-haltige Mischung erscheint besonders vielversprechend. KMF-MAS ist leistungsfähig, erfordert jedoch eine gezielte Homogenisierung zur Reduktion der Streuung. LD weist im Vergleich zu anderen Materialien geringere charakteristische Temperaturen auf, die Flächenänderung fällt jedoch am geringsten aus. Für eine eindeutige Identifikation der Reaktionen sind STA-Messungen aller Rezepturen sowie deren vollständige Auswertung erforderlich. Darauf aufbauend erfolgen die Validierung der Einflussfaktoren und die Ableitung belastbarer Designkriterien.

5 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Die Kopplung von Erhitzungsmikroskopie und STA erweist sich als praxistaugliche Analysekette zur Rezepturevaluation reststoffbasierter Geopolymere für Hochtemperaturanwendungen, da charakteristische Temperaturen gezielt mit Massen- und Wärmeereignissen verknüpft werden können. ZB erreicht die höchsten Erweichungs-, Halbkugel- und Fließtemperaturen und weist damit die beste Hochtemperaturstabilität im Untersuchungsset auf, gefolgt von KMF-MAS. LD liegt deutlich niedriger und zeigt eine frühere Erweichung. Reststoffbasierte Geopolymere können als ergänzende Binder- und Matrixsysteme zur Ressourcenschonung und CO_2-Minderung beitragen, wenn Rezeptur und Anwendung gezielt aufeinander abgestimmt werden.

Als Ausblick sind kurzfristig identische STA-Analysen für LD und KMF/MAS sowie Wiederholungsmessungen vorgesehen, um die Korrelation zwischen STA-Peaklagen und dem Hochtemperaturverhalten zu validieren. In der Rezepturentwicklung werden die Zusammensetzungen systematisch variiert und das ΔT (DSC-Onset ↔ T_{Erw}) als Qualitätsindikator im Screening verwendet. Für den Transfer und die Skalierung bildet die methodische Abfolge die Grundlage für die Ableitung belastbarer Gestaltungskriterien und deren Validierung im industriellen Kontext. Das Vorhaben ist im FFG-Projekt MINREC-HT verankert und adressiert die Inwertsetzung mineralischer Reststoffe als Geopolymerbaustoff für Hochtemperaturanwendungen.

LITERATURVERZEICHNIS

Abdel-Aziem, A., Ewais, E., El-Gamal, S., & Meawad, A. (2021). Possibility of Using Material Activated with Alkali as a Binder for Refractory Concretes. *Refractories and Industrial Ceramics*, 404-410.

Bezerra, B., & Luz, A. (2024). High-alumina refractory castables bonded with metakaolin-based geopolymers prepared with different alkaline liquid reagents. *Ceramics International*, 18628–18637.

Brandl, J. (2025). *Thermische Beständigkeit von reststoffbasierten Geopolymeren.* Leoben: Montanuniversität Leoben.

IEA. (2020). *Energy Technology Perspectives 2020.* Von https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020 abgerufen

Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 40-48.

Provis, J. L., & van Deventer, J. S. (2014). *Alkali Activated Materials - State-of-the-Art-Report, RILEM TC 224-AAM.* Springer Dordrecht.

Ratz, B., Steindl, F. R., Amr, H., Radinger, S., Raič, S., Sedlazeck, K. P., & Cyrill, G. (2025). Evaluation of mineral waste streams for alkali-activated materials: Reactivity and utilization potential. *Journal of Building Engineering*, 114705.

DANKSAGUNG

Diese Studie wurde im Rahmen des Christian-Doppler-Labors für geopolymere Baustoffe auf Abfallbasis in der CO_2-neutralen Kreislaufwirtschaft ($GECCO_2$) durchgeführt. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Die mitfinanzierenden Industriepartner sind die ÖBB Infrastruktur AG, die voestalpine Stahl Donawitz GmbH, die RHI Magnesita GmbH, die Kirchdorfer Fertigteilholding GmbH, die Brantner green solutions GmbH, die Initiative Ziegel, der Forschungsverein der Stein- und Keramikindustrie, die Gemeinschaft Steirischer Abwasserentsorger (GSA), die MM-Kanalrohr-Sanierung GmbH und die CharLine GmbH.

Das Projekt MINREC-HT wird im Rahmen der nationalen Ausschreibung Ressourcenwende 2025 vom Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) gefördert. Die Abwicklung erfolgt durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG). FFG-Projektdatenbank: https://projekte.ffg.at/projekt/5145339

KONTAKT

DI Dr.mont. Klaus Doschek-Held, BSc
Klaus.Doschek-Held@unileoben.ac.at
+43 3842 402 5831
Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik
Montanuniversität Leoben
https://pure.unileoben.ac.at/de/persons/klaus-doschek-held/

Kreislaufwirtschaftliche Herstellung löslicher Alkalisilikate aus SiO_2-reichen Abfällen

Cyrill Grengg[1], Florian R. Steindl[1,2], Sara Raič[1] & Martin Dietzel[1]
[1)] CD-Labor für reststoffbasierte Geopolymerbaustoffe $GECCO_2$, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Graz, Österreich
[2)] Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, Technische Universität Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Die Herstellung löslicher Alkalisilikate aus silikatreichen mineralischen Reststoffen stellt einen vielversprechenden Ansatz zur hochwertigen kreislaufwirtschaftlichen Verwertung mineralischer Abfälle sowie zur Entwicklung energieeffizienter Herstellungsverfahren für alkalische Aktivatoren dar. Der vorliegende Beitrag untersucht zwei energiearme Syntheserouten zur Herstellung reststoffbasierter Alkalisilikate – die hydrothermale Synthese von Wassergläsern sowie die thermochemische Synthese pulverförmiger Natriumsilikate – exemplarisch anhand eines silikatreichen Feuerfest-Reststoffs. Die Ergebnisse zeigen, dass die mineralogische Zusammensetzung des SiO_2-Trägers im jeweiligen Reststoff den hydrothermalen Silikataufschluss wesentlich kontrolliert, während bei der thermochemischen Synthese zusätzlich das molare SiO_2/Na_2O-Verhältnis (M_S Modul) die Phasenbildung steuert. Die hohe chemische Reaktivität der enthaltenen SiO_2-Hochtemperaturmodifikationen ermöglicht bereits unter moderaten hydrothermalen Bedingungen (140°C, 3 bar) die Herstellung von Aktivatorlösungen mit M_S-Werten von 1,5 bis 1,7 und Feststoffgehalten bis 44 Gew.-%, die hinsichtlich ihrer Eigenschaften kommerziellen Natriumwassergläsern entsprechen. Bei der thermochemischen Synthese wurden im M_S-Bereich von 0,9 bis 1,0 maximale Anteile reaktiver Natriummetasilikate sowie eine nahezu vollständige Umsetzung der SiO_2-Hochtemperaturmodifikationen erreicht. Erste Anwendungstests in alkalisch aktivierten Bindemittelsystemen bestätigen die grundsätzliche Eignung der entwickelten Aktivatoren als Ersatz kommerzieller Wassergläser.

1 LÖSLICHE SILIKATE ALS SCHLÜSSELKOMPONENTE KREISLAUFFÄHIGER ALKALISCH AKTIVIERTER BINDEMITTELSYSTEME

Lösliche Alkalisilikate zählen zu den wichtigsten anorganischen Grundchemikalien und werden seit Jahrzehnten in zahlreichen industriellen Anwendungen eingesetzt. Neben ihrer Verwendung als Bindemittel, Klebstoffe und Imprägniermittel besitzen sie insbesondere in der Bau- und Feuerfestindustrie eine hohe Bedeutung, beispielsweise als Komponenten feuerfester Bindemittelsysteme, Beschichtungen und Gießmassen [1]. Aufgrund ihrer hohen Alkalität und der Bereitstellung reaktiver Silikatspezies stellen lösliche Alkalisilikate in Form von Wassergläsern und/oder Natriumsilikaten zudem die am häufigsten eingesetzten Aktivatoren für alkalisch aktivierte Bindemittel und Baustoffe dar [2].
Mit dem zunehmenden Interesse an CO_2-ärmeren Alternativen zu Portlandzement gewinnen alkalisch aktivierte Materialien (AAMs), speziell wenn aus Sekundärrohstoffen hergestellt, als kreislauffähige Bindemittelsysteme zunehmend an Bedeutung [3]. Die in diesen Baustoffsystemen eingesetzten alkalischen Aktivatoren kontrollieren maßgeblich die Reaktionskinetik sowie die mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaften der Bindemittel. Gleichzeitig stellen alkalische Aktivatoren aufgrund ihrer energieintensiven und oftmals aufwendigen Produktion den kosten- und emissionsintensivsten Bestandteil von AAMs dar [4].
Vor diesem Hintergrund rückt die Entwicklung alternativer Aktivatoren aus silikatreichen Reststoffen zunehmend in den Fokus aktueller Forschung. Als potenzielle SiO_2-Quellen werden unter anderem Altglas, amorphe Kieselsäuren, Biomasseaschen sowie weitere industrielle Reststoffe untersucht [5]. Zur Herstellung reststoffbasierter Wassergläser wurden bislang vor allem hydrothermale, thermochemische und Schmelzverfahren beschrieben.

Dieser Beitrag untersucht das Potential von regionalen, silikatreichen Reststoffen zur Herstellung löslicher Alkalisilikate mittels energieeffizienter hydrothermaler und thermochemischer Verfahren, sowie die Bewertung ihrer grundsätzlichen Eignung als Aktivatoren für alkalisch aktivierte Bindemittel.

2 HERSTELLUNG RESTSTOFFBASIERTER LÖSLICHER ALKAISILIKATE

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Niedrigenergie-Syntheserouten untersucht: die hydrothermale Herstellung von Wassergläsern für Zwei-Komponenten Bindemittelsysteme sowie die thermochemische Herstellung pulverförmiger Natriumsilikate für Ein-Komponenten-Systeme (Abb. 1). Als SiO_2-Quellen wurden ein silikatreicher Feuerfest-Reststoff, Altglas und Glaswolle untersucht. Die nachfolgenden Ergebnisse werden exemplarisch am Feuerfest-Reststoff dargestellt, dessen chemische und insbesondere mineralogische Zusammensetzung eine grundsätzliche und detaillierte Analyse der maßgeblichen Synthese- und Reaktionsmechanismen ermöglicht.

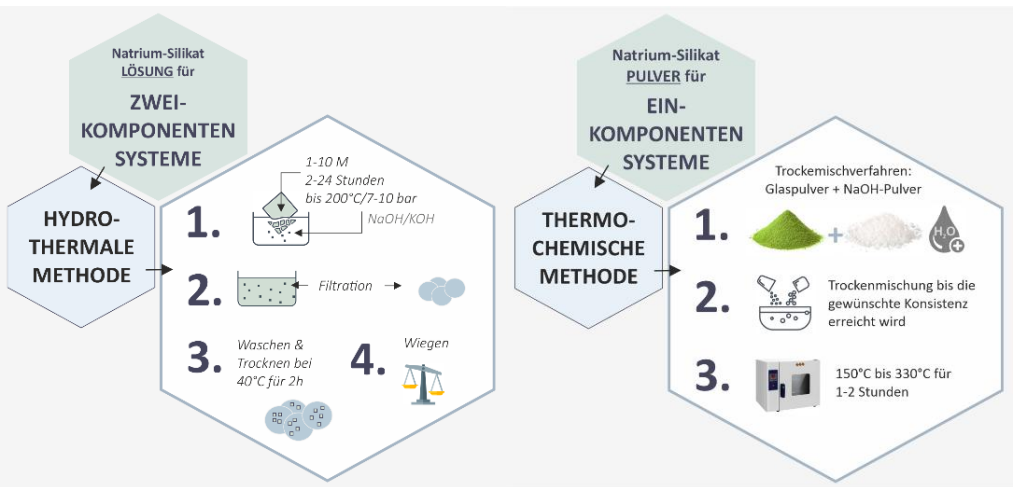


Abb. 1: Schematische Darstellung der untersuchten Niedrigenergie-Syntheserouten zur Herstellung reststoffbasierter Alkalisilikate. Links: thermochemische Fest-Fest-Synthese pulverförmiger Natriumsilikate für Ein-Komponenten-Systeme. Rechts: hydrothermale Herstellung (flüssiger) Wassergläser für Zwei-Komponenten-Systeme.

2.1 Materialcharakterisierung

Der untersuchte silikatreiche Feuerfest-Reststoff weist mit 95,4 Gew.-% SiO_2 einen außerordentlich hohen SiO_2-Gehalt auf. Als Nebenbestandteile wurden lediglich geringe Gehalte an CaO (2,7 Gew.-%), Al_2O_3 (1,0 Gew.-%) und Fe_2O_3 (0,6 Gew.-%) mittels Röntgenfluoreszenzanalyse nachgewiesen.
Die quantitative mineralogische Analyse mittels Röntgendiffraktometrie und Rietveld-Verfeinerung zeigt, dass der Reststoff überwiegend aus den SiO_2-Hochtemperaturmodifikationen Cristobalit (41,1 Gew.-%) und Tridymit (39,5 Gew.-%) besteht. Darüber hinaus wurden ein Gehalt an amorphen Komponenten von 16,6 Gew.-%, geringe Anteile an Pseudowollastonit (2,5 Gew.-%) sowie lediglich Spuren von Quarz (0,3 Gew.-%) nachgewiesen.

2.2 Thermochemische Synthese

Für die thermochemische Herstellung pulverförmiger Aktivatoren wurden die getrockneten Reststoffe mit gemahlenem Natriumhydroxid entsprechend definierter SiO_2/Na_2O-Verhältnisse trocken homogenisiert. Nach Zugabe geringer Wassermengen zur Herstellung einer homogenen feuchten Reaktionspaste erfolgte die thermische Umsetzung bei 200 °C. Aufbauend auf Voruntersuchungen und Literaturdaten wurden breite Modulbereiche untersucht, um den Einfluss des SiO_2/Na_2O-Verhältnisses auf die Bildung reaktiver Natriumsilikatphasen zu erfassen. Die theoretischen M_S-Werte der Versuchsreihen deckten einen Bereich von 0,3 bis 2,8 ab und umfassten damit sowohl Na_2O-reiche als auch SiO_2-reiche Systeme. Die mineralogische Phasenzusammensetzung wurde mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) untersucht. Die quantitative Bestimmung kristalliner und amorpher Phasen erfolgte mittels Rietveld-Verfeinerung unter Verwendung von HighScore Plus und der ICSD-Datenbank.

2.3 Hydrothermale Synthese

Die hydrothermalen Synthesen wurden in 120-mL-Edelstahlreaktoren durchgeführt. Ziel der Synthese war die Herstellung von Aktivatorlösungen mit M_S zwischen 1,5 und 1,7 sowie Feststoffgehalten von mindestens 40 Gew.-%, um kommerziell verfügbare Wassergläser für alkalisch aktivierte Bindemittel nachzubilden. Hierzu wurden die SiO_2-reichen Reststoffe mit Natriumhydroxid-Lösungen unterschiedlicher Konzentration (3–10 $mol \cdot L^{-1}$) versetzt und mit 60 mL deionisiertem Wasser angemischt. Anschließend erfolgte die Umsetzung bei Temperaturen zwischen 140 und 180 °C über Reaktionszeiten von 1 bis 5 Stunden unter autogenem Druck (3 - 10 bar). Nach der Reaktion wurden die Suspensionen filtriert und die erhaltenen Aktivatorlösungen hinsichtlich M_S-Wert und Feststoffgehalt charakterisiert.

3 EIGENSCHAFTEN DER SYNTHETISIERTEN AKTIVATOREN

3.1 Thermochemische Synthese – Einfluss des Si/Na-Verhältnisses auf die Phasenumwandlungen

Die thermochemische Umsetzung des SiO_2-reichen Feuerfest-Reststoffs zeigt einen deutlichen Einfluss des M_S-Wertes auf die Phasenumwandlung und bestätigt dessen Rolle als zentralen Prozessparameter für eine ertragreiche Synthese reaktiver Feststoffaktivatoren (Abb. 2). Bereits bei hohen Modulen (M_S = 2,0) erfolgt eine deutliche Umwandlung der ursprünglich vorliegenden kristallinen SiO_2-Modifikationen Cristobalit und Tridymit in überwiegend amorphe Natriumsilikatphasen. Mit abnehmendem Modul steigt der Umsetzungsgrad weiter an und die Bildung kristalliner Natriumsilikate nimmt deutlich zu. Im Modulbereich $M_S \approx 0{,}9–1{,}0$ werden die höchsten Anteile an Natriumsilikaten [Dinatriumsilikat (Na_2SiO_3) und Natrosilit ($Na_2Si_2O_5$)] erreicht, während der amorphe Anteil gleichzeitig sein Minimum aufweist. Dieses Verhalten entspricht den in der Literatur beschriebenen Reaktionsmechanismen thermochemischer Aktivatorsynthesen. Bereits Vinai und Soutsos [6] konnten zeigen, dass insbesondere das SiO_2/Na_2O-Modul neben Reaktionstemperatur und Wassergehalt die Ausbildung reaktiver kristalliner und amorpher Natriumsilikatphasen maßgeblich steuert und damit einen entscheidenden Einfluss auf die spätere Aktivatorleistung besitzt [7]. Der beobachtete optimale Modulbereich um $M_S \approx 1$ korreliert dabei mit der stöchiometrischen Zusammensetzung von Natriummetasilikat (Na_2SiO_3) und stellt somit die bevorzugte Bildungszone reaktiver Metasilikate dar.

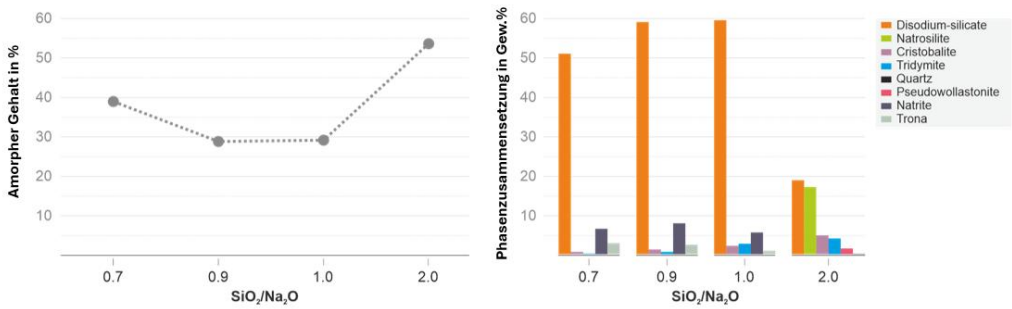


Abb. 2: Einfluss des SiO_2/Na_2O-Moduls auf die Phasenumwandlung des thermochemisch aktivierten Feuerfest-Reststoffs. Links: Entwicklung des amorphen Gehalts in Abhängigkeit vom Modul. Rechts: Quantitative Phasenzusammensetzung der Syntheseprodukte

Von den ursprünglichen kristallinen Phasen des Feuerfest-Reststoffs verbleiben im optimalen Modulbereich lediglich geringe Restgehalte an Cristobalit und Tridymit, was auf nahezu vollständige Transformationsraten dieser reaktiven SiO_2-Modifikationen hinweist. Im Gegensatz dazu bleibt Quarz über den gesamten untersuchten Modulbereich weitgehend unverändert erhalten. Dieses Verhalten verdeutlicht die signifikant geringere Reaktivität von Quarz unter den gewählten Synthesebedingungen und unterstreicht, dass nicht allein der Gesamt-SiO_2-Gehalt, sondern insbesondere die Art der vorhandene SiO_2-Polymorphe (oder generell der Bindungsarten von SiO_2 im Reststoff) die thermochemische Bildung reaktiver Natriumsilikate bestimmt. Die Ergebnisse zeigen somit, dass sowohl die Auswahl geeigneter Reststoffe als auch die Einstellung eines materialabhängigen optimalen SiO_2/Na_2O-Moduls entscheidend für die Entwicklung leistungsfähiger Feststoffaktivatoren sind.
Die vorliegenden Ergebnisse decken sich im Wesentlichen mit den für Altglas- und Glaswollebasierte Aktivatoren beobachteten Reaktionspfaden [8], wobei die optimalen Umwandlungsfenster und absoluten Umwandlungsraten nicht universell sind, sondern in Abhängigkeit der jeweiligen chemischen und mineralogischen Zusammensetzung zwischen einem M_S von 0.8 und 1.1 variieren.

3.2 Einfluss der Syntheseparameter auf die Herstellung flüssiger Aktivatoren

Aufgrund der hohen chemischen Reinheit und der Dominanz reaktiver SiO_2-Hochtemperaturmodifikationen konnte der untersuchte Feuerfest-Reststoff bereits unter vergleichsweise moderaten hydrothermalen Bedingungen nahezu vollständig umgesetzt werden. Die Auflösung von Cristobalit und Tridymit erfolgte bereits bei 140 °C und autogenen Drücken von etwa 3 bar, sodass eine Erhöhung der Synthesetemperatur auf 160 bzw. 180 °C keinen wesentlichen zusätzlichen Silikataufschluss bewirkte. Ebenso zeigten Partikelgröße und Reaktionsdauer innerhalb der untersuchten Versuchsbereiche keinen signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften der erzeugten Aktivatorlösungen. Demgegenüber erwies sich die Alkalinität als maßgeblicher Prozessparameter; bereits NaOH-Konzentrationen ≥ 5 $mol \cdot L^{-1}$ ermöglichten eine nahezu vollständige Umsetzung der reaktiven SiO_2-Phasen. Dieses Verhalten unterscheidet sich grundlegend von quarzdominierten Rohstoffen, bei denen Temperatur, Korngröße und Reaktionsdauer den Silicaaufschluss wesentlich mitbestimmen.
Unter optimierten Synthesebedingungen konnten Aktivatorlösungen mit SiO_2/Na_2O-Modulen von 1,6 bis 1,7 und Feststoffgehalten bis 44 Gew.-% hergestellt werden und erreichten damit Kenngrößen, die mit kommerziellen Natriumwassergläsern vergleichbar sind (Abb. 3). Der M_S Modul ließ sich gezielt über das eingesetzte SiO_2/Na_2O-Verhältnis einstellen, während der maximal erreichbare Feststoffgehalt unmittelbar den Aufschlussgrad des eingesetzten Reststoffs widerspiegelt. Die Ergebnisse belegen, dass der untersuchte Feuerfest-Reststoff aufgrund seiner chemischen und mineralogischen Zusammensetzung eine geeignete sekundäre SiO_2 Quelle für die

energiearme hydrothermale Herstellung leistungsfähiger Wassergläser darstellt. Vergleichbare Zusammenhänge wurden im Rahmen des Gesamtprojekts auch für Altglas und Glaswolle beobachtet, wobei die jeweils erreichbaren Modul- und Feststoffbereiche maßgeblich von der chemischen und insbesondere der mineralogischen Zusammensetzung des jeweiligen Reststoffs bestimmt werden.

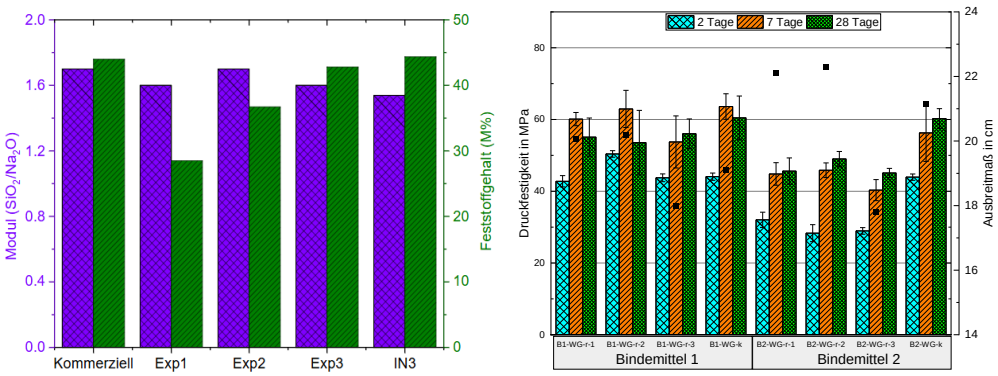


Abb. 3: links: Vergleich des SiO_2/Na_2O-Moduls und des Feststoffgehalts hydrothermal synthetisierter Wassergläser (EXP1 – EXP3, IN3) aus silikatreichem Feuerfest-Reststoff mit einem kommerziellen Natriumwasserglas. Rechts: Druckfestigkeitsentwicklung zweier alkalisch aktivierter Bindemittelsysteme unter Verwendung hydrothermal synthetisierter, reststoffbasierter Wassergläser (WG-r) im Vergleich zu einem kommerziellen Natriumwasserglas (WG-k). Bindemittel 1: BOF-Schlacke/Metakaolin; Bindemittel 2: EAF-Schlacke/Metakaolin.

4 PERFORMANCE DER RESTSTOFFBASIERTEN AKTIVATOREN FÜR ALKALISCH AKTIVIERTE BINDESTOFFE

Zur Bewertung der Funktionalität wurden ausgewählte hydrothermal synthetisierte Wassergläser in zwei alkalisch aktivierten Bindemittelsystemen untersucht. Hierzu wurden kommerzielle Natriumwassergläser vollständig durch reststoffbasierte Aktivatorlösungen ersetzt, während Bindemittelzusammensetzung, Wassergehalt und sämtliche weiteren Mischungsparameter unverändert beibehalten wurden. Als Modellbindemittel dienten ein Konverter-Schlacke/Metakaolin-System (Bindemittel 1) sowie ein EAF-Schlacke/Metakaolin-System (Bindemittel 2).
Im Konverter-Schlacke-basierten Bindemittelsystem zeigten die reststoffbasierten Wassergläser eine mit dem kommerziellen Referenzprodukt vergleichbare Verarbeitbarkeit sowie Druckfestigkeitsentwicklung nach 2, 7 und 28 Tagen (Abb. 3). Die Ergebnisse belegen, dass die hydrothermal synthetisierten Aktivatoren trotz ihrer Herstellung aus Sekundärrohstoffen eine gleichwertige Aktivierungswirkung entfalten.
Auch im EAF-basierten Bindemittelsystem konnten mit den reststoffbasierten Aktivatoren hohe Druckfestigkeiten erzielt werden. Im Vergleich zum Referenzsystem wurden jedoch geringfügig reduzierte mechanische Eigenschaften bei jedoch gleichzeitig leicht verbesserter Verarbeitbarkeit beobachtet. Dies weist darauf hin, dass die entwickelten Aktivatorlösungen bereits eine hohe Leistungsfähigkeit besitzen, hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und rheologischen Eigenschaften jedoch noch Optimierungspotenzial aufweisen, um eine Gleichwertigkeit mit kommerziellen Wassergläsern zu erreichen.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass SiO_2-reiche Feuerfest-Reststoffe aufgrund ihrer chemischen Reinheit und der Dominanz reaktiver SiO_2-Hochtemperaturmodifikationen eine hochwertige sekundäre SiO_2-Quelle für die energiearme Herstellung löslicher Alkalisilikate darstellen. Sowohl die hydrothermale als auch die thermochemische Syntheseroute ermöglichen die Herstellung leistungsfähiger Aktivatoren mit Eigenschaften, die für den Einsatz in alkalisch aktivierten Bindemittelsystemen geeignet sind.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Herstellung leistungsfähiger reststoffbasierter Aktivatoren maßgeblich durch das Zusammenspiel von Rohstoffmineralogie und Prozessführung bestimmt wird. Eine maximale Umsetzung des enthaltenen SiO_2 erfordert eine an die chemische und insbesondere mineralogische Zusammensetzung des jeweiligen Reststoffs angepasste Prozessführung. Vergleichbare Reaktionsmechanismen wurden auch für Altglas und Glaswolle beobachtet. Die Untersuchungen zeigen damit, dass die entwickelten Synthesekonzepte grundsätzlich auf weitere silikatreiche Sekundärrohstoffe übertragbar sind, wobei die optimalen Syntheseparameter von der chemischen und insbesondere der mineralogischen Zusammensetzung des jeweiligen Ausgangsmaterials abhängen.

Erste Anwendungstests bestätigen die grundsätzliche Eignung der entwickelten löslichen Alkalisilikate als Ersatz kommerzieller Aktivatoren in alkalisch aktivierten Bindemittelsystemen.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] E.C.I. Council, SOLUBLE SILICATES - Chemical, toxicological, ecological and legal aspects of production, transport, handling and application, 2014. www.cees-silicates.eu.

[2] L. Rossi, L.M. de Lima, Y. Sun, F. Dehn, J.L. Provis, G. Ye, G. De Schutter, Future perspectives for alkali-activated materials: from existing standards to structural applications, RILEM Tech. Lett. 7 (2022) 159–177. https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.160.

[3] C. Grengg, O. Rudic, M.R.M. Saade, F. Steindl, M. Wilkening, A. Jodlbauer, I. Zoegl, D. Wohlmuth, F. Mittermayr, Alkali activated steel slag – oil composites: Towards resource efficiency and CO2 neutrality, Cem. Concr. Res. 186 (2024) 107678. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107678.

[4] M. Nikravan, R. Firdous, D. Stephan, Life cycle assessment of alkali-activated materials: a systematic literature review, Low-Carbon Mater. Green Constr. 1 (2023) 1–24. https://doi.org/10.1007/s44242-023-00014-6.

[5] M.F. Alnahhal, T. Kim, A. Hajimohammadi, Waste-derived activators for alkali-activated materials: A review, Cem. Concr. Compos. 118 (2021) 103980. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103980.

[6] R. Vinai, M. Soutsos, Production of sodium silicate powder from waste glass cullet for alkali activation of alternative binders, Cem. Concr. Res. 116 (2019) 45–56. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.008.

[7] T. Luukkonen, Z. Abdollahnejad, J. Yliniemi, P. Kinnunen, M. Illikainen, Comparison of alkali and silica sources in one-part alkali-activated blast furnace slag mortar, J. Clean. Prod. 187 (2018) 171–179. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.202.

[8] C. Raič, S.; Steindl, F. R.; Dietzel, M.; Grengg, On the synthesis parameters of alkaline activators from silica-rich mineral wastes., Submitted. (2026).

Neue Verfahrensansätze zur Verwertung von Stahlwerksschlacken

Sebastian Keber[1]
[1)] TU Clausthal, Institute of Geotechnology and Mineral Resources, Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

KURZFASSUNG: Jährlich fallen große Mengen an Eisenhüttenschlacken an, die bislang nur teilweise stofflich genutzt werden. Neben Eisen enthalten sie relevante Mengen an Chrom, Mangan und teilweise Vanadium, dessen Rückgewinnung ein bislang ungenutztes Wertstoffpotenzial darstellt. Zugleich erschweren hohe Chromgehalte und die Anforderungen der Ersatzbaustoffverordnung eine Verwertung als Baustoff oder Zementrohstoff. Vorgestellt werden drei Verfahrensansätze: die direkte mechanische Aufbereitung gut separierbarer Schlacken, die Reduktion und anschließende Trennung metallreicher Fraktionen sowie das Konzept „Engineering of Artificial Minerals“ (EnAM), bei dem die Schlackenzusammensetzung bereits im flüssigen Zustand gezielt beeinflusst wird. Letzteres erscheint besonders vielversprechend, da es sowohl die Bildung separierbarer Phasen als auch die Rückgewinnung von Wertmetallen verbessert.

1 EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund der aktuellen Entwicklungen in der Stahlindustrie hin zu CO_2-neutralen Prozessen, entstehen neue Herausforderungen bei der Aufbereitung und Verwertung der anfallenden Schlacken. 2024 fielen in Deutschland 11,9 Millionen Tonnen Eisenhüttenschlacken an (FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V. , 2024). Diese Schlacken kommen für unterschiedliche Anwendungen zum Einsatz oder werden deponiert. Neben der Ca-/Si-Fraktion enthalten die bisher minderwertig als Ersatz- oder Deponiebaustoffe genutzten Stahlwerkschlacken größere Mengen an Eisen, Chrom, Mangan und zum Teil Vanadium. Insbesondere das in Eisenerzen enthaltene Vanadium stellt ein relevantes, noch ungenutztes Wertstoffpotential dar. Bei der Untersuchung von LD-Konverter-Schlacken konnten Vanadiumgehalte von ca. 2 % beobachtet werden (Wunderlich, 2026). Ferner stellt die 2023 in Deutschland in Kraft getretene Ersatzbaustoffverordnung neue Anforderungen an die Verwertung der Stahlwerksschlacken.

Aktuell verfolgen mehrere Projekte an der TU Clausthal verschiedene Ansätze für eine verbesserte Verwertung von Stahlwerksschlacken. Bei der Aufbereitung der Schlacken werden verschiedene Ziele verfolgt:

- Rückführung des enthaltenen Eisens in die Stahlerzeugung
- Gewinnung von chrom-, nickel-, mangan- und vanadiumreichen Konzentraten zur Rückgewinnung dieser Elemente
- Herstellung einer schadstoffentfrachteten Mineralikfraktion als Einsatzstoff in der Zementindustrie oder zum Einsatz als Ersatzbaustoff

Das Erreichen dieser Ziele stellt eine große Herausforderung dar, da Wert- und Schadstoffe häufig fein verteilt in den Schlacken vorliegen. Aufgrund der hohen Anforderungen, die die Ersatzbaustoffverordnung (EBV) stellt, wird in den Projekten aktuell der Einsatz im Rohmehl bei der Zementherstellung favorisiert. Nach heutigem Stand gibt es allerdings in Deutschland keine direkt anwendbare Norm oder Verordnung zum Einsatz der Schlacken im Rohmehl, sodass hier Einzelfallentscheidungen mit den einzelnen Zementwerken vonnöten sind. Orientierung sind in Tabelle 1 Grenzwerte für den Einsatz in der Zementklinkerproduktion der Cemex OstZement GmbH, sowie der Einsatz von Abfällen als Rohmaterial und Rohmehlkorrekturstoff der Schweizer „Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA)“ gegeben. Eine Richtlinie, die angewandt werden könnte, stellt die DAfStb-Richtlinie „Verwendung von siliziumreicher Flugasche und Kesselsand in Betonbauteilen in Kontakt mit Boden, Grundwasser oder Niederschlag“ dar.

Tab. 1: Grenzwerte für den Einsatz im Zement

Element	Grenzwert in ppm Cemex[1] (Breitenstein, 2017)	Schweizer VVEA (Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen, 2025)
Antimon	-	30
Arsen	-	30
Blei	350	500
Cadmium	-	5
Cobalt	50	250
Chrom	350	500
Kupfer	750	500
Nickel	100	500
Quecksilber	-	1
Thallium	-	3
Zink	-	2000
Zinn	-	100

[1)] Stand 2014

Bei der Verwertung der Schlacken im Rohmehl stellt sich insbesondere Chrom als problematisch dar, da die Chromgehalte der unaufbereiteten Rohschlacken je nach Art und Ausgangsstoffen (Herkunft der Erze, Stahlschrottsorten) mit Werten von 2000 ppm bis 5000 ppm teils mehr als das 10-fache des Grenzwertes erreichen können.

2 VERFAHRENSANSÄTZE

Für die Verringerung der Chromkonzentration und die Herstellung von Konzentraten zur Wertstoff Rückgewinnung werden verschiedene Verfahrensansätze verfolgt.

2.1 Direkte Aufbereitung

Eine direkte Aufbereitung der Schlacken, wie sie heute bereits anfallen, ist nur bei Schlacken möglich, die eine gute Aufbereitbarkeit zeigen. Voraussetzung ist ein Auftreten der Zielelemente wie Chrom und Vanadium, in spezifischen Phasen, sowie eine ausreichende Korngröße dieser. Erste Ergebnisse aus dem Projekt Aschen-Aufbereitung (BMFTR, 033R418E) zeigen, dass diese bei den untersuchten Pfannenofenschlacken der Fall sein könnte. Abbildung 1 zeigt, die Korrelation zwischen Eisen und Chrom bei Separationsversuchen, die mittels Davis-Tube durchgeführt wurden.

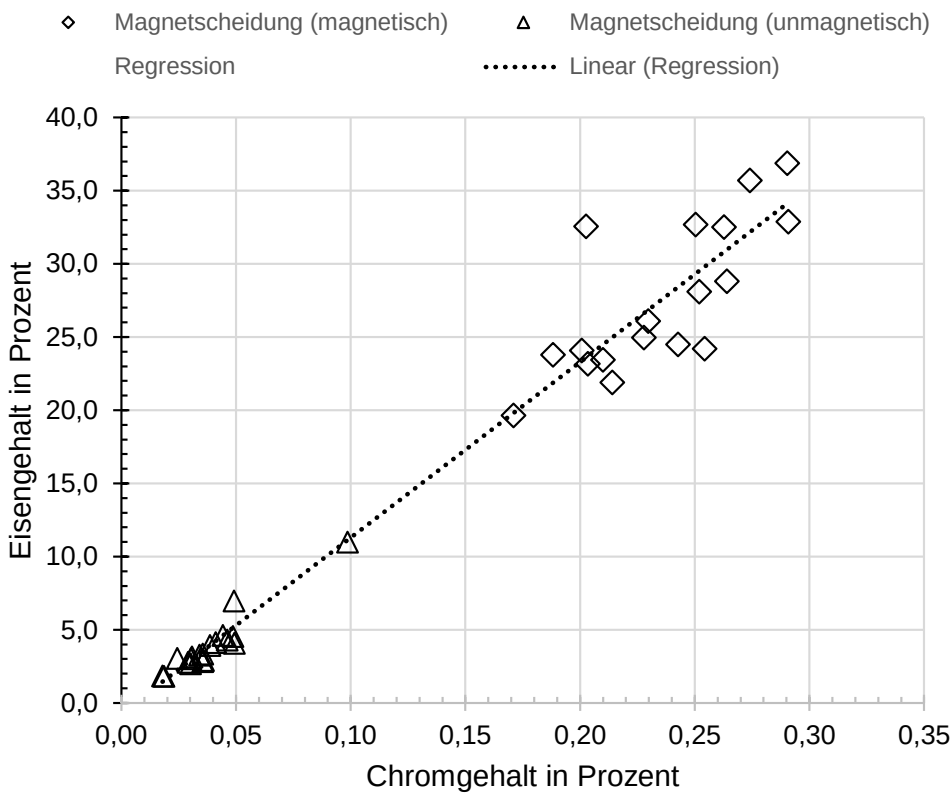


Abb. 1: Korrelation zwischen Eisen und Chrom bei der untersuchten Pfannenofenschlacke

Chrom tritt in der Schlacke in Verbindung mit Eisen auf und lässt sich mittels Magnetscheidung gut separieren. Im Rückstand konnten Chromgehalte bestimmt werden, die im Bereich der Grenzwerte liegen, diese aber zum Teil noch übersteigen. Aktuell wird die Optimierung der Magnetscheidung, zum Beispiel durch die Anpassung der vorhergehenden Mahlung, untersucht.

2.2 Reduktion der Schlacken

Dieser Ansatz zur Reduktion der Schlacken wird im Projekt KLASSE (BMWE, 03EI5040E) an Schlacken aus dem Elektrolichtbogenofen (EAF) untersucht. Vor der Reduktion der Schlacken soll zunächst versucht werden, mittels Magnet- und Dichtescheidung eine Metallentfrachtete Fraktion zum direkten Einsatz als Baustoff zu gewinnen. Aufgrund des hohen Verwachsungsgrades der Schlacken und der damit verbundenen geringen Partikelgrößen nach dem Aufschluss der Schlacken, wird auch die Flotation in Betracht gezogen. Die metallreiche Fraktion, insbesondere reich an Eisen, wird einer Direktreduktion mittels Wasserstoffes unterzogen. Eisen soll im Anschluss mittels Magnetscheidung von den vanadium-, chrom und manganreichen Phasen getrennt und wieder im EAF zur Stahlgewinnung eingesetzt werden. Die anderen Metalle sowie Mangan sollen hingegen Hydrometallurgisch getrennt werden.

2.3 Engineering of Artificial minerals (EnAM)

Der EnAM-Ansatz verfolgt das Ziel, Metalle wie Chrom und Vanadium in der noch flüssigen Schlacke durch Beeinflussung dieser in gut separierbaren Phasen zu konzentrieren. Dazu sollen Zuschlagmittel eingesetzt werden, die die Bildung der gewünschten Phasen unterstützen oder ermöglichen. Durch eine gezielte Abkühlung der Schlacken können die Korngrößen der Phasen beeinflusst werden. Im Anschluss sollen mittels mechanischer Aufbereitungsverfahren wie Magnetscheidung und Flotation Konzentrate hergestellt werden, die dann hydrometallurgischen zu Endprodukten aufgereinigt werden.
Dieser Ansatz verspricht eine möglichst vollständige Verwertung der Schlacken und vor allem auch die Rückgewinnung von Vanadium, das bisher verloren gegangen ist, da nicht nur die Aufbereitung der Schlacken angepasst werden kann, sondern auch die Schlacken für eine gute Aufbereitbarkeit modifiziert werden. Allerdings ist dazu bei einem industriellen Einsatz eine verfahrenstechnische Änderung direkt bei der Stahlerzeugung vonnöten. Ein erneutes Ausschmelzen der Schlacken ist sehr energieintensiv und damit unwirtschaftlich.
Der EnAM-Ansatz wurde bereits für Schacken aus dem Recycling von Lithium-Ionen-Batterien erforscht und hat gute Ergebnisse zur Aufbereitung der Schlacken und der Rückgewinnung von Lithium gezeigt (Qiu, 2024).

3 SCHLUSSFOLGERUNG

Stahlwerksschlacken bergen ein Rohstoffpotential, das bisher nicht oder bestenfalls teilweise genutzt wird. Der Einsatz als hochwertiger Baustoff oder Baurohstoff, wie Zementrohmehl, wird durch hohe Chromgehalte verhindert. Wertstoffe wie Vanadium, aber auch Chrom gehen aufgrund der schlechten Aufbereitungseigenschaften verloren. Aus diesen Gründen stellt die Optimierung der Aufbereitung bzw. der Aufbereitbarkeit der Schlacken ein interessantes Forschungsfeld der nächsten Jahre dar. Eine direkte Aufbereitung kommt nur für Schlacken infrage, die bereits aufgrund ihrer Mineralogie und Korngrößen eine gute Aufbereitbarkeit zeigen. Für die meisten Schlacken müssen neue Verfahrensansätze gefunden werden. Sehr vielversprechend erschien hier das Engineering of Artificial minerals. Durch die Beeinflussung der noch flüssigen Phase dürfte es möglich sein, Schlacken zu erzeugen, die deutlich besser zur Aufbereitung und Verwertung geeignet sind als die heutigen Schlacken.

LITERATURVERZEICHNIS

Breitenstein, B. (2017). Das "Rene-Verfahren" zur Rückgewinnung von NE-Metallen aus feinkörnigen Rostaschen der thermischen Abfallbehandlung und energetischen Verwertung. Clausthal-Zellerfeld.

FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V. . (2024). Von https://www.fehs.de/pressemeldungen-aktuell/stahlindustrie-2024-eisenhuettenschlacken-sparen-11-mio-tonnen-naturgestein-und-46-mio-tonnen-co%E2%82%82/ abgerufen

Qiu, H. (2024). The development of a process for the recovery of lithium from pretreated slags by means of flotation. Clausthal-Zellerfeld.

Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen. (2025). Schweiz.

Wunderlich, S. (2026). Characterization of basic oxygen furnace slags and slag leachates with respect to the recovery of critical materials. Clausthal-Zellerfeld.

KONTAKT

Dr.-Ing. Sebastian Keber
Sebastian.keber@tu-clausthal.de
+49 5323 72 2135
Institute of Geotechnology and Mineral Resources
TU Clausthal
https://www.igmr.tu-clausthal.de

CreeS – Chromreiche Schlacke für die Zementindustrie nutzbar machen!

Florian Feucht[1], Anna Krammer[2], Alexander Halwax[3], Klaus Doschek-Held[2] & Philipp Sedlazeck[1]

[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und -wirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Leoben, Österreich
[3)] K1-MET GmbH, Linz, Österreich

KURZFASSUNG: Die Nutzbarmachung chromreicher Schlacken kann die Transformation der Zementindustrie hin zu einer emissionsärmeren Produktion unterstützen. Derzeit werden Edelstahlschlacken aufgrund der erhöhten Cr-Konzentration als Sekundärrohstoff noch unzureichend genutzt. Im Projekt CreeS soll das in der Schlacke enthaltene Cr durch gezielte thermochemische Konditionierung in den sechswertigen Zustand (Cr(VI)) überführt und anschließend ausgelaugt werden, um eine weitgehend Cr-freie Schlacke zu erzeugen. Eine chemisch-mineralogische Grundcharakterisierung zeigt ausgeprägte Schwankungen der Fe-, Ca- und Cr-Konzentration sowie mineralogische Unterschiede in Abhängigkeit vom jeweiligen Produktionstag und der produzierten Legierung. Zur Verbesserung des Prozessverständnisses der thermochemischen Konditionierung wurden thermodynamische Modellierungen und thermo-optische Analysen unter definierten Bedingungen durchgeführt. Die thermodynamischen Modellierungen deuten bei 1600 °C auf einen Feststoffanteil von rund 15 % in der überwiegend flüssigen Schlacke hin. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Laboranalysen, bei denen auch keine vollständige Verflüssigung der Probe beobachtet wurde. Des Weiteren verweist die Literatur, gestützt durch die Modellierungsergebnisse, auf eine mögliche Bildung von $CaCr(VI)O_4$ während der oxidativen Abkühlung. Künftige Arbeiten fokussieren sich dementsprechend auf die Untersuchung geeigneter Flussmittel zur Absenkung der Schmelztemperatur sowie auf den Einfluss gezielt gesteuerter Abkühlbedingungen auf die Bildung von Cr(VI).

1 EINLEITUNG

Im Sinne einer funktionalen Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft gewinnt der Einsatz von Recyclingrohstoffen zunehmend an Bedeutung. Neben der Schonung natürlicher Ressourcen trägt ihre Verwendung wesentlich zur Reduktion des CO_2-Fußabdrucks von Produkten bei, da der Bedarf an Primärrohstoffen sowie die damit verbundenen Emissionen aus dem Bergbau und der Aufbereitung verringert werden. Vor diesem Hintergrund sucht auch die Zementindustrie nach geeigneten Sekundärrohstoffen (SRS) für die Zementklinkerproduktion. Als vielversprechender Materialstrom gelten Schlacken aus der Eisen- und Stahlproduktion, deren Einsatz jedoch aufgrund teilweise hoher Schwermetallgehalte, insbesondere von Chrom (Cr), eingeschränkt ist. Das Projekt CreeS verfolgt daher das Ziel, ein Technologiekonzept zur Herstellung einer „Cr-freien“ Schlacke zu entwickeln, exemplarisch anhand der Elektrolichtbogenofenschlacke aus der Edelstahlproduktion. Während sich bisherige Forschungsarbeiten darauf konzentrierten, Prozessparameter der Stahlerzeugung so anzupassen, dass Schwermetalle in stabilen, schwerlöslichen Mineralphasen gebunden werden und so deren Auslaugung minimieren (Neuhold, et al., 2020; Cao, Sohn, & Wang, 2024), verfolgt das Projekt CreeS einen konträren Ansatz. Die vorhandene Schlacke soll unmittelbar nach dem Stahlherstellungsprozess, im noch schmelzflüssigen Zustand, thermochemisch konditioniert werden, um leichter lösliche Cr-führende Mineralphasen zu erzeugen. Durch eine anschließende Laugung sollen einerseits eine „Cr-freie“ Schlacke und andererseits ein Fe-/Cr-reicher Hydroxidschlamm als Laugungsrückstand gewonnen werden. Dies erfordert ein tiefgehendes Verständnis der chemischen und mineralogischen Eigenschaften der Edelstahlschlacke (EDS) sowie, mit Blick auf die Modifikation im schmelzflüssigen Zustand, ihrer thermochemischen Eigenschaften. Nach einer umfassenden Probenahme wurde das Material entsprechend charakterisiert. Der vorliegende Beitrag präsentiert erste Ergebnisse, die als Grundlage für zukünftige Konditionierungsversuche dienen.

2 MATERIAL UND METHODIK

2.1 Probenahme und Aufbereitung

Während einer zehntägigen Ofenreise (OFR; Betriebsperiode zwischen der Erneuerung der Feuerfestauskleidung) wurden zweimal täglich mehrere hundert Kilogramm EDS gezogen. Insgesamt 20 Proben wurden wasserfrei abgekühlt und in Big Bags (BB) gelagert. Die stark variierende Korngröße erforderte teilweise eine Zerkleinerung vor Ort auf d < ~15 cm. Anschließend wurden je BB („OFR1“ – „OFR20“) zwei Einzelproben (#1, #2) von jeweils ca. 10 l entnommen, insgesamt 793 kg. Feinkörniges Material wurde ohne Zerkleinerung anteilig aus der oberen und unteren Hälfte des BB beprobt. Die Inhalte aus BB1 – BB20 wurden weiter zerkleinert, homogenisiert und in einer ca. 20 cm dicken Schicht ausgebreitet. Diese Schicht wurde in zwanzig 1x1 m Rasterflächen unterteilt, von welchen zufällig zehn ausgewählt wurden, um daraus je 10 l Mischprobe (MP1 – MP10) händisch zu entnehmen. Alle Stichproben (OFR, MP) wurden nach weiterer Korngrößenreduktion auf < 2 cm repräsentativ aufgeteilt. Zur Schonung der Aggregate und aufgrund metallischer, teils von Schlacke ummantelter Fremdkörper erfolgte die sukzessive Zerkleinerung im Backenbrecher (Retsch BB200, WC). Vor der Aufgabe wurde bei 4 mm abgesiebt, um Feinkorn abzutrennen, Metallteile sichtbar zu machen und händisch zu entfernen. Das Überkorn wurde zusätzlich mit einem vernickelten NdFeB-Magneten (33–35 MGOe, Haftkraft ~8,2 kg) geprüft. Es wurde stufenweise auf 10/8/6/4/2 mm zerkleinert. Das OFR- und das MP-Material wurden anschließend durch Kegeln/Vierteln sowie mithilfe eines Riffelteilers auf ~500 g für nachfolgende Analysen reduziert. Aus allen MP wurde eine homogenisierte Sammelprobe (SP) hergestellt, die die Grundlage der hier präsentierten thermodynamischen Berechnungen und thermochemischen Analysen bildet.

2.2 Chemische und mineralogische Analysen

Chemische Analysen wurden an allen 51 Schlackenproben durchgeführt. Zuvor wurden diese auf Analysenfeinheit vermahlen. Der Gesamtschwefelgehalt wurde mittels Verbrennungsanalytik im Sauerstoffstrom mit Infrarotdetektion (Eltra CS-i) gemäß ÖNORM EN 196-2 ermittelt. Der Glühverlust (loss on ignition, LOI) wurde bei 950 °C mittels Thermogravimetrie-Analysators (Eltra Thermostep) nach ÖNROM EN 196-2 bestimmt. Die geglühten Proben wurden für die chemische Analyse der Haupt- und Nebenelemente mittels Röntgenfluoreszenz an Schmelztabletten (BRUKER S8 Tiger) herangezogen, ebenfalls gemäß EN 196-2. Sämtliche Konzentrationsangaben der chemischen Bestandteile sind als Massenanteile in Prozent (Gew.-%) zu verstehen.
Der Mineralbestand der Probe OFR 6 #1 (hoher Cr-Gehalt) und OFR 10 #1 (für spätere Großversuche geeigneter Produktionstag) sowie der Sammelprobe (mittlerer Cr-Gehalt) wurde bestimmt. Für die Analyse wurden Presstabletten angewendet. Die Messung selbst wurde am Röntgendiffraktometer (Bruker D8 Endeavor) mit einer Cu Kα-Strahlung mit 45 kV und 30 mA im 2-Theta Bereich von 8 – 65 ° und einer Schrittweite von 0,020 ° bei 19 s pro Schritt und einer Probenrotation von 15 min^{-1} gemessen. Als Detektor wurde ein LynxEye XE-T verwendet. Die Auswertung inklusive Rietveld-Verfeinerung erfolgt mittels der Software Bruker Topas.

2.3 Thermochemische Modellierung

Um mögliche Versuchsparameter ableiten zu können wurden thermodynamische Gleichgewichtsberechnungen mit FactSage 8.3 (Modul Equilib) unter Verwendung der Datenbanken FactPS und FToxid durchgeführt. Als Eingangsdaten diente die chemische Analyse der homogenisierten SP. Für die Modellierung wurden nur Komponenten mit >1 % herangezogen. Da die Oxidationsstufen von Fe und Mn unbekannt waren, wurden die analytisch bestimmten Oxide auf elementare Fe- bzw. Mn-Gehalte umgerechnet, die Gesamtzusammensetzung auf 100 % normiert und anschließend als Eingabedatensatz verwendet. Die Rechnungen wurden bei konstantem Sauerstoffpartialdruck p_{O2} = 0,21 atm durchgeführt. Ziel war es, die Phasenzusammen-

setzung sowie die temperaturabhängige Verteilung chromhaltiger Spezies bis 1600 °C zu bestimmen, da diese Temperatur bei nachfolgenden Schmelzversuchen unter Laborbedingungen zuverlässig erreicht werden kann.

2.4 Thermo-optische Analyse

Die thermo-optische Untersuchung erfolgte mittels Erhitzungsmikroskopie (Hesse Instruments EM301 mit der Software EMI III). Die charakteristischen Temperaturen wurden zunächst automatisiert in Anlehnung an DIN 51730 ermittelt und anschließend durch manuelle optische Bildauswertung verifiziert. Zu diesem Zweck wurde der SP unter Verwendung eines Riffelteilers eine Teilmenge von etwa 100 g entnommen. Diese wurde anschließend mit einem Labor-Backenbrecher (Retsch BB50; Brechbacke und Verschleißplatte aus Manganstahl) auf eine Korngröße von 0,1 mm zerkleinert. Die Analysen wurden mit drei Wiederholversuchen durchgeführt, wobei die eingesetzte Probenmasse jeweils unter 1 g lag. Die EDS wurde in Form eines Standard-Probenzylinders auf Al_2O_3-Probenplättchen (Reinheit 99,7 %) aufgebracht. Während der Messung erfolgte eine kontinuierliche Spülung mit synthetischer Luft bei einem Volumenstrom von 2 l/min. Die Temperatur wurde zunächst mit einer Heizrate von 80 °C/min bis auf 1300 °C erhöht und anschließend mit 10 °C/min bis 1700 °C weitergeführt. Nach der automatischen Erkennung der Fließtemperatur wurde die Messung beendet.

3 ERGBENISSE

3.1 Chemismus und Mineralogie

Erste Auswertungen zeigen, dass originale EDS aus den Hauptkomponenten Fe_2O_3 (Mittelwert bei 37 %) und CaO (Mittelwert bei 29 %) sowie aus den Nebenbestandteilen SiO_2, Al_2O_3, MgO und Cr_2O_3 im einstelligen bis niedrigen zweistelligen Prozentanteilen besteht. Wie in Abb.1 ersichtlich, weist Fe_2O_3 den höchsten mittleren Massenanteil auf und zeigt zugleich die größte Streuung. Dies ist primär auf die tageweise Produktion unterschiedlicher Qualitäten zurückzuführen. Das CaO stellt den zweitgrößten Bestandteil dar und zeigt sich über den betrachteten Produktionszeitraum hinweg vergleichsweise konstant. Konzentrationen von SiO_2, Cr_2O_3 und Al_2O_3 liegen in ähnlicher, niedrigerer Größenordnung (Median 6 – 8 %). Die vereinzelten oberen Ausreißer lassen sich vermutlich einzelnen Tagen mit spezifischen Sonderqualitäten zuordnen. Das MgO zeigt sowohl den geringsten Anteil als auch die geringste Streuung.

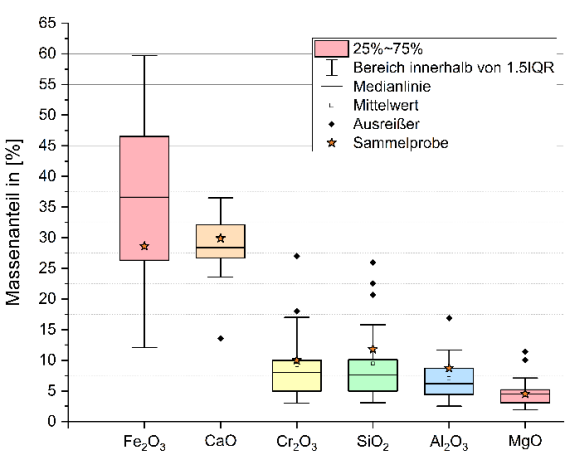


Abb.1: Boxplot-Darstellung der Massenanteile von SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO und Cr_2O_3 im Probenmaterial über 10 Produktionstage.

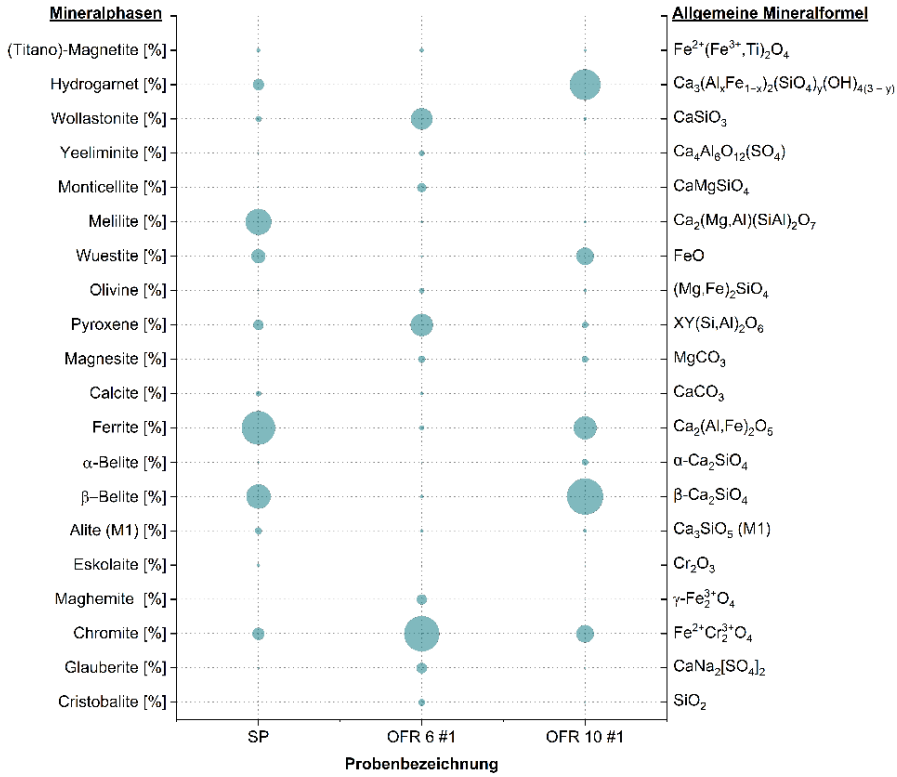


Abb. 2: Darstellung des Mineralbestandes. Zur Veranschaulichung der Phasenhäufigkeit nach der Rietveld Verfeinerung entspricht die Größe der einzelnen Blasen, der jeweiligen Häufigkeit. Somit gilt, je größer, desto häufiger. Für die Mineralgruppe der Pyroxene gilt: X: Na^+, Ca^{2+}, Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}; Y: Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Zn^{2+}, Fe^{3+}, Al^{3+}, Cr^{3+}, V^{3+}, Ti^{4+}.

Die Bestimmung des Mineralphasengehalts mittels XRD zeigt, dass EDS aus unterschiedlichen Calcium-Aluminium-Eisen- und Calcium-Silikat-Phasen sowie Wüstit und Spinell besteht (Abb.2.). Als Cr-führende Phase können in der originalen EDS Chromit ($FeCr^{3+}O_4$) sowie in der Sammelprobe Eskolaite (Cr_2O_3) identifiziert werden. Die drei Proben unterscheiden sich deutlich in ihrer mineralogischen Zusammensetzung. Die Proben SP und OFR 10 #1 ähneln sich hinsichtlich ihres Mineralbestandes sowie ihrer chemischen Zusammensetzung. Die Probe OFR 6 #1 zeichnet sich hingegen durch den hohen Chromitgehalt aus, welche ebenfalls auf deren Chemismus zurückzuführen ist (höchste Cr-Konzentration aller Proben).

3.2 Thermochemische Modellierung

Die thermodynamische Gleichgewichtsmodellierung in Abb.3 (links) zeigt, dass bis etwa 1400 °C eine Vielzahl fester Phasen stabil vorliegt. Mit steigender Temperatur nimmt deren Anteil kontinuierlich ab, sodass oberhalb dieser Temperatur die flüssige Schlackenphase, neben einem geringen Anteil an festen Spinell-Phasen, dominiert. Die berechnete Verteilung von Cr in den einzelnen Phasen in Abb.3 (rechts) verdeutlicht, dass Cr bei Temperaturen oberhalb von etwa 1100 °C bevorzugt in den festen Spinell-Phasen gebunden wird und nur zu einem geringeren Anteil in die flüssige Schlacke übergeht: selbst bei 1600 °C befinden sich lediglich rund 30 % des Gesamtchroms in der Flüssigphase. Während des Abkühlens verschiebt sich die Chromverteilung zunehmend in Richtung $CaCrO_4$, wobei unterhalb von etwa 900 °C schließlich nahezu das gesamte Chrom in dieser Phase abgebunden ist.

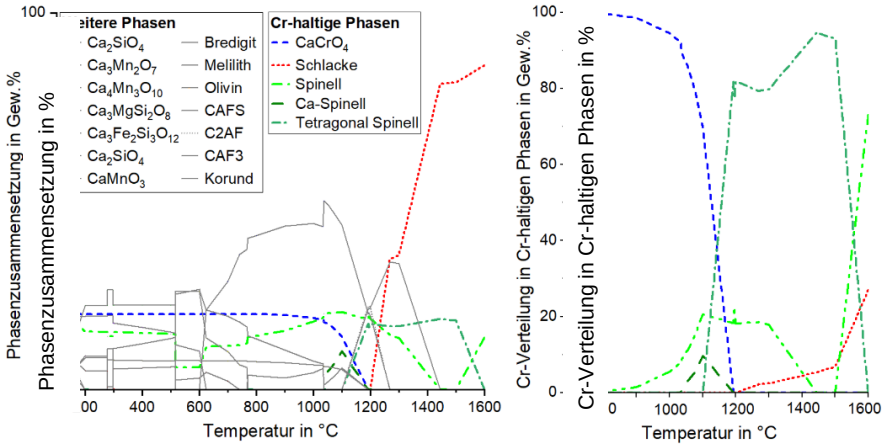


Abb. 3: Thermodynamische Modellierung der Phasenzusammensetzung (links) und die Cr-Verteilung auf die Cr-haltigen Phasen (rechts) als Funktionen der Temperatur in %

Diese Beobachtungen sind von hoher Relevanz, da es sich bei $CaCrO_4$ um eine Cr(VI)-haltige Verbindung handelt, die unter oxidierenden Bedingungen während der Abkühlung gebildet werden kann. Aufgrund ihrer erhöhten Wasserlöslichkeit besteht die Möglichkeit, dass diese Phase im nachgeschalteten Laugungsprozess aus der Schlacke ausgewaschen wird (Li & Xue, 2019; Pillay, Blottnitz, & Petersen, 2003; Yu, Wang, Li, Li, & Xue, 2018).

3.3 Thermo-optische Analyse

Wie in Abb.4 dargestellt, zeigen die Untersuchungen eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Die charakteristischen Schmelztemperaturen wiesen lediglich geringe Streuungen auf. Für die Erweichungstemperatur wurde ein Mittelwert von 1276 ± 5 °C ermittelt, während die Halbkugeltemperatur bei 1366 ± 2 °C und die Fließtemperatur bei 1421 ± 4 °C lagen.
Selbst beim Erreichen der Fließtemperatur ist zu erkennen, dass ein nicht vollständig geschmolzener Rest der Probe verbleibt. Dieses Verhalten steht in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der thermodynamischen Gleichgewichtsberechnungen, wobei es sich hierbei wahrscheinlich um hochschmelzende Spinellphasen handelt, die unter den gewählten Versuchsbedingungen nicht vollständig aufgeschmolzen werden konnte. Zur weiteren Bewertung dieses Effekts werden derzeit ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Dabei soll insbesondere der Einfluss einer möglichen Anreicherung von Al_2O_3 aus den Substratplättchen in die Schlacke abgeschätzt werden.

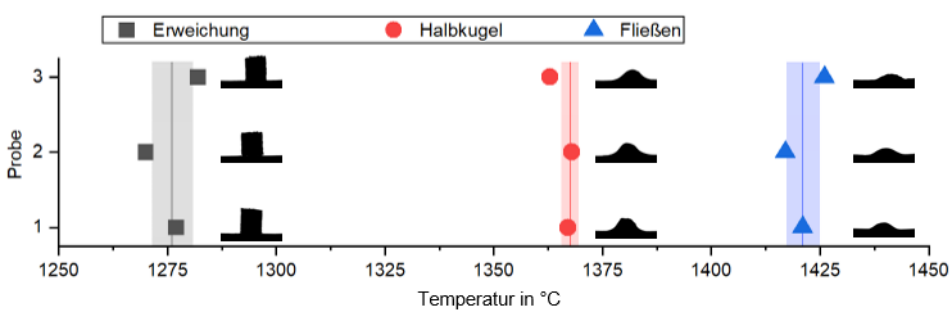


Abb. 4: Thermo-optische Analyse der SP: Darstellung der charakteristischen Temperaturen von drei Wiederholungsversuchen

4 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Die untersuchten EDS sind chemisch von Fe_2O_3 und CaO dominiert. SiO_2, Al_2O_3 und Cr_2O_3 liegen im Bereich von etwa 6 – 8 %. Mineralogisch bestehen die unbehandelten Proben aus Ca-Al-Fe- und Ca-Silikat-Phasen, Wüstit und Spinell. Als Cr-führende Phasen wurden Chromit und Eskolait identifiziert. Die experimentellen Untersuchungen und thermodynamischen Modellierungen zeigen, dass unter den untersuchten Bedingungen bis zu 1600 °C ein geringer Feststoffanteil in der sonst schmelzflüssigen Schlacke erhalten bleibt. Nachdem die thermochemische Konditionierung direkt im Anschluss an den Stahlherstellungsprozess an der noch schmelzflüssigen Schlacke erfolgen soll, wird die Übertragbarkeit der thermochemischen Annahmen und Modellierungsergebnisse in nachfolgenden Technikumsversuchen im größeren Maßstab validiert. Um diesen potenziell prozessimmanenten Erkenntnissen zu begegnen, werden in zukünftigen Arbeiten geeignete Flussmittel zur Absenkung der Schmelztemperatur und zur Verbesserung des Schmelzverhaltens evaluiert. Da sowohl die Literatur als auch die thermodynamischen Berechnungen auf eine mögliche Bildung von $CaCr(VI)O_4$ während der Abkühlung unter oxidierenden Bedingungen hinweisen, wird in den nachfolgenden Technikumsversuchen der Einfluss gezielt gesteuerter Abkühlbedingungen auf die Cr(VI)-Bildung untersucht. Bei der Interpretation der thermodynamischen Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die verwendeten Datenbanken keine Cr(VI)-Spezies in der flüssigen Phase enthalten. Die Bildung von gelöstem Cr(VI) in der Schmelze wird daher zwar als thermodynamisch unwahrscheinlich eingeschätzt, kann aufgrund der derzeitigen Datenlage jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden.

5 DANKSAGUNG

Das Projekt CreeS wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft innerhalb des Programms “Kreislaufwirtschaft und Produktionstechnologien 2024” mit der Projektnummer FO999923205 gefördert.

6 LITERATURVERZEICHNIS

Cao, Sohn, & Wang. (2024). Selective stabilization of chromium and sustainable treatment of stainless-steel slags. Journal of Environmental Chemical Engineering. doi:10.1016/j.jece.2024.113516

Li, & Xue. (2019). Emission reduction research and formation of hexavalent chromium in stainless steel smelting: Cooling rate and boron oxide addition effects. Process Safety and Environmental Protection, 131-143. doi:10.1016/j.psep.2018.11.025

Neuhold, Algermissen, Drissen, Adamczyk, Presoly, Sedlazeck,Schenk, Raith, Pomberger Vollprecht. (2020). Tailoring the FeO/SiO2 Ratio in Electric Arc Furnace Slags to Minimize the Leaching of Vanadium and Chromium. applied sciences. doi:10.3390/app10072549

Pillay, Blottnitz, & Petersen. (2003). Ageing of chromium(III)-bearing slag and its relation to the atmospheric oxidation of solid chromium(III)-oxide in the presence of calcium oxide. Chemosphere, 1771-1779. doi:10.1016/S0045-6535(03)00453-3

Yu, Wang, Li, Li, & Xue. (2018). Effect of cooling conditions on the leachability of chromium in Cr2O3-containing steelmaking slag. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. doi:10.17159/2411-9717/2018/v118n5a10

Phosphorrückgewinnung von thermisch vorbehandeltem Klärschlamm in einem induktiv beheiztem Schüttschichtreaktor

Christoph Gatschlhofer[1], Zlatko Raonic[1], Florian Steindl[2, 3], Michael Meyer[1], Anna Christine Krammer[1], Harald Raupenstrauch[1] & Klaus Doschek-Held[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Leoben, Österreich
[2)] Technische Universität Graz, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Graz, Österreich
[3)] Technische Universität Graz, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Phosphor ist ein von der Europäischen Kommission als kritisch eingestufter Rohstoff. Da Europa über keine nennenswerten Phosphaterzlagerstätten verfügt, ist es stark abhängig von Importen. Klärschlamm ist hingegen eine kontinuierlich verfügbare sekundäre Phosphorquelle. Mit der Neuerlassung der Abfallverbrennungsverordnung wird die Nutzung von Klärschlamm ab dem 01.01.2033 stark eingeschränkt. Betreiber von Kläranlagen ab einem Bemessungswert von 20.000 EW_{60} sind verpflichtet Klärschlamm einer Phosphorrückgewinnung zuzuführen, um definierte Rückgewinnungsquoten zu erfüllen. Derzeit gibt es keine etablierte Technologie zur Verarbeitung des Klärschlammaufkommens. Das Forschungsprojekt PHOBOS („Phosphorrückgewinnung und Bindemittelbereitstellung als ökonomische Stoffverwertung“), in der Industrie und Wissenschaft gemeinsam an einer Lösung dieser Herausforderung arbeiten, verfolgt einen thermochemischen Ansatz in einem induktiv beheizten Schüttschichtreaktor. Ziel des Projekts ist es, die thermochemischen Vorgänge im System messbar zu quantifizieren, Prozessfenster für den Anlagenbetrieb zu definieren und die gewonnenen Stoffströme hinsichtlich ihrer industriellen Anwendbarkeit zu bewerten. Damit soll der Grundstein für die Hochskalierung des Prozesses gelegt werden.

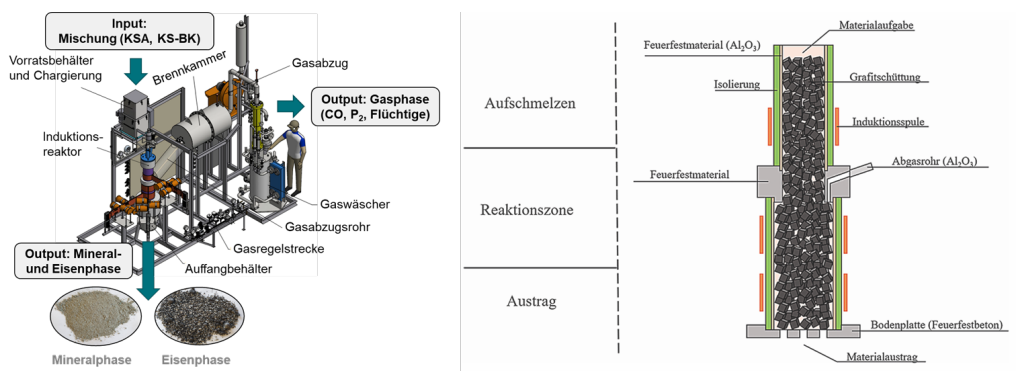
1 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG

Phosphor ist ein essenzielles Element für Pflanzen und Lebewesen (Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2000). Gleichzeitig sind Phosphaterzvorkommen weltweit ungleich verteilt. Europa ist in hohem Maße auf Importe aus teils politisch instabilen Regionen angewiesen. Gegenwärtig werden rund 90 % des geförderten Phosphats zu Mineraldüngern verarbeitet (Amar, Benzaazoua, Elghali, Hakkou, & Taha, 2022). Die daraus resultierende Versorgungsrelevanz und das wirtschaftliche Risiko führten dazu, dass Phosphor und Rohphosphat von der Europäischen Kommission 2023 erneut als kritische Rohstoffe eingestuft wurden (Grohol & Veeh, 2023). Die konventionelle Aufbereitung von Phosphaterz zu Konzentrat ist mit erheblichen Mengen deponiepflichtiger Rückstände sowie signifikanten Phosphorverlusten verbunden (Taha, Elghali, Hakkou, & Benzaazoua, 2021). Demgegenüber stellt Klärschlamm eine kontinuierlich verfügbare sekundäre Phosphorquelle dar. Mit der Novellierung der österreichischen Abfallverbrennungsverordnung 2024 wird dessen landwirtschaftliche Nutzung künftig stark eingeschränkt. Für Betreiber von Abwasserreinigungsanlagen ab einer Ausbaugröße von 20.000 EW_{60} besteht ab dem 01.01.2033 die Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung (Bundesministerium Land- und Forstwirtschaft, 2024). Ziel dieser Regelung ist die Erhöhung der nationalen Versorgungssicherheit, die Reduktion strategischer Abhängigkeiten sowie die Förderung einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft. Obwohl bereits zahlreiche technologische Ansätze zur Rückgewinnung von Phosphor aus Schlammwasser, Klärschlamm und Klärschlammaschen existieren, konnte bislang in Österreich keine großindustriell etablierte Lösung umgesetzt werden. Im Rahmen des nationalen Projekts PHOBOS adressiert ein Konsortium aus wissenschaftlichen und industriellen Partnern diese Herausforderung durch einen thermochemischen Behandlungsansatz (FFG, 2025). Ziel ist die Entwicklung einer ganzheitlichen Methodik zur Charakterisierung thermisch vorbehandelter Klärschlämme, insbesondere von Klärschlammasche (KSA) und Klärschlamm Biokohle

(KS-BK), um kritische Prozessparameter zu identifizieren und Betriebsfenster für die Hochskalierung des Prozesses abzuleiten.

2 REAKTOR UND PROZESSKONZEPT

Der auf elektrischer Energie basierende thermochemische Gesamtprozess ist in Abb. 1 (a) dargestellt. Die Mischung wird infolge der Modellierung aus KSA, KS-BK und gegebenenfalls Korrekturstoffen anhand der chemischen Zusammensetzung definiert. Dabei entspricht KSA monoverbranntem Klärschlamm und KS-BK pyrolisiertem Klärschlamm. Die KS-BK dient nicht nur als alternative Phosphorquelle, sondern liefert zugleich das für die thermochemischen Reaktionen erforderliche Reduktionsmittel. Dadurch könnte vollständig auf fossile Reduktionsmittel verzichtet werden. Die aufbereitete Mischung wird über einen Vorratsbehälter in den Induktionsreaktor eingebracht, in dem die thermochemische Umwandlung stattfindet. Dabei entstehen drei Output-Fraktionen. Der freigesetzte Phosphor wird über die Gasphase aus dem Reaktor abgeführt, in einer Brennkammer nachoxidiert und anschließend in einem Gaswäscher zu Phosphorsäure hydrolysiert. Parallel dazu verbleiben eine mineralische und eine eisenhaltige Schmelzphase im Reaktor, die nach der Behandlung am Reaktorboden in einem dynamischen Wasserbad nassgranuliert werden. Die erzeugten Produkte – Phosphor und Mineralphase – sollen als Sekundärrohstoffe für die Düngemittel- und Zementindustrie nutzbar gemacht werden. Die Eisenphase wird durch eine nachgeschaltete nasschemische Behandlung in ein Eisenfällmittel für Abwasserreinigungsanlagen umgewandelt. Zur Gewährleistung definierter Prozessbedingungen erfolgt an kritischen Stellen eine Inertisierung mit Edelgasen über eine Gasregelstrecke.



(a) (b)

Abb. 1: (a) Thermochemischer Gesamtprozess zur Rückgewinnung von Phosphorsäure, einer Mineral- und Eisenphase aus einer Mischung von Klärschlammasche (KSA) und Klärschlamm Biokohle (KS-BK), in eigener Darstellung nach (Schönberg, 2014) (b) Induktionsreaktor – induktiv beheizter Schüttschichtreaktor mit Grafit als Schüttungs- und Suszeptormaterial (Windisch, Ponak, Mally, & Raupenstrauch, 2020)

Das Kernstück des thermochemischen Prozesses bildet der in Abb. 1 (b) dargestellte Induktionsreaktor, ein induktiv beheizter Schüttschichtreaktor in Schachtofenbauweise. Aufgrund seiner vorteilhaften elektrischen und thermischen Eigenschaften wird Grafit als Bettmaterial eingesetzt. Durch elektromagnetische Induktion mittels Kupferspulen werden im Grafitbett Wirbelströme erzeugt, die infolge der Joule'schen Erwärmung zur Beheizung des Reaktors führen. Die vertikale Anordnung mehrerer Spulen entlang der Reaktorhöhe ermöglicht die gezielte Einstellung eines vertikalen Temperaturprofils, während das Reaktordesign ein weitgehend homogenes radiales Temperaturfeld gewährleistet. Am Reaktorkopf wird das Einsatzmaterial auf die glühende Grafitschüttung aufgegeben, welches sukzessive die Schmelz-, Reaktions- und Austragszone

durchläuft (Ponak, 2019). Dabei wird das Temperaturprofil der einzelnen Bereiche an die jeweiligen chemischen und physikalischen Prozessanforderungen angepasst. Innerhalb der Reaktionszone finden die maßgeblichen thermochemischen Umwandlungen statt. Aus der Primärschmelze werden gasförmiger Phosphor und CO freigesetzt und über ein Abgasrohr direkt aus dem Reaktor abgeführt. Parallel dazu bilden sich eine Eisenschmelze sowie eine verbleibende sekundäre Mineralschmelze, die sich aufgrund ihrer unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften voneinander trennen und am Reaktorboden in ein Granulationsbecken abgegossen werden. Der Reaktor zeichnet sich einerseits durch eine hohe Robustheit gegenüber chemischen Schwankungen des Einsatzmaterials aus und bietet andererseits geeignete Reaktionsbedingungen für die thermochemische Inwertsetzung von KSA und KS-BK. Aufgrund der Prozessbedingungen ist zu erwarten, dass per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) zerstört werden; ein analytischer Nachweis liegt jedoch noch nicht vor. Darüber hinaus bietet sich eine hohe Flexibilität bei der Phosphorrückgewinnung, da der Phosphor den Reaktor in molekularer Form (P_2) verlässt. Dadurch sind unterschiedliche Produktpfade, wie die Gewinnung von weißem Phosphor, Phosphorpentoxid oder Phosphorsäure, prinzipiell realisierbar. Ziel der thermochemischen Voruntersuchungen ist es, das Materialverhalten in Abhängigkeit der Temperatur zu analysieren und den Einfluss der chemischen Zusammensetzung des Einsatzmaterials auf die im Reaktor ablaufenden Reaktions- und Phasenumwandlungsprozesse systematisch zu untersuchen.

3 MATERIAL UND METHODIK

Als Materialien für die thermochemische Charakterisierung werden KSA, KS-BK sowie deren Mischungen verwendet. Dabei werden gezielt Klärschlämme ausgewählt, welche die österreichische Kläranlagenlandschaft repräsentativ abbilden, um den Einfluss betrieblicher und saisonaler Unterschiede auf die Prozesseffizienz zu untersuchen. Die praktischen Versuchsreihen werden durch thermodynamische Berechnungen mit FactSage™ unterstützt. Im kleinen Maßstab erfolgt die thermische Analyse von Materialien und Mischungen mittels thermo-optischer und simultanthermischer Analyse. Daraus lassen sich kritische Prozessgrößen wie Schmelzverhalten, Phasenumwandlungen sowie Thermodynamik und Kinetik chemischer Reaktionen als Funktion der Temperatur ableiten. Die Herausforderung besteht in der Entwicklung einer Methodik zur thermochemischen Charakterisierung heterogener Materialien über einen Temperaturbereich von mehr als 1400 °C. Dabei treten materialzerstörende Bedingungen infolge der Bildung aggressiver Schmelzen und Gasphasen auf, wodurch Analysegeräte vor Beschädigung geschützt werden müssen. Deshalb kommt der Entwicklung der Methodik besondere Bedeutung zu. Die generierten Daten werden auf das zuvor beschriebene Reaktorkonzept übertragen. Im Rahmen von Versuchskampagnen sollen die definierten Mischungen thermochemisch behandelt und die gewonnenen Fraktionen – Phosphor, Mineralphase und Eisenphase – chemisch und mineralogisch analysiert werden. Anschließend werden diese mithilfe fraktionsspezifischer Tests anhand definierter Kriterienkataloge auf ihre industrielle Eignung geprüft. Die Ergebnisse sollen in einen Mischungsrechner überführt und der Prozess im Sinne eines iterativen Verbesserungsprozesses fortlaufend wiederholt werden.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Erste Darstellungen von Phasendiagrammen sowie thermodynamische Gleichgewichtsberechnungen bis 1600 °C in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung konnten bereits mit FactSage™ durchgeführt werden. Dabei ließ sich der Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die Verschiebung der Gleichgewichtslagen darstellen. Zudem wurde eine Methodik zur thermochemischen Charakterisierung entwickelt, mit der derzeit erste Messungen an Realmaterialien bis zu 1500 °C durchgeführt werden. Erste Voruntersuchungen zum Einsatz von KS-BK zeigen vielversprechende Ergebnisse. Hierbei wurde KSA bei 1600 °C mit einer Haltezeit von einer Stunde sowie eine modellierte Mischung bei 1550 °C mit einer Haltezeit von 45 Minuten in einem Grafittiegel thermochemisch behandelt und anschließend nassgranuliert. Die nach der

Aufbereitung erhaltenen Mineral- und Eisenphasen wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse beziehungsweise optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma analysiert. Die eingesetzten Ausgangsmaterialien KSA und KS-BK sowie die nach der thermochemischen Behandlung gewonnenen und aufbereiteten Mineral- und Eisenphasen sind in Abb. 2 dargestellt.

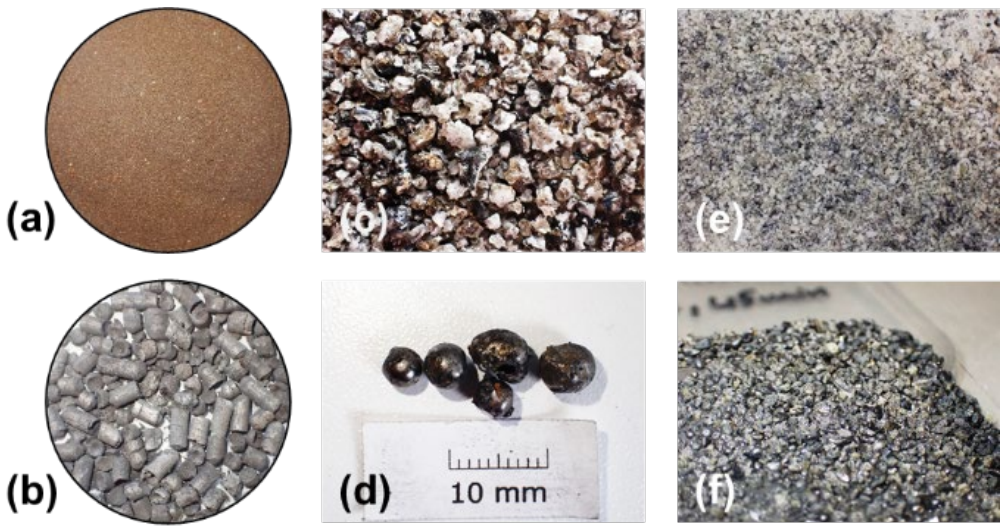


Abb. 2: Input- und Output-Materialien (a) Klärschlammasche (KSA) (b) Klärschlamm Biokohle (KS-BK) (c) Mineralphase aus behandelter KSA (d) Eisenphase aus behandelter KSA (e) Mineralphase aus behandelter Mischung aus KSA mit KS-BK (M-(KSA/KS-BK)) (f) Eisenphase aus behandelter M-(KSA/KS-BK)

In Tab. 1 sind die eingewogenen Massen der Input- und Output-Materialien dargestellt. Für beide Versuche wurden jeweils 150 g verwendet. Nach der thermochemischen Behandlung wurden jeweils rund 90 g Granulat erhalten, das sich nach der Aufbereitung in etwa 80 g Mineralphase und 10 g Eisenphase trennen ließ.

Tab. 1: Abwaage der Input- und Output-Massen der thermochemischen Behandlung von Klärschlammasche (KSA) und der Mischung von KSA und Klärschlamm Biokohle (M-(KSA/KS-BK))

Input-Material	Input in g	Granulat in g	Mineralphase in g	Eisenphase in g
KSA	150	88,6	77,7	10,6
M-(KSA/KS-BK)	150	90,4	80,2	9,30

Die Ergebnisse der chemischen Charakterisierung sind in Abb. 3 dargestellt. Nach der thermochemischen Behandlung zeigt sich eine signifikante Reduktion des ursprünglich gebundenen Fe_2O_3, das in die Eisenphase übergeht und in der Mineralphase nur noch in geringen Mengen als FeO nachweisbar ist. Die Mineralphase ist nahezu phosphorfrei, während ein geringer Anteil des Phosphors infolge unerwünschter Phosphidbildung in der Eisenphase verbleibt. (Gatschlhofer, et al., 2025).

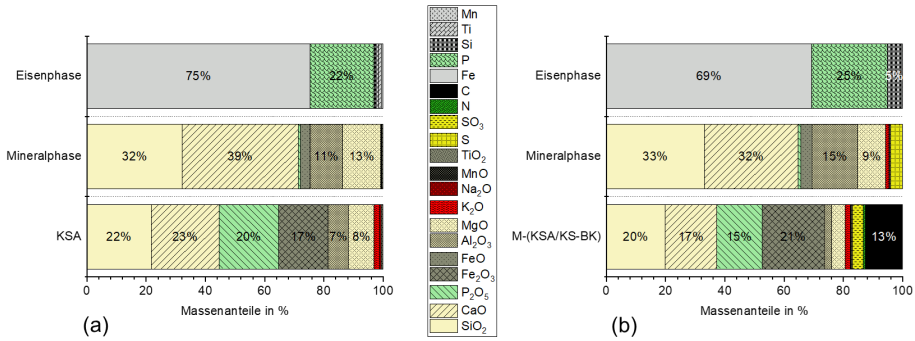


Abb. 3: Chemische Charakterisierung von thermochemischen Reduktionsversuchen von je 150 g Input Material in einem Grafittiegel nach Nassgranulation von (a) Klärschlammasche (KSA) und daraus aufbereitete Mineral- und Eisenphase nach 1600 °C und 60 Minuten Haltezeit (b) Mischung M aus KSA und Klärschlamm Biokohle (KS-BK) als M-(KSA/KS-BK) und daraus aufbereitete Mineral- und Eisenphase bei 1550 °C und 45 Minuten Haltezeit

Die aus der chemischen Analyse der Mineral- und Eisenphase abgeleitete Phosphorbilanz ist in Abb. 4 dargestellt. KSA und die Mischung enthalten 19,7 g bzw. 21,3 g Phosphor, entsprechend 100 % des eingesetzten Phosphors. Den Analyseergebnissen zufolge entfallen davon bei der behandelten KSA bzw. M-(KSA/KS-BK) 11,6 % bzw. 11,1 % auf die Eisenphase. In der Mineralphase verbleiben lediglich 1,9 % bzw. 2,3 %. Der verbleibende Anteil von 86,5 % bzw. 86,6 %, welcher weder der Mineral- noch der Eisenphase zugeordnet werden kann, wird der Gasphase zugerechnet. Dieser Anteil entspricht dem im Abgas potenziell rückgewinnbaren Phosphor.

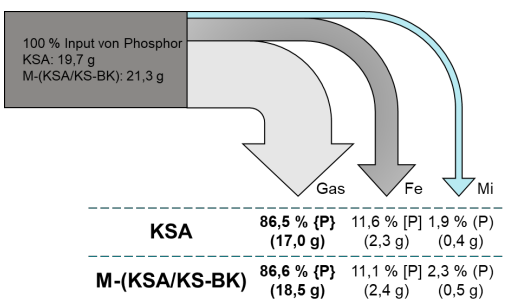


Abb. 4: Phosphorbilanz der thermochemischen Standardversuche von Klärschlammasche (KSA) und einer Mischung aus KSA und Klärschlamm Biokohle (M-(KSA/KS-BK)) und Verteilung von Phosphor in der Gasphase (Gas) als {P}, Eisenphase (Fe) als [P] und Mineralphase (Mi) als (P)

5 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

PHOBOS beschäftigt sich mit der thermochemischen Inwertsetzung thermisch vorbehandelten Klärschlamms mit dem übergeordneten Ziel der Hochskalierung der Technologie. Dabei kommt den thermodynamischen Berechnungen sowie den thermischen Analysen zur Bestimmung des Schmelzverhaltens, der Phasenumwandlungen und der Reaktionsabläufe eine zentrale Bedeutung zu, um die Prozessparameter auf Basis der erhobenen Ergebnisse für den Reaktorbetrieb anzupassen. Hierzu wurden erste Berechnungen in FactSage™ durchgeführt und eine Methodik zur thermischen Analyse implementiert. Vorläufige Ergebnisse bestätigen den Einsatz von KS-BK im beschriebenen Reaktorkonzept. Im Vergleich zur reinen KSA konnten bei einer Mischung aus KSA und KS-BK über 86 % des ursprünglichen Phosphors weder in der Mineral- noch in der Eisenphase nachgewiesen werden. Dieser Anteil wurde dem Phosphor in der Gasphase

zugeordnet und würde die gesetzlich vorgeschriebenen Phosphorrückgewinnungsquoten erfüllen. Zudem konnte gezeigt werden, dass KS-BK neben seiner Funktion als alternative Phosphorquelle auch adäquate Reduktionsmittelanteile für das System bereitstellt. Dies liegt gegenständlich sogar in einem Überangebot vor, wodurch ein erheblicher Anteil an KSA zugemischt werden kann. In weiterer Folge sollen thermische Analysen durchgeführt und die erhobenen Daten auf Versuchskampagnen im induktiv beheizten Schüttschichtreaktor übertragen werden. Phosphor soll aus dem Abgas extrahiert und gemeinsam mit der Mineral- und der Eisenphase auf industrielle Anwendbarkeit hin untersucht werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Amar, H., Benzaazoua, M., Elghali, A., Hakkou, R., & Taha, Y. (2022). Waste rock reprocessing to enhance the sustainability of phosphate reserves: A critical review. *Journal of Cleaner Production*.

Bundesministerium Land- und Forstwirtschaft, K. u. (13. 05 2024). Abfallverbrennungsverordnung 2024 . https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2024_II_118/BGBLA_2024_II_118.pdfsig.

FFG. (2025). *FFG Projektdatenbank*. Von https://projekte.ffg.at/projekt/5138969 abgerufen

Gatschlhofer, C., Raonic, Z., Marschall, I., Krammer, A., Doschek-Held, K., & Raupenstrauch, H. (2025). Investigation of the phosphide formation for transition metals during carbothermal reduction of industrial and synthetic slags. In *Circular Economy and Sustainability*. Springer Verlag.

Grohol, M., & Veeh, C. (2023). *Study on the critical raw materials for the EU 2023 - Final Report.* European Commission.

Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. (2000). ISBN: 9780471484943: John Wiley & Sons.

Ponak, C. (2019). *Carbo-thermal reduction of basic oxygen furnace slags with simultaneous removal of phosphorus via the gas phase.* Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik.

Schönberg, A. (2014). *Mathematische Modellierung metallurgischer Prozesse - Induktive Erwärmung einer Graphitschüttung.* Doktorarbeit. Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik.

Taha, Y., Elghali, A., Hakkou, R., & Benzaazoua, M. (2021). Towards Zero Solid Waste in the Sedimentary Phosphate Industry: Challenges and Opportunities. *Minerals*.

Windisch, S., Ponak, C., Mally, V., & Raupenstrauch, H. (2020). Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche mit dem RecoPhos-Prozess. *Österreichischer Wasser- und Abfallwitschaft*, S. 421 - 428.

DANKSAGUNG

PHOBOS wird gefördert bzw. finanziert im Programm der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) „Rohstoffe 2024“ vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Des Weiteren gilt der Dank den wissenschaftlichen Partnern, dem Lehrstuhl für Allgemeine und Analytische Chemie der Montanuniversität Leoben, den Instituten für Angewandte Geowissenschaften, für Materialprüfung und Baustofftechnologie sowie für Tragwerksentwurf der Technischen Universität Graz, und auch den industriellen Partnern LAT Nitrogen Linz GmbH, Donau Chemie AG, WSA Waste Service Austria Gmbh, Next Generation Elements GmbH und itom Invest GmbH für die Zusammenarbeit.
FFG-Projektdatenbank: https://projekte.ffg.at/projekt/5138969

Erste Erkenntnisse bei der Umsetzung der „PFAS-Strategie Altlasten“

Gernot Döberl[1], Hanna Kobald[1], Birgit Moser[1], Markus Ausserleitner[1], Melanie Maltschnig[1] & Martin Weisgram[1]
[1)] Umweltbundesamt, Team Altlasten, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die breite Anwendung per- und polyfluorierter Alkylsubstanzen (PFAS) in der Vergangenheit führt dazu, dass zahlreiche Altstandorte und Altablagerungen im Sinne des Altlastensanierungsgesetzes (ALSAG) als potentielle PFAS-Quellen in Frage kommen. Um bei der Identifizierung und Untersuchung von PFAS-Quellen möglichst rasch und effizient vorgehen zu können, wurde im Auftrag des österreichischen Umweltministeriums eine Strategie zum Management potenziell PFAS-belasteter Standorte ausgearbeitet und diese im Mai 2023 publiziert. Darin sind die wichtigsten, kurz- und mittelfristig umzusetzenden Maßnahmen im Rahmen der Vollziehung des Altlastensanierungsgesetzes beschrieben. In diesem Beitrag werden exemplarisch vorläufige Ergebnisse und Erkenntnisse aus der systematischen Erfassung und Untersuchung von Feuerlöschübungsplätzen im Bezirk Leibnitz, der Untersuchung eines großen Tanklagers in der Steiermark, großer Hausmülldeponien in Niederösterreich sowie eines textilverarbeitenden Betriebes in Vorarlberg dargestellt.

1 PFAS-STRATEGIE ALTLASTEN

Die breite Anwendung von PFAS in der Vergangenheit führt dazu, dass zahlreiche Altstandorte und Altablagerungen im Sinne des Altlastensanierungsgesetzes (ALSAG) als potenzielle PFAS-Quellen in Frage kommen. Um bei der Identifizierung von PFAS-Quellen möglichst rasch und effizient vorgehen zu können, wurden vom Umweltbundesamt im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft (BMLUK) alle ALSAG-relevanten Themenbereiche analysiert und daraus erforderliche Maßnahmen für den ALSAG-Vollzug abgeleitet. Die Ergebnisse wurden vom BMLUK im Mai 2023 publiziert („PFAS-Strategie im Rahmen der Vollziehung des Altlastensanierungsgesetzes“). Die im Jahr 2024 überarbeitete Version steht im Altlasten-Portal zum Download bereit (https://altlasten.gv.at/Ueber_Altlasten/fachthemen/pfas-strategie-altlasten.html).

Entsprechend der in der „PFAS-Strategie Altlasten“ identifizierten potenziellen PFAS-Quellen werden im Rahmen von ALSAG-Untersuchungsprogrammen derzeit folgende Standortgruppen prioritär untersucht:

- Feuerwehrlöschübungsplätze
  - Feuerwehrschule Lebring: Untersuchungen abgeschlossen, Altlastenausweisung erfolgt (siehe Beitrag von Jürgen Maier und Elisabeth Winkler in diesem Tagungsband)
  - Pilotprojekt zur Erfassung und Untersuchung im Bezirk Leibnitz (siehe 0)
- Standorte mit Fluorpolymerverwendung: Untersuchungen an zwei Standorten in Oberösterreich in Durchführung
- Flughäfen
  - Salzburg: Untersuchungen abgeschlossen; ein Teilbereich des Standortes wurde als Altlast mit Prioritätenklasse 1 ausgewiesen (Sicherungsmaßnahmen sind seit Jänner 2024 in Betrieb)
  - Wien und Linz: Untersuchungsprogramme in Durchführung
  - Innsbruck: Untersuchungsprogramm („Grundwassermonitoring“) abgeschlossen (keine Hinweise auf eine Grundwasserverunreinigung) → Verdichtung im Rahmen eines Untersuchungsprogrammes gemäß ALSAG veranlasst
  - Graz: Untersuchungsprogramm in Durchführung
  - Klagenfurt: Untersuchungsprogramm in Durchführung

- Militärflughäfen (Pilotstandorte): militärisch und zivil genutzter Flughafen Linz, Fliegerhorste Zeltweg und Aigen im Ennstal – Untersuchungsprogramme in Durchführung
- Tanklager und Raffinerien (z.B. Altlast „Tanklager Lannach“: siehe 0)
- PFAS-relevante Branchen (z.B. Textilindustrie: siehe 0)
- Altablagerungen
    - mit Dichtwandumschließungen oder Oberflächenabdichtung gesicherte Deponie-Altlasten: Pilotprojekte in Niederösterreich und Oberösterreich in Durchführung (siehe 0)

2 UMSETZUNGSBEISPIELE

2.1 Feuerwehrlöschübungsplätze im Bezirk Leibnitz

Zur systematischen Erfassung von Feuerlöschübungsplätzen wurde Ende 2022 im Bezirk Leibnitz ein Pilotprojekt im Rahmen von ALSAG-Untersuchungen gestartet, das neben der Erfassung und Lokalisierung von Feuerlöschübungsplätze freiwilliger Feuerwehren und Berufsfeuerwehren zum Ziel hat, die Übungsplätze entsprechend ihrer Nutzungszeiträume, Nutzungsfrequenzen und den eingesetzten Mengen an AFFF-Löschschäumen in Hinblick auf ihr Gefährdungspotential zu kategorisieren („keines“, „geringes“, „mittleres“, „hohes Gefährdungspotential“).

Dieses Untersuchungsprogramm ist mittlerweile abgeschlossen. Es konnten 63 Löschübungsstandorte identifiziert werden, in deren Bereich die Verwendung von PFAS-hältigen Löschschäumen in unterschiedlichem Ausmaß im ALSAG-relevanten Zeitraum vor 1990 sehr wahrscheinlich ist. Darauf aufbauend wird derzeit ein Untersuchungsprogramm für rund 30 der identifizierten Löschübungsplätze unterschiedlicher Kategorisierung durchgeführt, in dessen Rahmen exemplarisch Untergrund- und Grundwasseruntersuchungen durchgeführt und potenzielle PFAS-Schadensherde und die Schadstoffausbreitung untersucht werden.

In einem ersten Schritt wurde das Grundwasser an bestehenden Messstellen und Brunnen untersucht und dabei bei einigen Standorten Hinweise auf PFAS-Belastungen gefunden. Derzeit werden zusätzliche Grundwassermessstellen errichtet, um den Ursprung der Belastung identifizieren und die Schadstofffahnen abgrenzen zu können.

Auf Basis der im Zuge des Pilotprojektes gewonnenen Erfahrungen bei der Erfassung der Standorte und der Ergebnisse der Untersuchungen im Feld soll eine österreichweite Vorgangsweise zur Erfassung und Untersuchung von Feuerlöschübungsplätzen erarbeitet werden.

2.2 Tanklager Lannach

Der Altstandort „ELG Tanklager Lannach“ befindet sich im Gewerbe- und Industriegebiet nördlich der Ortschaft Lannach. Auf dem rund 300.000 m² großen Altstandort wird seit 1980 ein Tanklager mit einem Lagervolumen von rund 500.000 m³ Rohöl betrieben. Der Standort verfügt über neun Tanks, jeder der Tanks steht in einer Dichtwanne, die dem Füllvolumen des Tanks entspricht, und ist mit einer Löschanlage mit mehreren Schaumspritzen ausgestattet. Seit Inbetriebnahme des Tanklagers werden ein- bis zweimal jährlich Feuerlöschübungen durch die Betriebsfeuerwehr durchgeführt. Als Löschmittel kamen PFAS-haltige Löschschäume zum Einsatz (AFFF – Aqueous Film Forming Foams). Der Altstandort wurde im Rahmen eines ALSAG-Untersuchungsprogramms von 2021 bis Ende 2025 untersucht.

Aus den Ergebnissen der Grundwasseruntersuchungen lässt sich ableiten, dass im Grundwasserschwankungsbereich im Bereich des Altstandortes eine flächendeckende PFAS-Kontamination mit hoher Intensität vorhanden ist. Aufgrund der chemisch-physikalischen Eigenschaften von PFAS kann davon ausgegangen werden, dass die Kontamination vornehmlich auf die

ungesättigte Untergrundzone und die obersten Dezimeter der gesättigten Zone beschränkt ist. Dieser Bereich stellt eine erhebliche Kontamination im Sinne des ALSAG dar. Der Schadstoffeintrag erfolgte in weiten Bereichen vermutlich über temporäre Undichtheiten in dem unter den dichten Wannen verlaufenden Kanalsystem, über das die Niederschlagswässer der Freiflächen inkl. der Wannen zur Kläranlage abgeführt werden. Auf diese Weise dürften im Falle von Feuerlöschübungen mit den beschriebenen Löscheinrichtungen PFAS in das Kanalsystem und in weiterer Folge in den Untergrund und das Grundwasser gelangt sein. Ausgehend vom erheblich kontaminierten Bereich hat sich im Grundwasser eine mehr als 500 m lange und rund 500 m breite PFAS-Fahne ausgebildet. Die mittleren PFAS-Konzentrationen im unmittelbaren Grundwasserabstrombereich des Altstandorts sind sehr hoch (ca. 1 bis 5 µg/l). Die im Grundwasser transportierte PFAS-Fracht kann grob mit 0,4 g/d abgeschätzt werden. Dieser Wert liegt um den Faktor 8 über der als erheblich zu bewertenden Fracht von 0,05 g/d.

In der Kainach, die mit einem Mittelwasser von 4 m³/s nördlich des Altstandortes nach Südosten fließt, wurden PFAS-Konzentrationen bis 61 ng/l, im Median 10 ng/l, nachgewiesen (jeweils ca. 50 % davon PFOS). Daraus lässt sich die in der Kainach transportierte Schadstofffracht grob mit 3 g/d bis 4 g/d abschätzen. Der PFAS-Eintrag in die Kainach erfolgt vermutlich zum Großteil über das Grundwasser und teilweise über den Kläranlagenablauf.

Von der Grundwasserverunreinigung war auch eine mittlerweile nicht mehr genutzte Trinkwasserversorgung betroffen. Von dem Altstandort ging daher sowohl ein erhebliches Risiko für Menschen als auch für die Umwelt im Sinne des ALSAG aus und der Altstandort wurde als Altlast mit der Prioritätenklasse 1 ausgewiesen.

Untersuchungen diverser Gemüsesorten und tierischer Lebensmittel (Hühner(eier) und Fische) zeigten generell geringe PFAS-Konzentrationen. In Einzelfällen waren jedoch PFAS-Konzentrationen in Lebensmitteln festzustellen, die die zulässigen Höchstgehalte der EU-Richtlinie 2023/915 überschritten. Daraus kann geschlossen werden, dass ein relevanter Schadstofftransfer in Lebensmittel stattfinden kann, wenn PFAS-verunreinigtes Grundwasser als Gieß- oder Tränkwasser verwendet wird. Aufgrund der sehr begrenzten Probenanzahl können in diesem Zusammenhang keine allgemein gültigen Schlussfolgerungen gezogen werden.

2.3 (Gesicherte) Hausmülldeponien in Niederösterreich

Aus zahlreichen Studien ist bekannt, dass Sickerwässer aus Hausmülldeponien in vielen Fällen hoch mit per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) belastet sind. Altablagerungen ohne Basisabdichtung, auf denen relevante Mengen an Hausmüll oder ähnlichen Abfällen abgelagert wurden, können daher potenzielle Eintragsquellen von PFAS in die Umwelt, v. a. in das Grundwasser darstellen. Dies trifft einerseits auf den direkten Eintrag von Sickerwässern in das Grundwasser bei ungesicherten Altablagerungen zu, andererseits aber auch auf gesicherte Altablagerungen. Bei mittels Oberflächenabdichtung gesicherten Altlablagerungen ist dieser Eintrag zwar reduziert, kann aber aufgrund der sehr niedrigen „Schwellenwerte“ im Grundwasser (Vorschlag der EU-Kommission: 4,4 ng/l für die Summe aus 4 PFAS) trotzdem relevant sein. Im Falle von Altlasten, die mit Dichtwandsystemen gesichert sind, kann es aufgrund der notwendigen Wasserhaltungsmaßnahmen innerhalb der Umschließung zu einer Verlagerung von PFAS in Oberflächengewässer oder Klärschlämme kommen.

Bei den in Niederösterreich untersuchten Altablagerungen handelt es sich um 21 gesicherte und ungesicherte Altlasten, die einen relevanten Anteil an Hausmüll enthalten.

In zwei Durchgängen wurden Grund- und Pumpwässer in bestehenden Messstellen und (Wasserhaltungs-)Brunnen auf PFAS untersucht.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen zusammenfassend, dass im Grundwasserabstrom vieler Altablagerungen, bei denen noch keine Sicherungsmaßnahmen gesetzt wurden, erhöhte PFAS-Konzentrationen über dem Prüfwert der ÖNORM S 2088-1 von 0,05 µg/l (PFAS-20) bzw. 0,01 µg/l (Einzelsubstanzen) nachzuweisen waren. Dasselbe trifft auf Pumpwässer aus hydraulischen Sicherungssystemen zu. Die Maximalwerte lagen deutlich über 1 µg/l.

Das Projekt ist mittlerweile abgeschlossen. Derzeit wird bei einigen Standorten geprüft, inwieweit weitere Untersuchungen zur Abgrenzung der Schadstofffahnen im Grundwasser bzw. Maßnahmen in Hinblick auf die Einleitung PFAS-kontaminierter Pumpwässer in Oberflächengewässer oder in die Kanalisation notwendig sind.

2.4 Garnfabrik Schoeller

Auf dem Altstandort „Garnfabrik Schoeller“, der eine Fläche von rd. 34.000 m² umfasst, war im Zeitraum von 1896 bis 2023 ein Textilbetrieb tätig. Die Produktion umfasste eine Spinnerei zur Garnherstellung und eine Färberei. Zur Herstellung von Spezialgarnen für Sportwäsche, Autotextilien und anderen Funktionstextilien wurden vermutlich ab den 1970er Jahren Fluortensid-haltige Chemikalien beim Färben eingesetzt. Die Untersuchungen am Standort zeigen, dass im Bereich der Färberei auf einer Fläche von etwa 2.000 m² eine hohe Belastung des Untergrunds durch per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen vorhanden ist. Das Ausmaß dieser Verunreinigung wird mit 4.000 m³ bis 5.000 m³ abgeschätzt. Dieser Bereich des Altstandortes ist erheblich kontaminiert. Die Emissionen aus dem Schadensherd und die abströmende Schadstofffracht sind gering. Ein erhebliches Risiko für die Umwelt oder für die Gesundheit von Menschen ist nicht vorhanden. Entsprechend den Kriterien für die Prioritätenklassifizierung ergab sich die Prioritätenklasse 3, d.h. gemäß neuem ALSAG sind als Altlastenmaßnahmen Beobachtungsmaßnahmen ausreichend.

3 AUSBLICK

Mit der Veröffentlichung der „PFAS-Strategie Altlasten“ durch das BMLUK ist einerseits eine strukturierte Vorgangsweise im Rahmen der Vollziehung des ALSAG gewährleistet. Andererseits ist damit auch eine aus allen vorliegenden Informationen und Erkenntnissen abgeleitete und für die Öffentlichkeit nachvollziehbare Prioritätensetzung bei der Bewältigung dieser zentralen Umweltproblematik für den Themenbereich „historisch kontaminierte Standorte“ gegeben. In diesem Zusammenhang ist die „PFAS-Strategie Altlasten“ als thematische Vertiefung und Ergänzung des österreichischen „PFAS-Aktionsplanes“ zu sehen.

KONTAKT

Dr. Gernot Döberl
gernot.doeberl@umweltbundesamt.at
+43 664 966 8630
Umweltbundesamt, Team Altlasten
www.umweltbundesamt.at, Altlastenportal (inkl. Altlastenatlas): www.altlasten.gv.at

Entwicklung einer vollautomatisierten Online-SPE-LC-MS/MS Methode zur Bestimmung von PFAS in wässrigen Proben: Herausforderungen und methodische Fallstricke

Oliver Mann[1], Lilit Ispyrian[2], Daniel Tomsik[1], Oskar Schlesinger[1] & Werner Wruss[1]
[1)] ESW Consulting Wruss ZT GesmbH, Wien, Österreich
[2)] Trajan Scientific and Medical / Axel Semrau GmbH, Sprockhovel, Deutschland

KURZFASSUNG: Für die Analytik der meisten PFAS hat sich die Hochleistungsflüssigchromatographie gekoppelt mit Tandem-Massenspektrometrie (HPLC-MS/MS) als Stand der Technik etabliert. Für die Bestimmung von PFAS im Spurenbereich ist meistens eine Anreicherung über Festphasenextraktion (SPE) als Probenvorbereitung notwendig. Diese Arbeit beschreibt einen automatisierten Workflow mittels Online-SPE-LC-MS/MS in einem geschlossenen System. Dadurch werden Probenvorbereitung und Analyse effizienter, reproduzierbarer und weniger anfällig für Kontaminationen als bei der manuellen SPE. Eine wesentliche Herausforderung bei der PFAS-Analytik sind Blindwerte, da PFAS in zahlreichen Materialien vorkommen, sodass auf dem gesamten Weg von der Probenahme bis zur Messung vielfältige Kontaminationsmöglichkeiten bestehen. Dieses Risiko wird durch den Einsatz von fluorpolymerfreien Komponenten, Trap-Säulen zur Abtrennung systembedingter PFAS und regelmäßigen Blindwertkontrollen minimiert. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich aus der starken Wandadsorption insbesondere langkettiger PFAS. Zur Stabilisierung der Analyten wird den Proben bereits bei der Probenahme Methanol zugesetzt. Der hohe Methanol-Gehalt verschlechtert jedoch die Anreicherung auf der SPE-Kartusche sowie die chromatographische Trennung, insbesondere für kurzkettige PFAS. Dieser Zielkonflikt wird im CHRONECT-System durch eine Co-Solvatisierung in Kombination mit einer Elution im Peak-Focusing-Modus gelöst. Dieses Verfahren ermöglicht damit eine vollautomatische Probenvorbereitung und Injektion großer Probenvolumina, wodurch die Nachweisempfindlichkeit insbesondere für niedrige PFAS-Konzentrationen gesteigert wird, bei gleichzeitiger Reduktion des Lösungsmittelverbrauches.

1 EINLEITUNG

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) zählen aufgrund ihrer extremen Umweltpersistenz, Mobilität und teilweise bioakkumulierenden sowie toxischen Eigenschaften zu den analytisch wie regulatorisch anspruchsvollsten Stoffgruppen der Wasseranalytik. Mit der EU-Trinkwasserrichtlinie (EUR-Lex, 2020) und der österreichischen Trinkwasserverordnung sind 20 Einzelsubstanzen – Perfluorcarbon- und Perfluorsulfonsäuren mit 4 bis 13 Kohlenstoffatomen – mit niedrigen Bestimmungsgrenzen verbindlich zu erfassen (Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), 2026). Hoher Probendurchsatz bei großem manuellem Aufwand in der Probenvorbereitung und geforderte Empfindlichkeit im unteren ng/l-Bereich legen eine Automatisierung nahe. Der vorliegende Beitrag beschreibt die Entwicklung einer vollautomatischen Methode zur Bestimmung von PFAS in wässrigen Proben mittels Online-Festphasenextraktion gekoppelt mit Flüssigchromatographie und Tandem-Massenspektrometrie (Online-SPE-LC-MS/MS) auf Basis des CHRONECT-Systems von Trajan Scientific and Medical und erörtert die wesentlichen methodischen Fallstricke.

2 ONLINE-SPE-LC-MS/MS - HERAUSFORDERUNGEN

Für die Analytik der meisten PFAS hat sich die Hochleistungsflüssigchromatographie gekoppelt mit Tandem-Massenspektrometrie (HPLC-MS/MS) als Stand der Technik etabliert. Dabei wird die Probe entweder direkt analysiert oder vorher über Festphasenextraktion (engl. SPE, solid-phase-extraction) aufgereinigt und aufkonzentriert. Zur Bestimmung organischer Spurenstoffe in wässrigen Proben sowie in Extrakten fester Proben besteht die Möglichkeit, einen automatisierten Workflow in Form eines vollintegrierten online-SPE-LC-MS/MS-Systems einzusetzen, der in der Spurenanalytik für Trink-, Grund- und Oberflächenwasserproben bereits etabliert ist (Mann, Pock, Wruss, Wruss, & Krska, 2016). Dabei wird die zeitaufwändige manuelle SPE in einem miniaturisierten Format vollständig automatisiert und direkt mit der chromatographischen Trennung und massenspektrometrischen Detektion gekoppelt. Der Einsatz eines geschlossenen Systems reduziert das Risiko externer Kontaminationen erheblich und stellt die Reproduzierbarkeit der Analytik sicher. Gleichzeitig wird der Lösungsmittelverbrauch deutlich reduziert, der manuelle Arbeitsaufwand minimiert und die Prozesssicherheit erhöht. Die Methode basiert auf der CHRONECT Workstation PFAS von Trajan, die den gesamten Ablauf für PFAS in wässrigen und festen Umweltmatrizes automatisiert und sich an US EPA 1633 sowie EN 17892 orientiert (Ispiryan, Uber, & Bruchmann, 2025) (Trajan Scientific and Medical, 2026). Zentrale Komponenten sind ein PAL3-Robotiksystem oder ein Alias Autosampler für die Probenvorbereitung, eine Spritzenpumpe (HPD, high pressure dispenser) für Lösungsmittel- und Probentransport, ein automatischer Kartuschenwechsler (ACE, automated cartridge exchanger) mit WAX-Kartuschen (~3 mg Sorbens im PEEK-Gehäuse) sowie eine Elution im Peak-Focusing-Modus (Ispiryan, Uber, & Bruchmann, 2025). Die Übertragung des Online-SPE-Konzepts auf PFAS bringt jedoch stoffgruppenspezifische Schwierigkeiten mit sich.

2.1 Blindwertproblematik

Die zentrale Herausforderung der PFAS-Analytik ist die Beherrschung der Blindwerte. PFAS finden in zahlreichen Produkten Anwendung – darunter Bekleidung, Papier, Kunststoffe und auch in analytischen Geräten – sodass auf dem gesamten Weg von der Probenahme bis zur Messung vielfältige Kontaminationsmöglichkeiten bestehen. Im Messsystem selbst drohen falsch-positive Signale durch Kontaminationen über Schlauchverbindungen und Lösungsmittel sowie über Bauteile aus PTFE (Polytetrafluorethylen) und PVDF (Polyvinylidenfluorid) (Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), 2026). Gerade bei einem vollautomatischen Aufbau, in dem fluorhaltige Polymere in Ventilen, Dichtungen und Leitungen verbaut sein können, ist diese Problematik verschärft. In der CHRONECT Workstation PFAS wird dem konstruktiv begegnet: Es kommen PTFE-freie Leitungen, Edelstahlfritten und PEEK-Kartuschengehäuse zum Einsatz, und zwischen HPD sowie Pumpe und Injektor sind Trap-Säulen verbaut, die system- und lösungsmittelbürtige PFAS vom analytischen Signal abtrennen (Abbildung 1) (Ispiryan, Uber, & Bruchmann, 2025) (Trajan Scientific and Medical, 2026). Ergänzend bleiben regelmäßige Blindwertkontrollen unverzichtbar, ohne die eine belastbare Quantifizierung im Spurenbereich nicht möglich ist.

2.2 Adsorptionseffekte und der Zielkonflikt mit dem Methanolgehalt

Eine zweite Schwierigkeit ergibt sich aus der großen Bandbreite der physikalisch-chemischen Eigenschaften dieser Stoffgruppe. Die längerkettigen PFAS (ab ca. C >10) neigen dazu, an den Gefäßwänden der Probenahmegebinde zu adsorbieren, und sind dadurch der nachfolgenden Analytik nicht mehr vollständig zugänglich. Um diese Verluste zu unterdrücken, hat sich der Zusatz von 30–50 % Methanol bereits im Probenahmegefäß bewährt. Bei der Anreicherung über SPE-Kartuschen muss zudem sichergestellt sein, dass das Probenahmegefäß bei der Extraktion mit Methanol nachgespült wird.

Genau hier liegt der entscheidende methodische Zielkonflikt: Der zur Vermeidung der Wandadsorption erforderliche hohe Anteil an organischem Lösungsmittel kann seinerseits zu Verlusten bei der SPE-Probenvorbereitung und zu Problemen bei der anschließenden chromatographischen Messung führen. Insbesondere die kurzkettigen PFAS zeigen in Gegenwart hoher Methanol-Konzentrationen schlechtere Peakformen und Empfindlichkeiten, und es kann vermehrt zu Signalüberlagerungen kommen (Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), 2026). Anders als bei anderen organischen Stoffgruppen, bei denen derart hohe Lösungsmittelkonzentrationen bei der Probenstabilisierung in der Regel nicht notwendig sind, ist Methanol in der PFAS-Analytik als Stabilisierungsmittel funktional kaum ersetzbar.

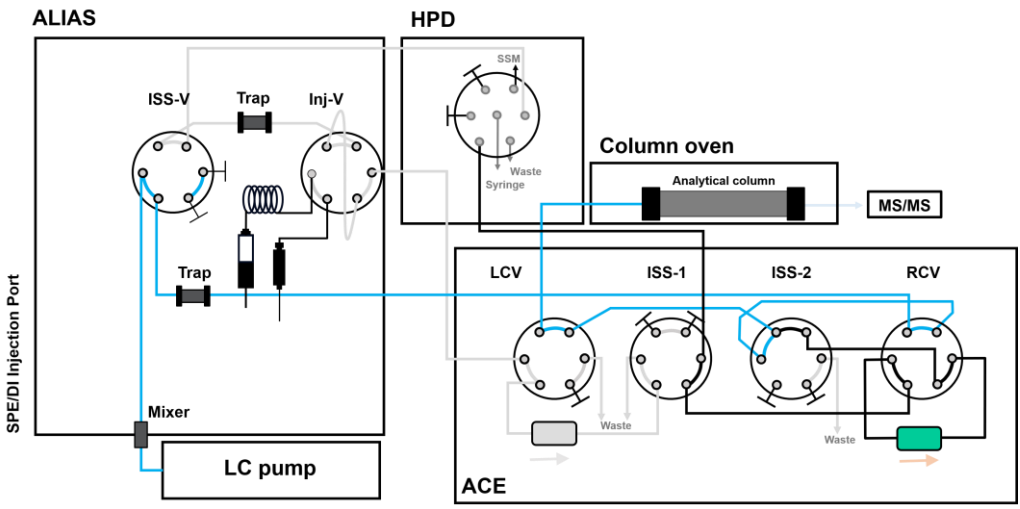


Abb. 1: Flussweg des Online-SPE LC-MS/MS Systems, mit Ventilschaltung in Peak Focusing-Elution; Elutionsfluss Kartusche trifft analytischen Gradientenfluss im t-Rotor des ISS-2 Ventils.

3 LÖSUNGSANSATZ - CO-SOLVATISIERUNG UND PEAK FOCUSING

Auch bei der CHRONECT Workstation PFAS wird für wässrige Proben ein methanolischer Co-Solvatisierungsansatz verfolgt. Durch Methanolzugabe auf einen Gehalt von 50 % werden potenziell wandadsorbierte Analyten stabilisiert und rückgelöst, bevor die Probe in das Online-SPE-LC-MS/MS-System injiziert wird (Ispiryan, Uber, & Bruchmann, 2025). Danach wird die nachteilige Wirkung des hohen Methanolgehalts auf die Chromatographie aber durch Elution im Peak-Focusing-Modus kompensiert. Der Elutionsfluss von der Kartusche wird über eine T-Rotordichtung des ACE-Ventils mit dem LC-Gradientenfluss zusammengeführt, sodass die Analyten am Kopf der analytischen Säule fokussiert werden und erst mit ansteigendem Gradienten in die Trennung eintreten – mit schärferen Peaks und verbesserter Trennung als Ergebnis (Ispiryan, Uber, & Bruchmann, 2025) (Trajan Scientific and Medical, 2026). Das Prinzip, eine Refokussierung der Analyten über die gezielte Steuerung des organischen Anteils beim Transfer von der SPE-Kartusche auf die Trennsäule zu erreichen, ist auch in anderen Arbeiten beschrieben (Mann, Pock, Wruss, Wruss, & Krska, 2016). Beim Beladen der Kartuschen bedarf es aufgrund des hohen Methanol-Gehaltes zusätzlich einer sehr genauen Abstimmung bezüglich des Extraktionsvolumens und der Beladungsgeschwindigkeit, damit eine ausreichende Adsorption der Analyten auf der Kartusche gewährleistet werden kann.

Aufgrund all dieser wechselseitigen Einflussfaktoren ist zur zuverlässigen Quantifizierung die durchgängige Verwendung isotopenmarkierter Standards unumgänglich, um Wiederfindungsraten und Matrixeffekte ausgleichen zu können.

3.1 Online-SPE Peak Focusing als Grundlage für Large Volume Injektionen

Ein weiterer methodischer Vorteil des Online-SPE-Konzepts in Kombination mit Peak Focusing liegt in der Möglichkeit, vergleichsweise große Probenvolumina zu verarbeiten, ohne die chromatographische Peakform zu beeinträchtigen. Während bei einer direkten LC-MS/MS-Injektion hohe Injektionsvolumina häufig zu Peakverbreiterung, Fronting oder Retentionszeitverschiebungen führen können, werden die Analyten im Online-SPE-Workflow zunächst auf der SPE-Kartusche angereichert und anschließend in einem fokussierten Elutionsband auf die analytische Säule übertragen (Abbildung 2).

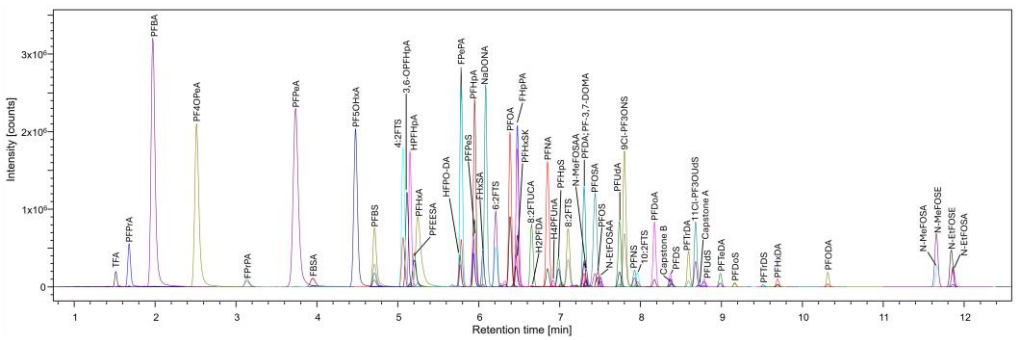


Abb. 2: Chromatographische Trennung von PFAS-Verbindungen von C2 bis zu C18 nach Fokussierung in der Online-SPE: Profil einer mit Standards gespikten PFAS-freien Wasserprobe, 500 µL Injektionsvolumen

Dadurch können Probenvolumina im Bereich von beispielsweise 500 µl bis 1 ml eingesetzt werden, ohne dass die Trennleistung in gleichem Maße leidet wie bei einer konventionellen Direktinjektion. Gleichzeitig ergibt sich durch das größere eingesetzte Probenvolumen ein Empfindlichkeitsgewinn, der insbesondere für die Bestimmung niedriger ng/l-Konzentrationen von Bedeutung ist.

Auch die Kalibrierstandards durchlaufen denselben Online-SPE-Peak-Focusing-Flussweg wie die Proben, sodass Anreicherung, Elution und chromatographische Refokussierung in der Kalibrierung gleichermaßen abgebildet werden (Abbildung 3).

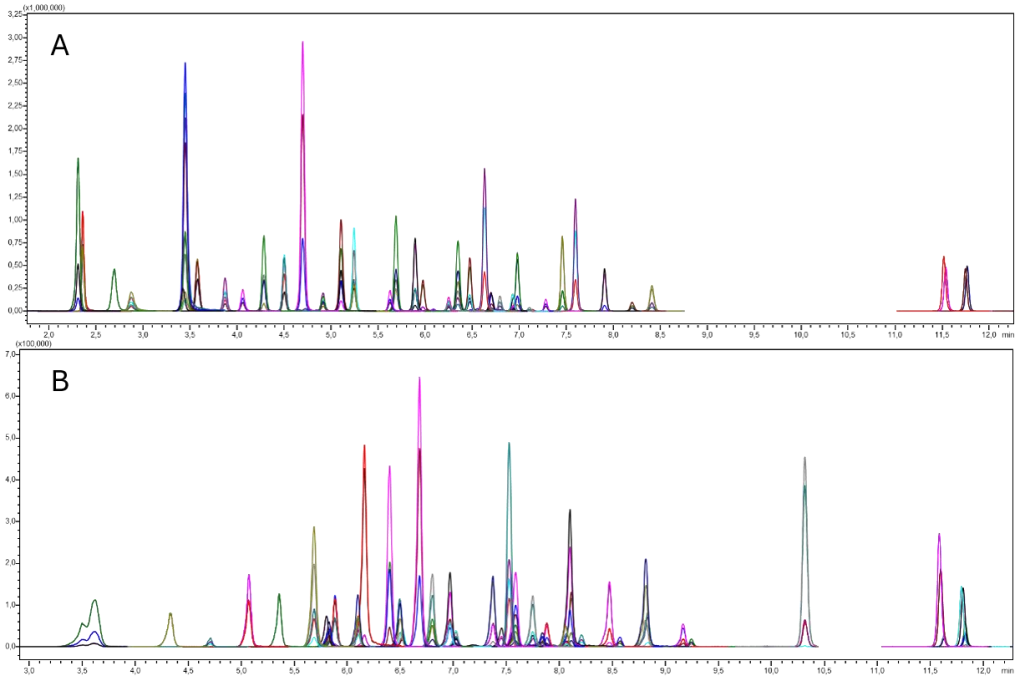


Abb. 3: A: Online-SPE-LC-MS/MS Profil einer mit Standards gespikten PFAS-freien Wasserprobe, 50 µL Injektionsvolumen. B: 10 µL Direktinjektion der gleichen gespikten Probe.

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die Automatisierung der PFAS-Bestimmung mittels online-SPE-LC-MS/MS bietet erhebliche Vorteile hinsichtlich des Durchsatzes, der Reproduzierbarkeit und des Probenhandlings, verlangt jedoch einer ausgewogenen Methodenentwicklung im Hinblick auf die Notwendigkeit hoher Methanol-Gehalte zur Unterdrückung von Wandadsorptionsverlusten einerseits und deren nachteiligen Auswirkungen auf Anreicherung und Peakform andererseits. Das CHRONECT-System von Trajan zeigt, dass dieser Konflikt durch fluorpolymerfreie Systemgestaltung mit Trap-Säulen, methanolische Co-Solvatisierung der Probe und Elution im Peak-Focusing-Modus aufgelöst werden kann (Ispiryan, Uber, & Bruchmann, 2025) (Trajan Scientific and Medical, 2026). Eine robuste Methode entsteht erst aus dem ausgewogenen Zusammenspiel dieser konstruktiven Maßnahmen mit einer durch isotopenmarkierten Standards und Blindwertkontrollen abgesicherten Qualitätssicherung.

LITERATURVERZEICHNIS

EUR-Lex. (16. Dezember 2020). Richtlinie (EU) 2020/2184 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. Von http://data.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj abgerufen

Ispiryan, L., Uber, T., & Bruchmann, A. (2025). Enhancing PFAS-Analysis in Solid and Liquid Environmental Matrices – A Fully Automated Approach. Poster, SETAC Europe. Wien.

Mann, O., Pock, E., Wruss, K., Wruss, W., & Krska, R. (2016). Development and validation of a fully automated online-SPE–ESI–LC–MS/MS multi-residue method for the determination of different classes of pesticides in drinking, ground and surface water. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2016.

Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), (2026). PFAS in der aquatischen Umwelt.

Trajan Scientific and Medical. (10. Juni 2026). Optimized Automated PFAS Workstation – CHRONECT™ Workstation PFAS. Von https://chronect.trajanscimed.com/pfas-workstation abgerufen

KONTAKT

DI Oliver Mann
oliver.mann@wruss.at
+43 699 13796150
Laborleitung
ESW Consulting Wruss ZT GesmbH
www.wruss.at

PFAS als Pfadfinder – der lange Weg von der Schadenserkundung zur Sanierung

Kai-Uwe Ulrich[1] & Dieter Poetke[1]
[1)] GICON® Resources GmbH, GB Wasser, Dresden, Deutschland

KURZFASSUNG: In diesem Beitrag wird der detektivische iterative Weg von der Ersterfassung einer kontaminationsverdächtigen Fläche eines ehemaligen Militärstandortes über die Phasen der orientierenden Untersuchung und Detailuntersuchung hin zur Sanierungsplanung veranschaulicht. Unterstützt durch eine Standortrecherche wurden Belastungsquellen sukzessive identifiziert und die Austragspfade über ein Drainagesystem und in den Grundwasser-Abstrom lokalisiert. Mittels DirectPush-Sondierungen wurde festgestellt, dass sich eine mehrere hundert Meter lange Schadstofffahne aus dem Grundstück hinausbewegt hat, wobei aufgrund des glazialen Lockergesteinsaquifers die PFAS bis in 30 m Tiefe nachgewiesen wurden. Als erste Gefahrenabwehrmaßnahme wurde die Beweidung der betroffenen Flächen eingestellt. Zur Unterbindung des PFAS-Austrags in Oberflächengewässer wurde eine Sanierungsplanung (Phase IIIa) vorgenommen, die über die Vorplanung mit Grundlagenermittlung zur Entwurfsplanung für eine Reinigungsanlage zur PFAS-Entnahme end-of-pipe (an den Auslässen der Drainageleitungen) führte. Der Beitrag skizziert auch die Konzeption und Auslegung dieser Wasserbehandlungsanlage (WBA), mit der auf Basis von Aktivkohle die maßgeblichen PFAS-Substanzen (PFOS, PFHxS und PFNA) abgereinigt werden sollen.

1 METHODIK UND HISTORIE DER ERKUNDUNG

Es begann 2017 damit, dass man auf Basis von analytischen Befunden eines Flächenscreenings entlang des Rollfeldes eines ehemaligen Militärflugplatzes mit einer untypischen Kontaminationsverteilung konfrontiert wurde und dieser folgerichtig misstraute. Die berechtigten Zweifel sollten vor diesem Hintergrund mit einer Zweituntersuchung ausräumt werden. Von rund einhundert Bodenproben blieben vier Proben einer Nebenfläche übrig, bei denen sich der Kontaminationsverdacht erhärtete. Gemäß dem Ablaufschema für den Umgang mit kontaminationsverdächtigen / kontaminierten Flächen (KVF/ KF) (BMVg & BImA, 2025) schloss sich an Phase I (Historische Erkundung) eine Phase IIa (Orientierende Untersuchung) an, die aufgrund positiver Befunde den Untersuchungsraum stetig wachsen ließ, der jedoch keinen Bezug zum Rollfeld aufwies. Anhand der Quotientensumme (Stufe-2-Werte, gemäß Bundesamt für Infrastruktur, 2024) für PFAS-Konzentrationen im Eluat 2L/kg von Schurfproben 0–30 cm und vier Kleinrammbohrungen wurde 2019 eine belastete Fläche von ca. 2.700 m² eingegrenzt (Abb. 1). Zugleich gab es Hinweise auf PFAS-Belastungen in einem Drainagesystem, das in einen Vorfluter entwässert.

Daraufhin wurden im Rahmen der Phase IIb (Detailuntersuchung) ein monatliches Monitoring des Drainagewassers über 12 Monate und eine historische Standortrecherche durchgeführt, sowie mehrere Schächte, Leichtflüssigkeitsabscheider und Grundwassermessstellen untersucht. Dadurch wurden das ehemalige (vollständig rückgebaute) Feuerlöschübungsbecken und die ebenfalls beseitigte Feuerwehrgerätehalle lokalisiert. Mit Hilfe geophysikalischer Ortungsverfahren wurde der Verlauf der Drainageleitungen konkretisiert. Nachdem tiefere Kleinrammbohrungen eine hohe PFAS-Belastung auch in tieferem Grundwasser nachgewiesen hatten, wurde mit einer gestuften Untersuchungsstrategie entlang mehrerer Kontrollebenen mittels DirectPush (dp)-Sondierungen bis 30 m Tiefe der Verlauf der Schadstofffahne erkundet und eingegrenzt. Da die PFAS-Konzentrationen stark variierten, wurden die Summenwerte in standortspezifische Bewertungsklassen zwischen geringfügig und extrem hoch eingestuft und farblich gekennzeichnet (Tab. 1).

Tab. 1: Standortspezifische Bewertungsklassen zur Einteilung der PFAS-Belastung; Quotientensumme gebildet gemäß (Bundesamt für Infrastruktur, 2024). Aus der Einstufung „geringfügig“ ergibt sich kein zwingendes Erfordernis von Maßnahmen zur Gefahrenabwehr bzw. Sanierung.

Bewertungsklasse	Quotienten-Summe (Stufe-1)	PFAS-Summe im 2:1 Eluat (µg/L)
geringfügig	≤ 1	≤ 0,1
niedrig	> 1 - 5	> 0,1 - 0,5
mäßig	> 5 – 10	> 0,5 - 1,0
hoch	>10 – 20	> 1,0 - 2,0
sehr hoch	> 20 – 120	> 2,0 - 10
extrem hoch	> 120	> 10
weiß		keine Daten

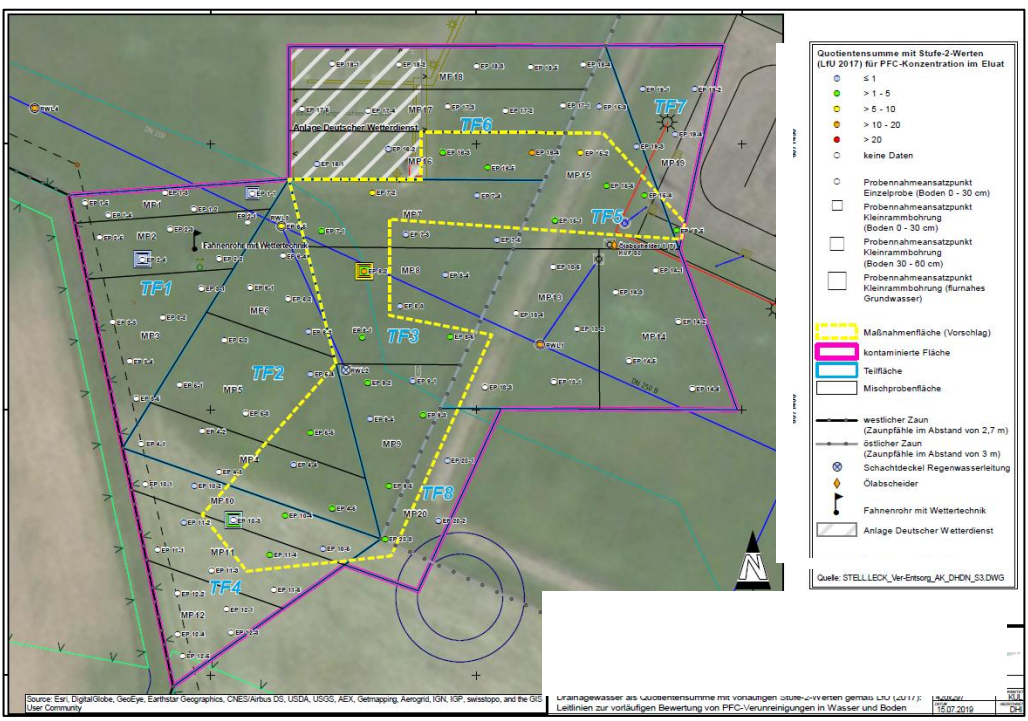


Abb. 1: Einstufung der PFAS-Analysenwerte von Bodeneluat, flurnahem Grundwasser und Drainagewasser als Quotientensumme mit Stufe-2-Werten (LfU, 2017) zur vorläufigen Abgrenzung der Maßnahmenfläche

2 ERGEBNISSE ZUR KONTAMINATIONSSITUATION

2.1 Drainagewasser-Situation

Die Abflussspende aus den drei zur Entwässerung/Flurabstandsregulierung angelegten Drainageleitungen erwies sich als sehr variabel und stark vom Niederschlag und Grundwasserstand abhängig. Im Monitoringzeitraum 2019−20 betrugen der mittlere Gesamtabfluss (MQ) 6,4 m³/h und der Median 7,5 m³/h. Während im Sommerhalbjahr 2020 bei niedrigen Grundwasserständen das Drainagesystem etwa 2 Wochen komplett trockengefallen war (Q_{min} 0 m³/h), wurden in der

feuchten Jahreszeit bei hohen Grundwasserständen im Nov. 2019 Abflüsse bis 16,7 m³/h (Q_{max}) registriert (Abb. 2). Ein noch höherer Abfluss konnte nicht quantifiziert werden, da der Wasserstand im Rb auf dem Niveau der Drainagemündungen lag. Spätere Stichtagsmessungen ergaben Drainageabflüsse von 1,1 m³/h (Juli 2022), 2,0 m³/h (August 2023), 1,0 m³/h (Oktober 2023), 2,0 m³/h (August 2024) und 3,7 m³/h (Februar 2025).

Im Monitoringzeitraum 2019/20 variierte die PFAS-Mischkonzentration des Drainagewassers zwischen 0,2 und 2,7 µg/L (Abb. 2). Spätere stichtagsbezogene Analysenwerte lagen ebenfalls in diesem Schwankungsbereich. Hohe Abflüsse gingen meist mit hohen PFAS-Konzentrationen einher und niedrige Abflüsse mit niedrigen PFAS-Konzentrationen. Es war aber auch ein Hysterese-Effekt sichtbar, d.h. langsamer sinkende PFAS-Konzentrationen bei schnell zurückgehenden Abflüssen und Grundwasserständen, und PFAS-Konzentrationsspitzen bei Niederschlagsereignissen nach längerer Trockenwetterperiode. Das Muster der PFOS-Konzentration im Drainagewasser war dem Bild der PFAS-Summe im Eintragsbereich sehr ähnlich, zumal PFOS rund zwei Drittel der PFAS-Summe im Drainagewasser ausmachte.

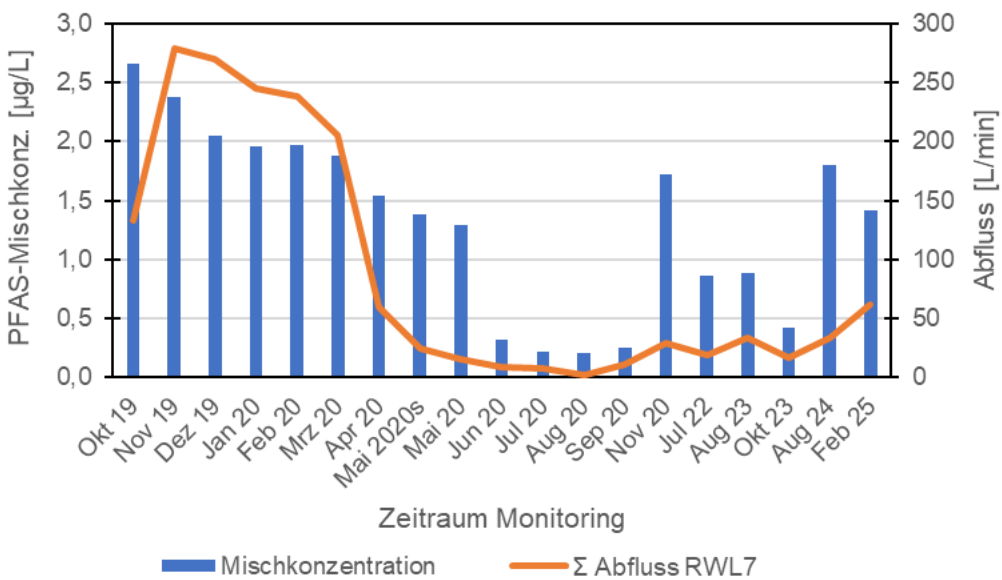


Abb. 2: Darstellung der berechneten PFAS-Mischkonzentration aus den Drainagewässern RWL7.1, 7.2 und 7.3 im Monitoringzeitraum 2019–2020, ergänzt mit Daten aus 2022–2025

2.2 Grundwasser-Situation

Nachdem im ersten Schritt von Phase IIb mittels Kleinrammbohrung (KRB) mehrere temporäre Grundwassermessstellen im Umfeld des ehemaligen Feuerlöschübungsbeckens und der Feuerwehrgerätehalle installiert und beprobt worden waren, folgten im zweiten Schritt zunächst entlang der Grundstücksgrenze dp-Sondierungen bis 30 m Tiefe, um die Tiefenverteilung von PFAS-13 im Grundwasser zu erfassen. Dabei wurde jedes zweite Einmeter-Intervall beprobt. Starke Trübung behinderte teilweise die Förderung von GW-Proben. Oberflächennahes Grundwasser offenbarte sehr hohe PFAS-Konzentrationen, > 7 m u. GOK lagen stellenweise extrem hohe PFAS-Konzentrationen vor (Abb. 3). Die maximale Konzentration erreichte 37 µg/L bei DP07. Es dominierten PFOS und PFNA, PFHxS rangierte an dritter Stelle (Abb. 4).

An der **1. Kontrollebene** (KE) mit 25 m Abstand zur Grundstücksgrenze (DP08−DP12, DP25) waren die PFAS-Konzentrationen im flurnahen GW bis 8 m u. GOK mit einer Ausnahme sehr niedrig. Darunter traten bis 14 m Tiefe schlagartig extrem hohe PFAS-Konzentrationen zwischen 25–30 µg/L auf, die sich bis mindestens 20 m Tiefe ausdehnten. Südlich des Feuerlöschbeckens waren die PFAS-Konzentrationen durchweg niedrig (Abb. 3).

Die **2. KE** umfasste DP13 bis DP18 rund 100 m westlich der Grundstücksgrenze. Ein vorlaufendes EC-Bodenprofil indizierte durchweg kiesigen Sand und wenig rein sandige Bereiche ohne stauende Lagen. Mit Ausnahme der beiden lateralen Ansatzpunkte zeigte der zentrale Fahnenbereich unterhalb von 20 m Tiefe extrem hohe PFAS-Konzentrationen bis 19,5 µg/L (DP17). Das Zentrum der Schadstofffahne befand sich bei DP16 und DP17 in 18 m bis mindestens 26 m Tiefe, mit Konzentrationsmaxima zwischen 20 und 24 m Tiefe. Es dominierten PFNA und PFHxS, im Zentralbereich auch PFOS.

Für die **3. KE** wurden 3 Ansatzpunkte (DP19−DP21) ca. 200 m westlich der Grundstücksgrenze verortet. Erhöhte PFAS-Konzentrationen bis 0,65 µg/L fanden sich erst in der größten beprobten Tiefe von 29–30 m (DP20). Dominant war hier PFHxS, gefolgt von PFNA. Bei drei 100 m weiter westlich nahe eines Bachufers angeordneten Ansatzpunkten (**4. KE**, DP22−DP24) überraschte das Tiefenprofil von DP23 mit sehr hohen PFAS-Konzentrationen in ca. 9−28 m Tiefe (maximal 15,8 µg/L), wobei oberhalb von 15 m Tiefe PFNA und darunter PFHxS dominierte. An den lateralen Ansatzpunkten erreichte die PFAS-Belastung maximal 4,5 µg/L in 17–18 m Tiefe. Entlang des Ost-West-Transekts DP07/DP09 bis DP23 gingen die PFAS-Konzentrationen von >30 µg/L auf 16 µg/L zurück. Lediglich bei DP20 und DP21 stieg die PFAS-Konzentration unterhalb von 23 m Tiefe nicht über 0,65 µg/L an, wobei der PFHxS-Anteil zu Lasten von PFOS in GW-Strömungsrichtung nach Westen tendenziell zunahm (Abb. 4).

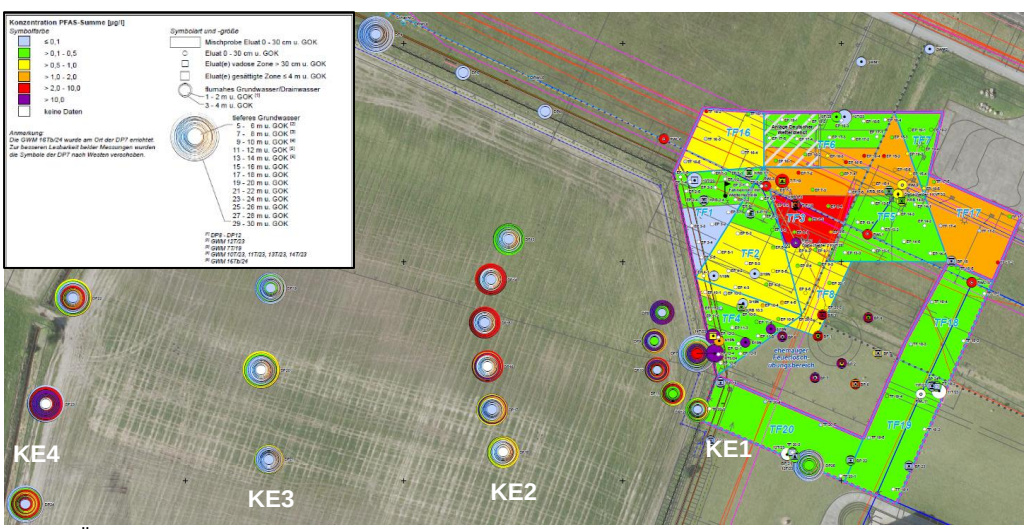


Abb. 3: Übersichtskarte PFAS-13 im Bodeneluat (2 L/kg TS) von Einzel- und Mischproben, im flurnahen und tieferen Grundwasser des Quellbereichs und der Kontrollebenen (KE) in Fahnenrichtung 2018−2025

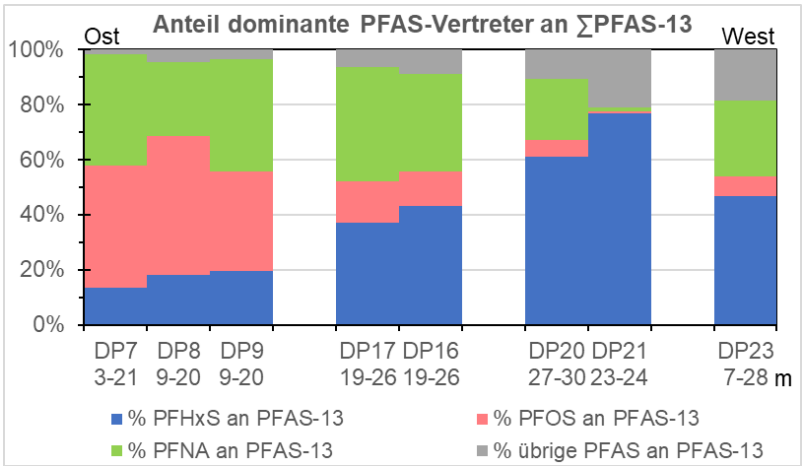


Abb. 4: Durchschnittliche Anteile der 3 dominanten und weiterer PFAS-Parameter an der Konzentrationssumme PFAS-13 im Grundwasser entlang Transekt vom Quellbereich (Ost) zum Vorfluter (West)

Weitere Erkundungsarbeiten sind notwendig, um die Ursachen für das angetroffene PFAS-Verteilungsmuster (Abb. 3, Abb. 4) zu ergründen.

3 HISTORISCHE STANDORTRECHERCHE UND LEITUNGSERKUNDUNG

Im Zuge der Recherche von alten Lageplänen und Gutachten wurde ein unbezeichneter Doppelring dem ehemaligen Löschübungsbecken zugeordnet (Abb. 3) und Fotos aus der Zeit vor dem Rückbau ausgewertet. Überdies wurden Gespräche mit Zeitzeugen geführt. Die neue Lageinformation bedeutete eine südwärts ausgerichtete Ausdehnung des Untersuchungsbereichs. Mit weiteren KRB wurde der Boden- und Grundwasserbereich rund um den ehemaligen Feuerlöschübungsbereich (FLB) intensiv untersucht und als extrem PFAS-belastet eingestuft. Außerdem wurde mit Hilfe der bereits benannten geophysikalischen Ortung eine Verbindung vom ehemaligen Löschübungsbecken über einen (defekten) Leichtflüssigkeitsabscheider bis zur Hauptdrainage und damit ein direkter Entwässerungsweg in Richtung Vorfluter nachgewiesen. Eine weitere Drainageleitung führte unweit der ehemaligen Feuerwehrgerätehalle entlang, wo auch punktuell hohe PFAS-Belastungen in Boden und Grundwasser angetroffen wurden.

4 MASSNAHMEN ZUR GEFAHRENABWEHR UND SANIERUNG

Da der Schadstofftransferpfad Boden–Nutzpflanze flächenabhängig nicht sicher zu quantifizieren war, wurde vorsorglich die Beweidung und die Futtermittelgewinnung von KF und KVF eingestellt. Für den Transferpfad Boden–Sickerwasser–Oberflächengewässer wurde eine Sicherungsmaßnahme end-of-pipe konzipiert, um den stetigen PFAS-Austrag aus dem Grundstück aufzuhalten. Da keine Grundwassernutzung bekannt ist, wurde eine Sanierung in Bezug auf den Transferpfad Boden–Grundwasser vorerst zurückgestellt.

5 STAND DER SANIERUNGSPLANUNG

5.1 Grundlagenermittlung und Vorplanung

Die Konzeption einer Wasserbehandlungsanlage zur PFAS-Entnahme end-of-pipe begann 2022 mit der Grundlagenermittlung und Vorplanung (Phase IIIa). Zum damaligen Zeitpunkt bot sich die Adsorption an Aktivkohle (AK) als das wirtschaftlichste Verfahren an (Edel H.G., 2018). Als besondere Leistung wurden Laborversuche zur Eignung und Auswahl von fünf Aktivkohle-Typen mit PFAS-belastetem Standortwasser konzipiert und durchgeführt.

In Stufe 1 wurden klassische Batchversuche zum qualitativen Sorptionsverhalten mit zwei verschiedenen AK-Einwaagen durchgeführt. In Stufe 2a wurden Sorptionsisothermen aufgenommen, um die maximale Beladungskapazität der AK zu bestimmen. Stufe 2b bildeten Batchversuche zur Kinetik, um die minimale Kontaktzeit für eine effektive Adsorption zu ermitteln. Die Stufe 3 bildeten Säulenversuche zur Aufnahme einer Durchbruchskurve für zwei präferierte AK-Typen. Die Auswertung der Isothermen erfolgte nach dem Freundlich- und Langmuir-Modell, der Stoffdurchbruch mit einem statischen Prognosemodell.

Den relativen Stoffdurchbruch abhängig vom AK-Bettvolumen für die präferierte AK mit der höchsten maximalen PFAS-Beladungskapazität zeigt Abb. 5. Erwartungsgemäß brach die kürzerkettige PFHxS früher durch als die längerkettige PFNA.

Entsprechend den Modellprognosen betragen die Standzeiten der Aktivkohle (Erstdurchbruch nach dem jeweils 2. Filter der Behandlungsstraße) bei durchschnittlichen Abflussbedingungen und Konzentrationen (6,4 m³/h, PFAS-13: 0,94 µg/L) und Nutzung einer Behandlungsstraße ca. 9,5–10 Monate (Tab. 2). Bei Hochlastbedingungen (15,0 m³/h, PFAS-13: 2,0 µg/L) und Nutzung von zwei Behandlungsstraßen würde die prognostizierte Standzeit ca. 6–6,5 Monate; mit einer Behandlungsstraße die Hälfte dieser Zeit betragen.

Da im Jahresverlauf nicht prognostizierbare Zwischenformen dieser beiden Szenarien auftreten können (niederschlagsreiche Winterperiode und niederschlagsarme Sommerperiode), und die zukünftigen Durchflussmengen und PFAS-Konzentrationen naturgemäß schwanken werden, wurde eingeschätzt, dass die Filterstandzeiten im Durchschnitt etwa 200 bis 300 Tage (→ Mittelwert 250 Tage) betragen werden. Es kann daher von einem Erfordernis für den Aktivkohlewechsel alle 6,5 bis 10 Monate ausgegangen werden.

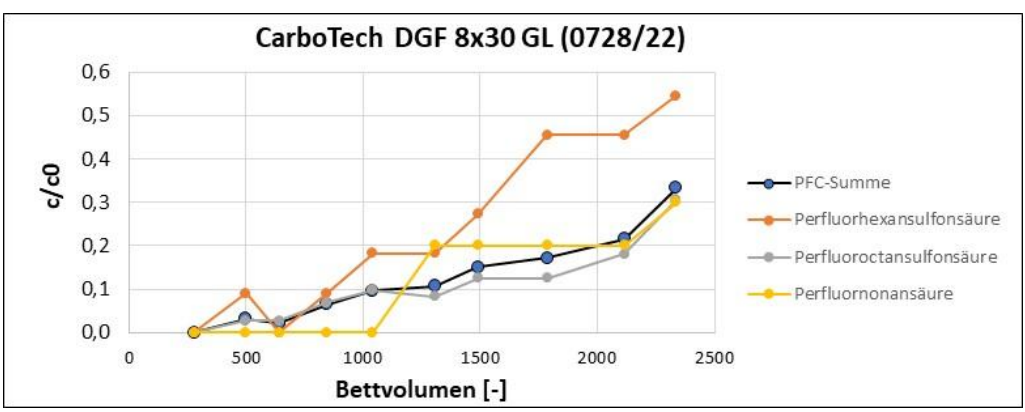


Abb. 5: Relative Einzelstoff-Konzentrationen c/c0 gegenüber dem Aktivkohle-Bettvolumen für Versuchsstufe 3 – Säulenversuche am Beispiel des AK-Typs CarboTech DGF 8x30 GL

Tab. 2: Berechnete Filterstandzeiten für die Szenarien (Sz.) mit Prognose Stofferstdurchbruch

Sz.	Stoff	Durch-fluss	Eingangskon-zentration	Durchbruch hinter Filter*	Aktivkohle-menge (m³/t)	Überschreitung Grenzwert nach
1	PFAS-13	6,4 m³/h	0,93 µg/L	AK 1	7 m³ / 2,66 t	132 Tagen
2	PFAS-13	6,4 m³/h	0,93 µg/L	AK 2	14 m³ / 5,32 t	**296 Tagen**
3	PFAS-13	15,0 m³/h	2,0 µg/L	AK 1/3	14 m³ / 5,32 t	77 Tagen
4	PFAS-13	15,0 m³/h	2,0 µg/L	AK 2/4	28 m³ / 10,64 t	**188 Tagen**
5	PFOS	6,4 m³/h	0,59 µg/L	AK 1	7 m³ / 2,66 t	133 Tagen
6	PFOS	6,4 m³/h	0,59 µg/L	AK 2	14 m³ / 5,32 t	**296 Tagen**
7	PFOS	15,0 m³/h	1,3 µg/L	AK 1/3	14 m³ / 5,32 t	87 Tagen
8	PFOS	15,0 m³/h	1,3 µg/L	AK 2/4	28 m³ / 10,64 t	**210 Tagen**

5.2 Entwurfsplanung

Nach einer Variantenprüfung zur Mitbehandlung von PFAS-belastetem Grundwasser wurde mit der Entwurfsplanung Ende 2025 ein modulares Anlagenkonzept entwickelt. Darin wird die Errichtung der WBA als funktionale Einheit mit dem Reinigungsziel, der Verfahrensbeschreibung und den baulichen und technischen Bestandteilen beschrieben. Das Blockfließbild (Abb. 6) demonstriert die wesentlichen Verfahrensstufen zur Reinigung des alleinig mit PFAS kontaminierten Drainagewassers:

- Sammlung und Vereinigung der belasteten Drainagewässer in einem Vorlagebehälter;
- Vergleichmäßigung und passive Belüftung des Drainagewassers sowie Abfangen von partikulären Metalloxiden/ -hydroxiden und anderen Schwebstoffen in einem rückspülbaren Kiesfilter, der der PFAS-Reinigungskolonne vorgeschaltet wird;
- Mehrstufige Abreinigung der PFAS über drei in Reihe-Wechselschaltung betriebene Filtereinheiten mit Wasseraktivkohle (WAK), wobei der letzte WAK-Filter als Polizeifilter dient.

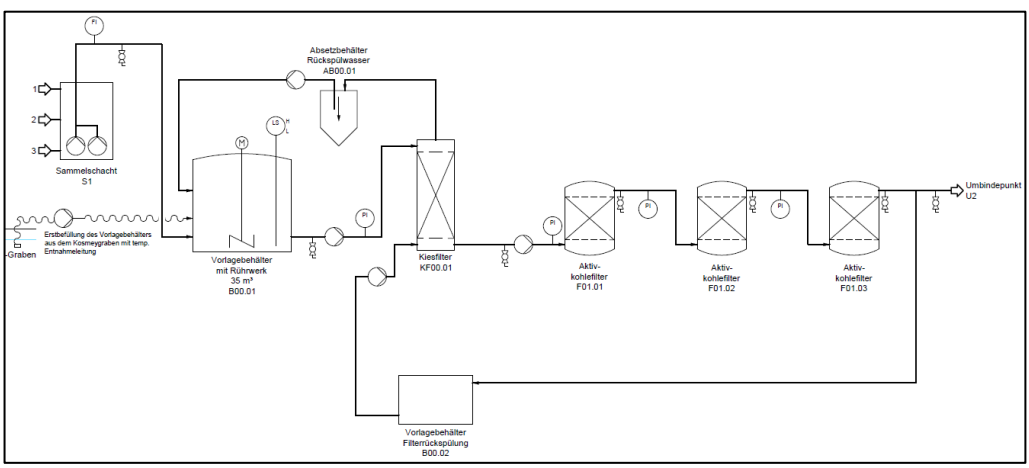


Abb. 6: Blockfließbild mit Darstellung Inbetriebnahmezustand der Wasserbehandlungsanlage

Die Behandlungsstraße der WBA ist auf einen maximalen Durchsatz von 10 m³/h ausgelegt, wobei der mittlere Drainagewasser-Zulauf der letzten Jahre mit ca. 2 bis 4 m³/h abgeschätzt wird. Da die Drainagewasser-Spende bei extremer Trockenheit bis auf null zurückgehen kann, wird die WBA auch für den Intervallbetrieb ausgelegt. Die Möglichkeit zur späteren Nachrüstung einer zweiten Behandlungsstraße mit ähnlicher Filterkonfiguration ist vorgesehen.

6 SCHLUSSFOLGERUNG

Dieses multidisziplinär bearbeitete Praxisbeispiel von einem ehemaligen Militärflugplatz zeigt, wie ein durch akribische Recherche und steten Befundzuwachs geleitetes iteratives Vorgehen, gestützt auf einheitliche Richtlinien (BMVg & BImA, 2025) und gekoppelt mit pragmatischen situativen Konzepten, zu belastbaren Ergebnissen und einem der Gefährdungssituation angemessenen Handeln führen kann. Daraus lassen sich Empfehlungen für längerfristige Handlungserfordernisse, objektspezifisch angepasste Untersuchungsstrategien und zielgerichtete nachhaltige und verhältnismäßige Sanierungsmaßnahmen ableiten. Wie die Detailerkundung der PFAS-Schadstofffahne aktuell zeigt, ist die Abgrenzung in westliche Richtung und in die Tiefe noch nicht abgeschlossen, und neue Aspekte für die Kontaminationshypothese sind zu prüfen. Als wesentliche Erkenntnis leitet sich ab, dass die ermittelte Komplexität der Schadstoffpräsenz und -verteilung des hier untersuchten Standorts auch bei anderen Militärstandorten nicht untypisch sein wird.

LITERATURVERZEICHNIS

BMVg & BImA. (Sept. 2025). Baufachliche Richtlinien Boden- und Gewässerschutz. www.bfr-bogws.de, Deutschland.

Bundesamt für Infrastruktur (März 2024). PFAS-Leitfaden für Liegenschaften des Bundes. Anhang A-8.2 der Baufachlichen Richtlinien Boden- und Grundwasserschutz, 5. Auflage, Deutschland.

Edel H.G. & al. (2018). PFC-Grundwassersanierungen: Stand der Technik und Kostenvergleich. In *Handbuch Altlastensanierung und Flächenmanagement (HdA), 83. Aktualisierung* (S. 5904, 1-33).

LfU. (April 2017). Leitlinien zur vorläufigen Bewertung von PFC-Verunreinigungen in Wasser und Boden. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Bayern, Deutschland.

KONTAKT

Dr. Kai-Uwe Ulrich
k.ulrich@gicon.de
+49 351 47878 9843 mobil: +49 151 53833240
Principal Consultant im FB Oberflächenwasser
GICON® Resources GmbH
www.gicon-resources.de

Permeable reaktive Schadstoffbarriere für die Sicherung PFAS-belasteter Böden in der Deponie oder im Feld

Christoph Schmüdderich[1], Herbert Lassnig[2] & Stefan Niewerth[3]
[1)] HUESKER Synthetic GmbH, Anwendungstechnik, Gescher, Deutschland
[2)] HUESKER Synthetic GmbH, Vertrieb GEO DACH, Österreich
[3)] Taberg Ingenieure GmbH, Projektleitung, Lünen, Deutschland

KURZFASSUNG: Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) stellen aufgrund ihrer hohen Persistenz, Mobilität und Toxizität eine wachsende Herausforderung für das Boden- und Abfallmanagement dar. Viele PFAS-Verbindungen sind wasserlöslich und können aus belasteten Böden in das Grundwasser gelangen. Konventionelle Deponiebasisabdichtungen können die langfristige Migration von PFAS nicht vollständig verhindern, während stationäre Sickerwasserbehandlungen aufwendig und kostenintensiv sind. Als Alternative wurde eine permeable, reaktive Schadstoffbarriere (PR-GBR) entwickelt. Das geotextile Flächenfiltersystem kann direkt in Deponie- oder Sanierungssysteme integriert werden und kombiniert Trenn- und Filterfunktionen mit einer adsorptiven Aktivschicht, welche PFAS selektiv aus dem perkolierenden Sickerwasser bindet. Labor- und Feldversuche zeigen eine hohe Rückhaltewirkung für kurz- und langkettige PFAS mit Abscheideeffizienzen von bis zu 99,7 %. Neben dem Einsatz in Deponiebasisabdichtungen eignet sich die Technologie auch zur ortsnahen Sicherung PFAS-belasteter Böden.

1 EINLEITUNG

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) stellen aufgrund ihrer hohen Persistenz, Mobilität und teilweise toxischen Eigenschaften eine wachsende Herausforderung für die Altlastensanierung und den Umgang mit belasteten Böden dar. Viele der über 10.000 bekannten PFAS-Verbindungen sind wasserlöslich, können sich im Boden ausbreiten und ins Grundwasser gelangen. In Verbindung mit rechtlichen Anforderungen führt dies häufig zur Deponierung großer Bodenmengen. Gleichzeitig stehen Deponiebetreiber vor begrenzten Kapazitäten, steigenden Kosten und hohem Aufwand für die Behandlung PFAS-haltiger Sickerwässer. Daher gewinnen technische Lösungen an Bedeutung, die eine sichere Ablagerung ermöglichen und die Schadstoffausbreitung begrenzen (Schmüdderich, Niewerth, Hangen, & Nagel, 2025). Moderne Deponiebasisabdichtungen aus einer geologischen und technischen Barriere sowie einer Drainageschicht reduzieren den Schadstoffaustrag in den Untergrund erheblich. Untersuchungen zeigen jedoch, dass selbst hochwertige Verbundabdichtungen einen langfristigen PFAS-Austrag infolge von Diffusions-, Sorptions- und Desorptionsprozessen sowie potenziellen Fehlstellen nicht vollständig verhindern können. Auch die Behandlung PFAS-belasteter Sickerwässer ist aufgrund der hohen chemischen Stabilität der Stoffgruppe anspruchsvoll. Häufig sind dafür Aktivkohle-, Ionenaustauscher- oder Membranverfahren erforderlich, die mit erheblichem technischem und wirtschaftlichem Aufwand verbunden sind. Vor diesem Hintergrund wurden permeable, reaktive geotextile Schadstoffbarrieren (PR-GBR) entwickelt, welche gelöste Schadstoffe zurückhalten und oberhalb der Drainageschicht als Ersatz für das Trenn- und Filtervlies eingesetzt werden können. Dadurch wird eine Behandlung des Sickerwassers am Ort der Schadstoffentstehung ermöglicht. Dieser Beitrag beschreibt das Konzept adsorptiver Deponiebasisabdichtungen und PFAS-Monozellen auf Basis von PR-GBR und diskutiert deren Potenzial zur Rückhaltung von PFAS in Deponiesickerwässern.

2 PERMEABLE REAKTIVE GEOSYNTHETISCHE SCHADSTOFFBARRIERE (PR-GBR)

2.1 Geotextile Komponenten

Die geotextilen Komponenten einer PR-GBR bestehen aus Geweben und/oder Vliesstoffen, die durch Vernadelung/Vernähung miteinander verbunden werden. PR-GBR weisen einen Durchlässigkeitskoeffizienten von $k \geq 1 \cdot 10^{-5}$ m/s auf, sodass Sickerwasser ungehindert durch sie strömen kann. Die geotextilen Komponenten übernehmen folgende Aufgaben (ISO 10318-1:2018):

- **Trennen:** Verhindern des Vermischens benachbarter ungleicher Böden und/oder Schüttmaterialien durch den Einsatz eines Geokunststoffes.
- **Filtern:** Verhindern des unkontrollierten Durchgangs von Boden oder anderen Partikeln, die hydrodynamischen Kräften ausgesetzt sind, während der Durchgang von Flüssigkeiten in oder durch ein geosynthetisches Material ermöglicht wird. Für den Einsatz in der Deponie sind in Deutschland die sog. BAM-Richtlinien einzuhalten.

Die Haltbarkeit der Materialien für den Einsatz in Deponien ist von großer Bedeutung. Da technische Anlagen auf eine Lebensdauer von über 100 Jahren ausgelegt sind, müssen auch ihre Komponenten diese Langlebigkeit nachweisen.

2.2 Aktivschicht

Aktivstoffe bzw. Adsorbenten entfernen Schadstoffe aus flüssigen oder gasförmigen Medien und binden sie an ihrer Oberfläche. In verschiedenen Untersuchungen erwies sich ein spezieller Ionenaustauscher als hochwirksam für die Entfernung eines breiten PFAS-Spektrums, selbst bei kurzen Kontaktzeiten. Mit einer hohen Beladungskapazität können je nach Sickerwasserzusammensetzung deutlich mehr PFAS gebunden werden als mit Aktivkohle oder organophilen Tonen. Zudem wird eine spätere Desorption der PFAS durch eine starke Bindung zwischen Adsorbenten und Schadstoff erheblich erschwert. Grundsätzlich können gelöste organische Kohlenstoffverbindungen (DOC), Anionen wie Chlorid oder Sulfat, Öle, Fette sowie feine Partikel die verfügbare Adsorptionskapazität reduzieren. Anionen und DOC konkurrieren mit PFAS um Bindungsstellen, während hochmolekulare organische Verbindungen Oberflächen und Poren blockieren können. Durch die Kombination des Ionenaustauschers mit Aktivkohle sowie den Einsatz geeigneter Deckvliese wird sichergestellt, dass sowohl gelöste organische als auch partikel-gebundene Schadstoffe zurückgehalten werden, ohne dass die Aktivschicht zugesetzt wird.

3 PERKOLATIONSTESTS ZUR BESTIMMUNG DER ADSORBTIONSEFFEKTIVITÄT

Im Rahmen verschiedener Projektvorversuche wurden Perkolationstests in Säulen (D = 5 – 30 cm) und 1 m³ IPCs durchgeführt. Ergänzend erfolgten Feldversuche mit aufgeschütteten Haufwerken und Perkolatsammlung. Sämtliche Labor- und Felduntersuchungen belegen eine hohe Wirksamkeit gegenüber PFAS, sowohl für kurz- und langkettige perfluorierte Sulfon- und Carbonsäuren als auch für Fluortelomeralkohole. Exemplarisch werden in Kap. 3.1 Ergebnisse mit PFAS-haltigen Böden von zwei Standorten vorgestellt. In Kap. 3.2 wird der Einfluss der Durchflussgeschwindigkeit des Sickerwassers auf die Leistungsfähigkeit der PR-GBR verdeutlicht.

3.1 Großmaßstäbliche Säulenversuche zur Untersuchung der Langzeiteffektivität

Glaab (2025) untersuchte Sickerwasser, das eine 1 m mächtige Schicht PFAS-belasteter Böden sowie eine PR-GBR zur Behandlung von PFAS durchströmte (Abb. 1, links). Analysiert wurden zwei mit Feuerlöschschäumen belastete Böden sowie ein durch Papierschlämme kontaminierter landwirtschaftlicher Boden. Alle Böden sind gemäß Bundeseinheitlichem Leitfaden zur PFAS-Bewertung (BMUV, 2022) der Verwertungsklasse > VK 3 zuzuordnen. Über 30 Tage wurde täglich die mittlere Jahresniederschlagsmenge für den exemplarischen Standort Darmstadt aufgebracht. Der Versuch simuliert somit die Produktleistung über einen Zeitraum von rund 30 Jahren im Zeitraffer.

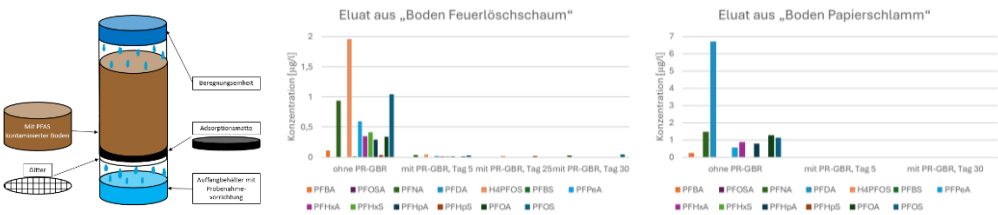


Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau und -ergebnisse nach 30 simulierten Jahren (Glaab, 2025)

In Abb. 1 (mittig, rechts) werden die PFAS-Konzentrationen im Eluat sowie im Boden für zwei kontaminierte Böden mit und ohne PR-GBR betrachtet. Die Untersuchungen zeigten, dass alle analysierten PFAS-Einzelverbindungen über den gesamten Versuchszeitraum effizient aus dem Sickerwasser entfernt wurden. Aus Kostengründen erfolgte die Beprobung nicht täglich, sondern lediglich für das Sickerwasser ohne Flächenfilter sowie für die Eluate an den Tagen 5, 25 und 30. Zusätzlich wurde der PFAS-Transport innerhalb der Bodenschichten und die Mobilisierung der Stoffe im Boden untersucht, um zu prüfen, ob sich PFAS-belastete Böden in situ durch Auswaschung sanieren lassen. Eine eindeutige Antwort konnte nicht gefunden werden, jedoch zeigten sich erste Tendenzen. Bei einem Boden war nach Simulation von 30 Jahren Niederschlag (Wasser-Feststoff-Verhältnis ca. 21:1) ein deutlicher Schadstofftransport erkennbar; die Belastung sank auf VK 1 in den oberen und VK 2 in den unteren 50 cm. Bei zwei weiteren Böden nahmen die PFAS-Konzentrationen zwar ab, lagen jedoch weiterhin oberhalb von VK 3.

3.2 Kleinmaßstäbliche Säulenversuche zur Untersuchung der Kinetik/Kontaktzeit

In Vorversuchen für ein Projekt im europäischen Ausland wurde die Effektivität der PR-GBR bei Fließgeschwindigkeiten von 0,5 m/d, 1,0 m/d und 2,0 m/d untersucht. Dabei wurde die Strömung mit einer Peristaltikpumpe variiert und der Flächenfilter laminar angeströmt. Der Versuch bestätigt die Theorie, nachdem die Kontaktzeit des Sickerwassers in der Aktivschicht ausschlaggebend für die Behandlungseffektivität ist (Tab. 1). Dabei konnten für die Summe der PFAS-Effektivitätsniveaus von 99,7 %, 98,8 % und 96,6 % (in der Reihenfolge der Geschwindigkeiten) für ein Produkt mit 2000 g/m² Flächengewicht in der Aktivschicht erreicht werden. Für die Planung und Dimensionierung von PR-GBR ist das Zusammenwirken von umliegendem Boden und Flächenfilter von hoher Relevanz. Je grobkörniger der Boden ist, desto höher ist seine Wasserdurchlässigkeit (kf). Entsprechend muss bei Anwesenheit hoher Fließgeschwindigkeiten für eine hohe Effektivität ggf. auch die Schichtstärke der Aktivschicht angepasst werden. Im Einzelfall sollte jedoch mit den Projektverantwortlichen und den Prüf- und Genehmigungsstellen geklärt werden, welche absoluten Zielwerte zu erreichen sind. Hierfür können unter anderem die VK-Werte aus dem Bundeseinheitlichen Leitfaden für PFAS-Bewertung (BMUV, 2022) herangezogen werden. Bei einer Versickerung in der ungesättigten Bodenzone (z.B. Deponie) kann der kf-Wert je nach Sättigungsgrad jedoch auch erheblich geringer sein.

Tab. 1: Sickerwasseranalyse bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten durch eine PR-GBR

Parameter [µg/l]	**Rohwasser**	**Eluat bei 0,5 m/d**	**Eluat bei 1,0 m/d**	**Eluat bei 2,0 m/d**
Perfluorbutansäure (PFBA)	0,041	0,002	0,005	0,008
Perfluorpentansäure (PFPeA)	0,101	0,001	0,008	0,016
Perfluorhexansäure (PFHxA)	0,129	0,004	0,010	0,020
Perfluorheptansäure (PFHpA)	0,137	0,004	0,011	0,017
Perfluoroctansäure (PFOA)	1,038	0,027	0,072	0,136
Perfluornonansäure (PFNA)	0,051	0,001	0,002	0,006
Perfluordekansäure (PFDeA)	0,007	0,000	0,000	0,000
Perfluorbutansulfonsäure (PFBS)	0,033	0,001	0,002	0,004
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS)	0,917	0,015	0,047	0,095
Perfluorheptansulfonsäure (PFHpS)	0,165	0,003	0,009	0,020
Perfluoroctansulfonsäure (PFOS)	3,956	0,007	0,048	0,182
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure (6:2FTS)	0,124	0,003	0,006	0,012
Perfluoroctansulfonamid (PFOSA)	0,031	0,001	0,012	0,024
Summe PFAS	**15,514**	**0,042**	**0,190**	**0,524**

4 EINSATZ DER SCHADSTOFFBARRIEREN AUF DEPONIEN

4.1 Adsorptive Deponiebasisabdichtung

Die meisten Deponien in Europa verwenden Verbundabdichtungssysteme bestehend aus geologischer Barriere, mineralischer Dichtschicht, Kunststoffdichtungsbahn, mineralischer und/oder geosynthetischer Schutzschicht und mineralischer Drainageschicht, um Sickerwasserströme zu fassen und abzuleiten. Eine innovative Möglichkeit zur Systemverbesserung sind PR-GBR, welche das Trenn-/Filtervlies oberhalb der mineralischen Drainageschicht ersetzen und PFAS vor dem Verlassen der Deponie selektiv aus dem Sickerwasser entfernen, während das Wasser durch den Flächenfilter perkoliert (Abb. 2). Im Sickerwasser werden die PFAS angereichert und zur Basisabdichtung transportiert. Vor dem Eintritt in die Drainageschicht entnimmt die PR-GBR die PFAS mit einer Effektivität, um definierte Grenzwerte einzuhalten.



Abb. 2: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer PR-GBR in einer Deponieabdichtung

4.2 PFAS-Monozellen auf Deponien

Auch oberhalb der Basisabdichtungen lassen sich kontrollierte Bereiche für die Deponierung von PFAS-haltigen Böden schaffen, sogenannte PFAS-Monozellen. Dabei wird die PR-GBR in einem klar definierten Bereich verlegt, oberhalb dessen im Anschuss PFAS-kontaminierte Böden eingelagert werden können. Wichtig hierbei ist, dass bereits in der Planung festgelegt wird, welche Menge an Boden mit welcher maximalen Konzentration an PFAS eingebaut werden darf. Nach Einbau des kontaminierten Bodens in der PFAS-Monozelle wird diese mit einer Oberflächenabdichtung geschlossen, sodass kein weiterer Niederschlag in den kontaminierten Bereich eindringen kann. Seit Oktober 2025 bzw. Januar 2026 laufen zwei Pilotversuche zu PFAS-Monozellen auf Deponien in Deutschland, um die Wirksamkeit der PFAS-Schadstoffbarriere auch im realen Maßstab nachzuweisen. Die bislang entnommenen Sickerwasserproben unterhalb der Schadstoffbarriere zeigen eine hohe Adsorptionseffizienz des Systems. Eindrücke vom Einbau der PR-GBR an beiden Standorten sind in Abb. 3 dargestellt.



Abb. 3: Eindrücke vom Einbau der PFAS-Schadstoffbarrieren in zwei Monozellen auf Deponien

4.3 Bemessung einer PR-GBR für den Einsatz auf Deponien

Eine Herausforderung bei der Planung von PR-GBR für Deponien ist, dass in der Planungsphase meist keine Informationen über den später eingelagerten Boden vorliegen. Die PFAS-Konzentration im Sickerwasser ist daher unbekannt und muss mit einem geeigneten Sicherheitsfaktor angesetzt werden. Da PR-GBR das Sickerwasser filtern, ist die insgesamt durch den Flächenfilter perkolierende PFAS-Menge während und nach dem Deponiebetrieb zu berücksichtigen. Nach Installation der Oberflächenabdichtung nimmt das Sickerwasservolumen stark ab oder versiegt langfristig vollständig, da kaum noch Niederschlagswasser in den Deponiekörper eindringen kann. Der verfüllte Boden kann daher für die Kapazitätsberechnung als zeitlich begrenzte Quelle betrachtet werden. Kenntnisse über die Adsorptionskapazität der PR-GBR ermöglichen dabei belastbare Abschätzungen zur Lebensdauer des Flächenfilters. Nähere Informationen zur Bemessung sind u.a. in (Niewerth, Neve, & Schmüdderich, 2025) beschrieben.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

PFAS stellen aufgrund ihrer Persistenz und Mobilität eine große Herausforderung für das Bodenmanagement dar. Es ist höchstwahrscheinlich, dass noch viele Jahre ein großer Teil der gelösten Böden auf Deponien abgelagert wird. Herkömmliche Basisabdichtungen können die Migration von PFAS nach heutigem Wissensstand nicht gänzlich verhindern, was den Bedarf an wirksameren technischen Möglichkeiten verdeutlicht. Permeable, reaktive Schadstoffbarrieren aus Geotextilien und Aktivstoffen (PR-GBR) bieten eine neue Lösung für den Rückhalt von PFAS. Sowohl Labor- als auch Feldversuche bestätigten, dass spezielle PR-GBR PFAS effektiv an der Ausbreitung hindern und so die Freisetzung aus Deponiekörpern deutlich einschränken. In Anbetracht des zunehmenden regulatorischen Drucks hinsichtlich der Grenzwerte für PFAS in Böden und Wasser kann die Einbeziehung von PR-GBR in Deponiekonzepte eine praktische Methode zur Verbesserung der langfristigen Rückhaltung darstellen. Die vielversprechenden Erkenntnisse zeigen, dass dieser Ansatz Risiken mindern und zu einem sichereren und nachhaltigeren Deponiebetrieb beitragen kann.

Künftig könnte eine weitere, ggf. nachhaltigere Möglichkeit im Umgang mit PFAS-kontaminierten Böden die Umlagerung und Sicherung der Böden am Entnahmeort, z.B. in einem technischen Bauwerk, sein. Bei diesem Lösungsansatz wird das Material ortsnah als Baustoff wiederverwendet. Im Gegensatz zur abgedichteten Standardbauweise für technische Bauwerke aus Böden mit umweltrelevanten Inhaltstoffen gemäß dem Merkblatt MTSE ermöglicht die Sicherung mithilfe von PR-GBR den offenen Einbau der Böden. Dabei wird die Schadstoffbarriere unterhalb des technischen Bauwerks verlegt. Der infiltrierende Niederschlag löst die Schadstoffe aus der Bodenmatrix und transportiert sie zum Schadstofffilter. Hier werden die PFAS aus dem Wasser entnommen, ehe es in den Untergrund versickert. Diese Sicherungsmaßnahme spart lange Transportstrecken und Deponievolumen.

LITERATURVERZEICHNIS

BMUV. (2022). Leitfaden zur PFAS-Bewertung; Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz*.

Glaab, A. (2025). Untersuchung über eine Sanierung/ Sicherung von PFAS-belasteten Böden durch den Einsatz von aktiven Geoverbundstoffen. *Masterarbeit, Hochschule Darmstadt*.

Niewerth, S., Neve, D., & Schmüdderich, C. (2025). Innovativer Flächenfilter für die Sicherung PFAS-belasteter Böden in der Deponie oder im Feld. *35. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar, Karlsruhe*.

Schmüdderich, C., Niewerth, S., Hangen, H., & Nagel, S. (2025). Schadstoffe binden und Wasser versickern statt Abdichten, Behandeln und Einleiten - neue Wege im Umgang mit Schadstoffbelasteten Böden. *1. Leipziger Geotechnik-Symposium, 13.-14.11.2025*.

Behandlung PFAS-belasteter Grund-, Deponie- und Bodenwaschwässer mithilfe einer innovativen Verfahrenskombination

Robert Mischitz[1], Peter Müller[1], Martin Nagy[1], Josefine Pfeiffer[1], Lukas Sitz[1] & Florian Sommerauer[1]
[1)] ferroDECONT GmbH, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) stellen aufgrund ihrer Persistenz und Mobilität eine erhebliche Herausforderung für die Wasseraufbereitung dar. Im vorliegenden Beitrag wird eine innovative Verfahrenskombination aus Schaumfraktionierung und elektrochemischer Oxidation mittels bordotierter Diamantelektroden (BDD) vorgestellt. Die Schaumfraktionierung dient der selektiven Entfernung und Aufkonzentrierung der PFAS, wodurch das zu behandelnde Volumen für die energieintensive Elektrolyse deutlich reduziert wird. Zunächst wurde das Verfahren im Technikumsmaßstab entwickelt und hinsichtlich der maßgeblichen Betriebsparameter untersucht. Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgte das Scale-up zu einer mobilen Containeranlage sowie die Entwicklung eines Vorreinigungscontainers für Volumenströme bis 36 m³/h. Exemplarische Versuche mit PFAS-belastetem Grundwasser und Wasser aus einer Bodenwaschanlage zeigen eine hohe Reinigungsleistung der Schaumfraktionierung bei vergleichbaren Behandlungszeiten im Technikums- und Industriemaßstab. Die BDD-Elektrolyse ermöglicht anschließend den zuverlässigen Abbau der aufkonzentrierten PFAS und bestätigt ihre Eignung als Destruktionsverfahren. Die Ergebnisse belegen die grundsätzliche technische Machbarkeit und Skalierbarkeit der kombinierten Prozessführung und zeigen ihr Potenzial für die Behandlung PFAS-belasteter Grund-, Deponie- und Bodenwaschwässer. Die Validierung des neu entwickelten Vorreinigungscontainers ist Gegenstand laufender Untersuchungen.

1 EINLEITUNG

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) stellen aufgrund ihrer außergewöhnlichen chemischen Stabilität, Persistenz und Mobilität eine der größten Herausforderungen der modernen Wasseraufbereitung dar. Weltweite Untersuchungen zeigen, dass PFAS in Grund- und Oberflächengewässern weit verbreitet sind und ein erheblicher Anteil der untersuchten Wasserressourcen die geltenden Grenzwerte überschreitet. Darüber hinaus wird angenommen, dass das tatsächliche Ausmaß der Kontamination aufgrund der begrenzten Anzahl routinemäßig erfasster PFAS derzeit noch unterschätzt wird (Cousins, 2024). Vor diesem Hintergrund und den damit verbundenen Umwelt- und Gesundheitsproblemen (Alsadik, 2025) gewinnen effiziente Verfahren zur Entfernung bzw. Zerstörung von PFAS aus wässrigen Lösungen zunehmend an Bedeutung. Die Schaumfraktionierung ist ein etabliertes Trennverfahren zur Entfernung und Anreicherung oberflächenaktiver Substanzen und wurde bereits erfolgreich für zahlreiche Anwendungen eingesetzt, darunter die Behandlung von Abwässern aus der Lebensmittelindustrie, die Entfernung von Farbstoffen und Schwermetallionen, sowie organischen Stoffen aus Aquakulturen. Aufgrund der ausgeprägten Oberflächenaktivität vieler PFAS rückt die Schaumfraktionierung zunehmend als vielversprechende Technologie für deren Entfernung in den Fokus von Verantwortlichen im Bereich der Behandlung von Deponie-, Grund- und Bodenwaschwässern. In den vergangenen Jahren konnte ihre Eignung sowohl im Labor- als auch im großtechnischen Maßstab für die Behandlung von PFAS-belastetem Grund- und Deponiesickerwasser (Burns, 2021 & 2022), erfolgreich nachgewiesen werden. Damit stellt die Schaumfraktionierung eine aussichtsreiche Option dar, PFAS aus großen Wasservolumina effizient zu entfernen und zu konzentrieren, um so das Volumen für nachgeschaltete Destruktionsverfahren zu reduzieren.
Die elektrochemische Oxidation (ECO) mittels bordotierter Diamantelektroden (BDD) gilt als eines der vielversprechendsten Verfahren zur vollständigen Zerstörung von PFAS. Im Gegensatz zu konventionellen Wasseraufbereitungsverfahren werden die PFAS dabei nicht lediglich aus

dem Wasser entfernt, sondern durch oxidative und direkte elektrochemische Reaktionen schrittweise defluoriert und letztlich zu Kohlendioxid, Fluoridionen und weiteren anorganischen Endprodukten mineralisiert. Der praktische Einsatz wird jedoch durch den vergleichsweise hohen Energiebedarf begrenzt, der mit abnehmender PFAS-Konzentration deutlich zunimmt. Daher wird die Kombination einer vorgeschalteten Aufkonzentrierung mit einer anschließenden BDD-Elektrolyse als besonders effizienter Ansatz angesehen, da hierdurch das zu behandelnde Volumen und damit der spezifische Energieverbrauch erheblich reduziert werden können (Tasca, 2025).
Der vorliegende Beitrag zeigt, wie eine Kombination aus Schaumfraktionierung und elektrochemischer Oxidation mittels BDD zunächst im Technikumsmaßstab realisiert und anschließend auf den industriellen Maßstab übertragen (Scale-up) werden kann.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 Struktureller Aufbau

PFAS bestehen aus einer hydrophoben poly- und perfluorierten Kohlenstoffkette und einem hydrophilen Kopf (Abb. 1), z.B. einer Sulfonat- oder Carboxygruppe, und weisen somit einen Tensidcharakter auf.

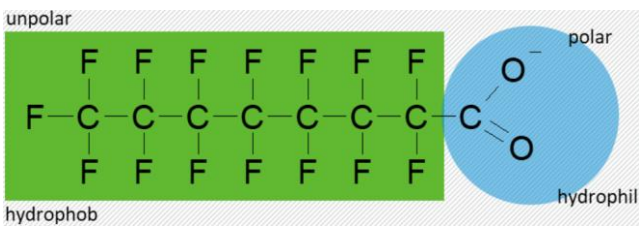


Abb. 1: Strukturformel der PFAS

2.2 Schaumfraktionierung

Bei der Schaumfraktionierung wird die Affinität der PFAS als Tenside, sich an Luft-Wasser-Grenzflächen von Gasblasen anzureichern, genutzt. Abb. 2 zeigt dieses Prinzip der Anlagerung der PFAS an der Grenzfläche. Dabei wird Luft durch ein mit PFAS-kontaminiertes Wasser geleitet, wobei sich der Schadstoff an den Gasblasen-Oberflächen anreichert, aufsteigt, sich im oberen Bereich des Reaktors aufkonzentriert und von dort in Form eines Konzentrats (Schaumprodukt/Aerosol) entfernt werden kann.

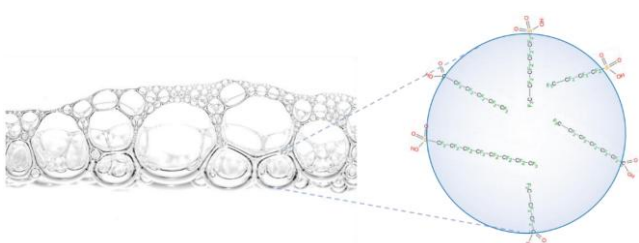


Abb. 2: Adhäsion an Luft-Wasser-Grenzfläche

Die Effizienz der Schaumfraktionierung wird von einer Reihe verfahrenstechnischer und wasserchemischer Parameter bestimmt. Die wichtigsten sind in Tab. 1 aufgelistet.

Tab. 1: Wesentliche Einflussfaktoren auf die Effizienz der Schaumfraktionierung

Verfahrenstechnische Parameter	Wasserchemische Parameter
Blasengröße	PFAS-Konzentration
Luftvolumenstrom	PFAS-Kettenlänge
Oberflächengeschwindigkeit	pH-Wert
Kontaktzeit	elektrische Leitfähigkeit
Schaumabzugsrate	Temperatur
Elektrochemische Oxidation	Calcium-, Magnesiumionen, Partikel, DOC

2.3 Elektrochemische Oxidation (ECO)

Elektrolysezellen mit BDD erzeugen bei Anlegen einer elektrischen Spannung hochreaktive Hydroxylradikale sowie weitere oxidative Spezies, die PFAS direkt und indirekt angreifen. Dabei werden die äußerst stabilen Kohlenstoff-Fluor-Bindungen schrittweise gespalten, wodurch die PFAS defluoriert und schließlich zu Kohlendioxid, Fluoridionen und weiteren anorganischen Endprodukten mineralisiert werden.

3 METHODE

Für die Auslegung der Behandlungsanlage im industriellen Maßstab wurden zunächst Versuche im Technikumsmaßstab durchgeführt. Auf Grundlage der dabei gewonnenen Erkenntnisse wurde anschließend eine Containeranlage entwickelt (Scale-up), die in einem weiteren Schritt durch einen Vorreinigungscontainer ergänzt wurde, um die Behandlung deutlich größerer Volumenströme zu ermöglichen.

3.1 Technikumsanlage

Für die Technikumsversuche wurde die Versuchsanlage so ausgelegt, dass die PFAS-belastete Probe aus einem Vorlagebehälter mittels einer Pumpe kontinuierlich einem Blasensäulenreaktor zugeführt wird. Über eine Venturidüse wird Luft in den Flüssigkeitsstrom injiziert und das Luft-Wasser-Gemisch in den Reaktor eingeleitet, wobei die Flüssigkeit im Kreislauf geführt wird. Das am Reaktorkopf entstehende PFAS-reiche Schaumkonzentrat wird mithilfe eines Unterdrucksystems kontinuierlich abgezogen und anschließend durch die BDD-Elektrolysezelle geleitet, in der die PFAS elektrochemisch zerstört werden. Das Fließschema und Rendering der Technikumsanlage sind in Abb. 3 dargestellt.

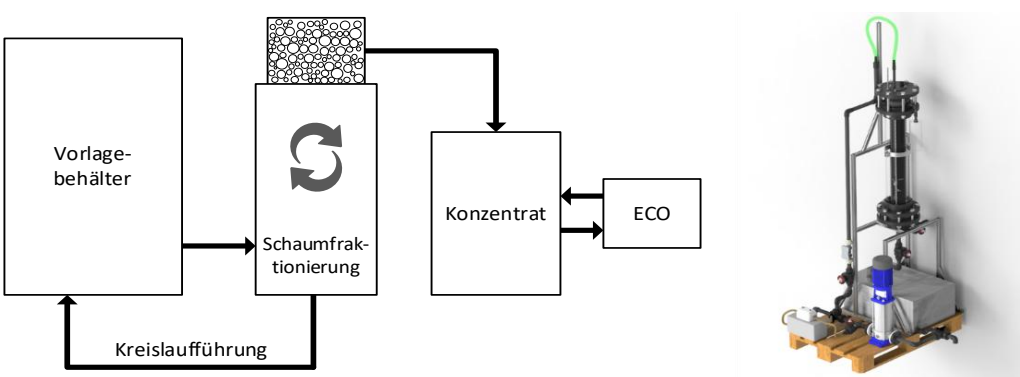


Abb. 3: Grundfließbild (links) und Rendering (rechts) der Technikumsanlage zur Schaumfraktionierung

Für die Durchführung der Versuche im Technikum wurden die relevanten Betriebsparameter systematisch variiert. Die Bandbreite der untersuchten Einstellbereiche ist in Tab. 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Einstellbereiche der Versuchsparameter

Parameter	Einheit	Bereich
Druck Luft	bar	2 – 3,5
Volumenstrom Luft	Nm³/h	0,15 – 0,9
Volumenstrom Wasser	L/h	600 – 1.200
Durchfluss Elektrolysezelle	L/h	150 – 1.500
Spannung Elektrolysezelle	V	150 – 300
Probenvolumen	L	70 – 75

3.2 Scale-up

Das Hauptaugenmerk des Scale-ups liegt auf der Schaumfraktionierung, da die Erzeugung eines möglichst hoch konzentrierten PFAS-Konzentrats den entscheidenden Faktor für ein energie- und ressourceneffizientes Gesamtverfahren darstellt. Die elektrochemische Oxidation mittels BDD bleibt hinsichtlich ihres verfahrenstechnischen Aufbaus unverändert und wird lediglich an den resultierenden Konzentratstrom angepasst. Auf Grundlage der im Technikumsmaßstab gewonnenen Erkenntnisse wurden für das Scale-up jene Betriebsparameter ausgewählt, die sich auch im industriellen Maßstab mit vertretbarem technischem und wirtschaftlichem Aufwand gezielt beeinflussen lassen. Hierzu zählen insbesondere die Blasengröße, der Luftvolumenstrom, die Kontaktzeit, die Anzahl der Behandlungsstufen sowie die Schaumabzugsrate.

3.2.1 Containeranlage

Im ersten Schritt wurde eine mobile containerbasierte Behandlungsanlage entwickelt, die – abhängig von der Schadstoffkonzentration – für die Behandlung von Volumenströmen bis etwa 5 m³/h ausgelegt ist. Die Anlage umfasst zwei Schaumfraktionierungsstufen mit einer nachgeschalteten elektrochemischen Oxidation mittels BDD und ist insbesondere für die Behandlung höher belasteter Wässer konzipiert. Das Grundfließbild und die Innenansicht sind in Abb. 4 dargestellt.

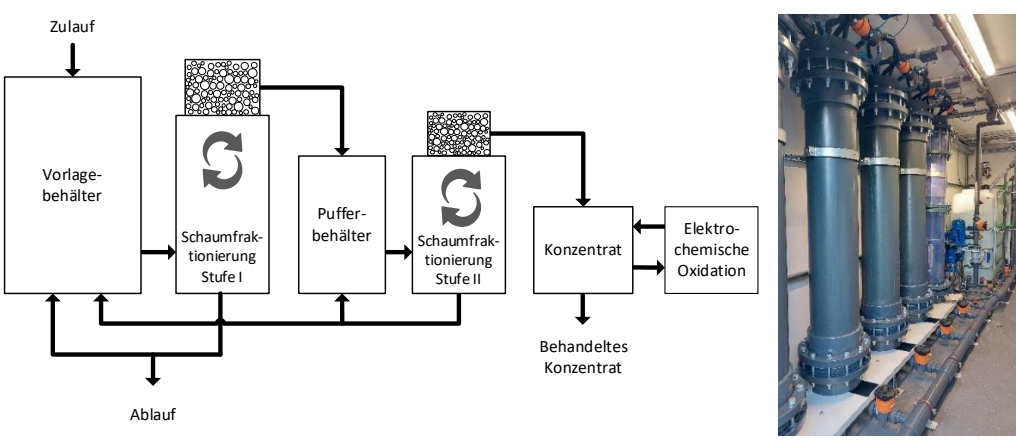


Abb. 4: Grundfließbild (links) der Containeranlage und Innenansicht (rechts)

3.2.2 Vorreinigungscontainer

Zur Erhöhung des behandelbaren Volumenstroms, wie er beispielsweise bei der Sanierung von Altlasten erforderlich ist, wurde die Anlage anschließend um einen sogenannten Vorreinigungscontainer erweitert. Dieser ist ebenfalls mobil, unter Verwendung einer möglichst einfachen Apparatekonstruktion ausgelegt und vergrößert das verfügbare Reaktorvolumen und damit die Kontaktzeit erheblich, wodurch die Behandlung niedrig kontaminierter Wässer mit Volumenströmen von bis zu 36 m³/h ermöglicht wird. Je nach erforderlichem Volumenstrom und Schadstoffkonzentration können die Vorreinigungscontainer sowohl parallel als auch seriell betrieben werden. Abb. 5 zeigt den schematischen Aufbau.

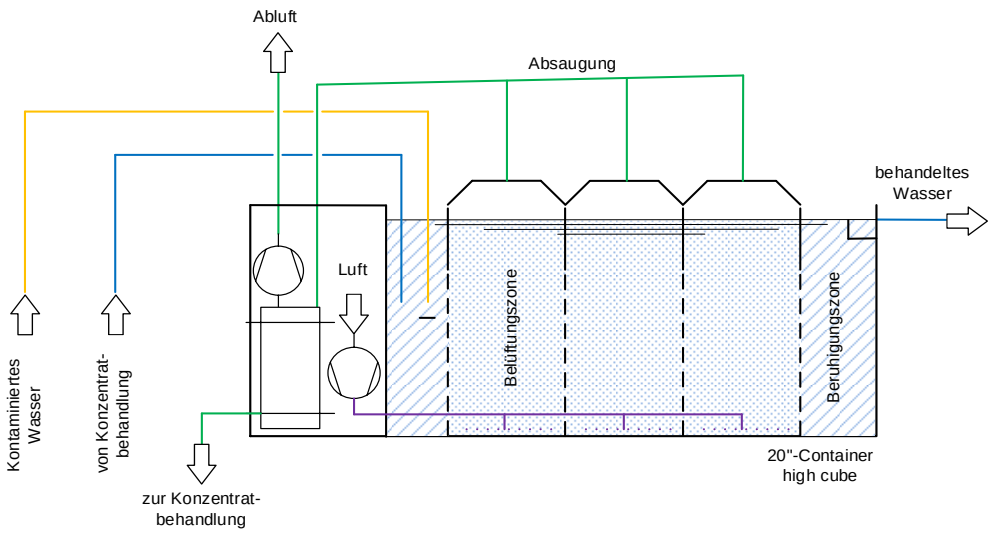


Abb. 5: Schematische Darstellung „Vorreinigungscontainer“

4 ERGEBNISSE

Nachfolgend werden exemplarisch die Ergebnisse eines elektrochemischen Abbauversuchs mittels BDD sowie zweier Schaumfraktionierungsversuche vorgestellt. Für den BDD-Abbauversuch wurde eine wässrige Lösung verwendet, die künstlich mit Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) dotiert wurde. Zur Veranschaulichung der Leistungsfähigkeit bzw. Skalierbarkeit der Schaumfraktionierung werden ein Technikumsversuch mit PFAS-belastetem Grundwasser und ein Feldversuch mit Wasser aus einer Bodenwaschanlage gegenübergestellt, deren PFAS-Ausgangskonzentrationen in einem vergleichbaren Bereich liegen.
Da die Analytik-Ergebnisse des Feldversuchs mit dem Vorreinigungscontainer zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrags noch nicht verfügbar waren, beschränkt sich die Ergebnisdarstellung auf die zuvor beschriebenen Versuche.

4.1 Ergebnisse Elektrolyse

In Abb. 6 sind die Resultate eines Versuchs zum Abbau von PFOS exemplarisch dargestellt. Auf der Ordinate ist die PFOS-Ausgangskonzentration (900 µg/L) und der zeitliche Verlauf des Abbaus zu sehen. In Abb. 7 sind – analog zur Abnahme des langkettigen PFOS – die entstehenden kurzkettigen (Zwischen)Produkte, welche durch die Oxidation hervorgerufen werden, dargestellt.

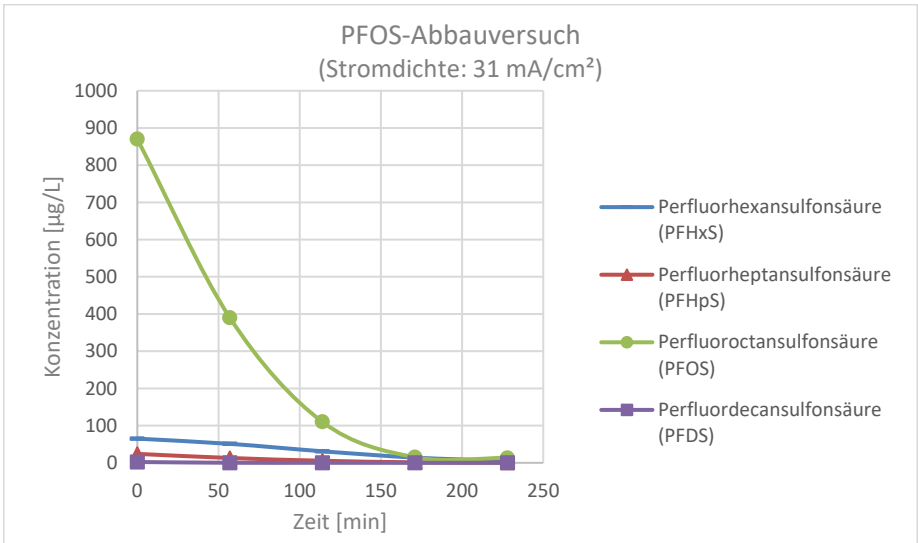


Abb. 6: PFOS-Abbau durch Elektrolyse

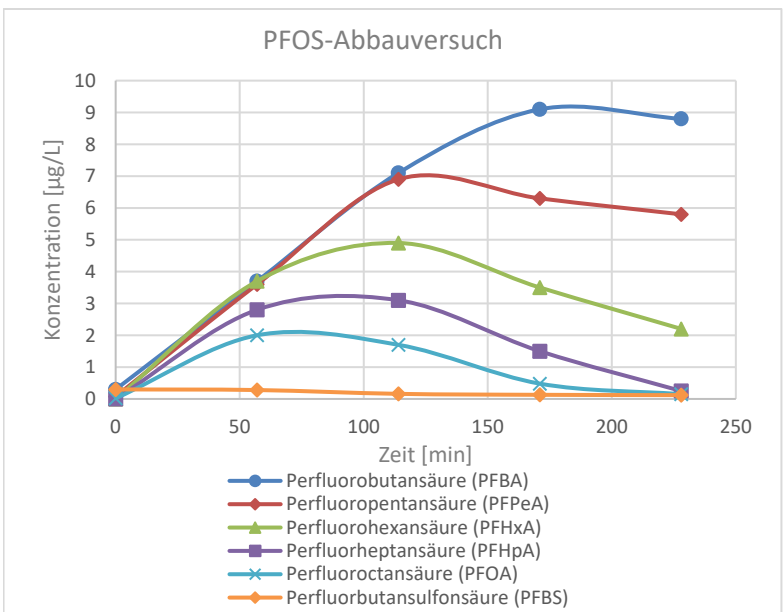


Abb. 7: Zeitliche Verzögerung des Abbaus der kurzkettigen Verbindungen

4.2 Ergebnisse Schaumfraktionierung Technikum – Grundwasser

In Abb. 8 sind die Ergebnisse eines Grundwasserbehandlungsversuchs dargestellt. Die Input-Summenkonzentration der PFAS-20 inkl. der Probe betrug 0,35 µg/L., wobei als Hauptkontaminant PFOS (0,33 µg/L) ausgemacht wurde. Beim Versuch konnten 90,8 % der PFOS aus der Probe entfernt werden. Nach ca. 30 Minuten wurde die angestrebte Konzentration von 100 ng/L (rote Markierung) erreicht.

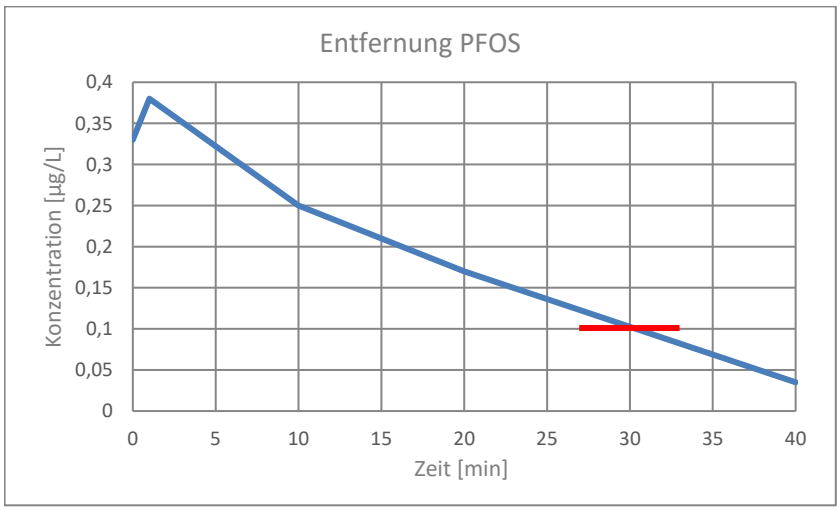


Abb. 8: Konzentrationsverlauf der PFOS in der Grundwasserprobe

4.3 Ergebnisse Schaumfraktionierung Containeranlage – Bodenwaschanlage

Abb. 9 zeigt die Ergebnisse eines Feldversuchs an einer Bodenwaschanlage. Im Rahmen des Versuchs wurden der Anlage 1.500 L PFAS-belastetes Waschwasser zugeführt. Analysiert wurden insgesamt 26 PFAS, einschließlich DONA. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des Technikumsversuchs sind ausschließlich die Resultate der ersten Schaumfraktionierungsstufe dargestellt.

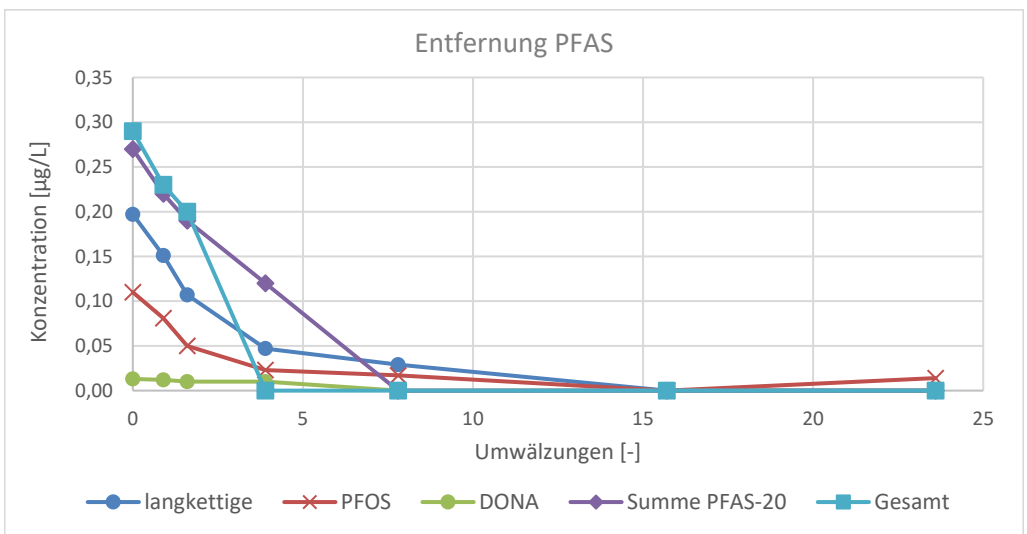


Abb. 9: Konzentrationsverlauf der PFAS in der Waschwasserprobe (Containeranlage)

Als mittlere Verweilzeit in den Reaktoren bis zum Erreichen der Bestimmungsgrenze (langkettige Verbindungen) wurden ca. 10 Minuten bestimmt. Für die Entfernung von 80 % der ΣPFAS-20 wurde eine mittlere Verweilzeit von 16 Minuten benötigt.

5 FAZIT

Die Ergebnisse zeigen, dass die elektrochemische Oxidation mittels BDD eine zuverlässige Methode zur Zerstörung von PFAS darstellt. Dabei bestätigt sich sowohl in den vorliegenden Untersuchungen als auch in der Literatur, dass die Energieeffizienz des Verfahrens mit zunehmender PFAS-Konzentration steigt, wodurch die Kombination mit einer vorgeschalteten Schaumfraktionierung besonders vorteilhaft ist. Die Schaumfraktionierungsversuche belegen zudem, dass eine Übertragung des Verfahrens vom Technikums- in den Industriemaßstab durch die gezielte Anpassung weniger, verfahrenstechnisch gut beeinflussbarer Betriebsparameter möglich ist. Bei vergleichbaren Reaktorgeometrien konnten trotz des unterschiedlichen Maßstabs und unterschiedlicher Schadstoffzusammensetzung ähnliche Behandlungsergebnisse innerhalb vergleichbarer Behandlungszeiten erzielt werden.
Die Übertragbarkeit dieses Ansatzes auf den neu entwickelten Vorreinigungscontainer mit abweichender Reaktorgeometrie ist Gegenstand weiterer Untersuchungen. Die noch ausstehenden Analysenergebnisse des laufenden Feldversuchs werden zeigen, inwieweit sich die erzielten Erkenntnisse auch auf dieses Anlagenkonzept übertragen lassen.

LITERATURVERZEICHNIS

Alsadik, A. A. (2025). PFAS in water environments: recent progress and challenges in monitoring, toxicity, treatment technologies, and post-treatment toxicity. *Environmental Systems Research*, 14, Article 45.

Burns, D. J. (2021). PFAS removal from groundwaters using Surface-Active Foam Fractionation. *Remediation*, 31(4), 7-21.

Burns, D. J. (2022). Commercial-scale remediation of per- and polyfluoroalkyl substances from a landfill leachate catchment using Surface-Active Foam Fractionation (SAFF). *Remediation*, 32(3), 139-150.

Cousins, I. T. (2024). Underestimated burden of per- and polyfluoroalkyl substances in global surface qaters and groundwaters. *Nature Geoscience*, 17, 387-394.

Mustermann, M. (MusterJAHR). *MusterTITEL* (Vol. MusterBAND). MusterORT, MusterLAND: MusterVERLEGER.

Tasca, A. L. (2025). Electrochemical remediation of PFAAS by Boron-Doped Diamond electrodes: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(3).

KONTAKT

Robert Mischitz
robert.mischitz@ferrodecont.at
+43 664 532 86 77
ferroDECONT GmbH
www.ferrodecont.at

In situ Sanierung eines PFAS-Schadens durch Biopolymerelution

Anja Wilken[1] & Miriam Kunz[1]
[1)] Sensatec GmbH, Kiel, Deutschland

KURZFASSUNG: Auf einem ehemals militärisch genutzten Standort liegen erhebliche PFAS-Belastungen in Boden und Grundwasser vor, die auf den Einsatz fluortensidhaltiger Löschmittel zurückzuführen sind. Zur Sanierung wurde eine Kombination aus biopolymerbasierter In-situ-Bodenelution und hydraulisch gesicherter Sorptionsbarriere vorgeschlagen. Ziel ist die Mobilisation von PFAS aus der ungesättigten Zone, deren Transport in die gesättigte Zone sowie die hydraulische Erfassung und Reinigung im Abstrom. Nach Labormachbarkeitsstudien wurde ein optimiertes Elutionsregime am Standort auf einem 12 × 12 m Testfeld umgesetzt. Der Feldversuch umfasste aufeinanderfolgende Wasser- und Biopolymerspülungen. Die hydraulische Sicherung erfolgte über eine Bestandsmessstelle und die Aufreinigung mittels WAK. Ein umfassendes Monitoring aus Boden- und Grundwasserbeprobungen sowie kontinuierlicher hydraulischer Messung begleitete den Versuch. Die Ergebnisse zeigen deutliche PFAS-Reduktionen in der ungesättigten Zone von bis zu 99 % und 85% für PFNA und PFOS im Feststoff sowie 99 % und 94% für PFNA und PFOS im 2:1 Eluat. Insgesamt bestätigt der Ansatz eine wirksame Absenkung der Schadstofffracht und eine verbesserte Wirksamkeit nachgeschalteter Sicherungsmaßnahmen.

1 VERANLASSUNG

Auf einem vormals militärisch genutzten Altstandort liegen erhebliche PFAS-Belastungen in Boden und Grundwasser vor, die auf den Einsatz fluortensidhaltiger Löschmittel zurückzuführen sind. Aufgrund verschiedener Einträge liegen am Standort verschiedene Belastungsbereiche vor. Im untersuchten Hotspot werden PFAS-Konzentrationen im Boden von über 100.000 ng/L erreicht. Im Rahmen der aktuell laufenden Sanierungsuntersuchung wird eine Kombination aus Hotspot-Sanierung mittels biopolymerbasierter In-situ-Bodenelution und einer in der Schadstofffahne angeordneten Sorptionsbarriere vorgesehen. Letztere soll den weiteren Austrag in den unbelasteten Grundwasserleiter sowie in angrenzende Oberflächengewässer verhindern. Die vorgelagerte Hotspot-Sanierung dient der Reduktion der Schadstofffracht im Grundwasser und erhöht gleichzeitig die Wirksamkeit und Laufzeit der Sorptionsbarriere durch verringerte Anstrombelastung.
Zur Bewertung dieser Verfahrenskombination wurden weiterführende Untersuchungen zur Eignung der biopolymerbasierten PFAS-Elution durchgeführt. Hierzu wurde zunächst eine Labormachbarkeitsstudie durchgeführt, auf deren Basis anschließend ein Feldversuch zur Überprüfung der Übertragbarkeit unter Realbedingungen realisiert wurde.

2 LABORMACHBARKEITSSTUDIE

Jeder PFAS-belastete Standort weist eine spezifische Kontaminations- und Standortcharakteristik auf, sodass das Elutionspotenzial biopolymerbasierter Verfahren vorab im Labormaßstab untersucht wurde. Die Labormachbarkeitsstudie wurde als zweistufiges Säulenexperiment mit homogenisiertem Bodenmaterial aus dem Hotspotbereich durchgeführt. Als Hauptkontaminanten wurden dabei Perfluornonansäure (PFNA) und Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) identifiziert.
Im ersten Schritt wurden zwei Biopolymere in unterschiedlichen Konzentrationen hinsichtlich ihrer PFAS-Elutionsleistung verglichen. Dabei zeigte eine Variante bereits bei niedriger Einsatzkonzentration eine signifikant erhöhte PFAS-Reduktion, weshalb diese unter Berücksichtigung von Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit ausgewählt wurde. Die PFAS-Reduktion lag bei 96,7 % und damit deutlich über der reinen Wasserspülung (38 %). Besonders PFOS konnte durch den Biopolymerzusatz effektiv mobilisiert werden.

Im zweiten Schritt wurde der Spülzyklus hinsichtlich eines optimierten Verhältnisses von Wasser- und Biopolymerspülungen weiter angepasst. Ziel war eine Reduktion des Biopolymerverbrauchs bei gleichzeitig hoher Abreinigungsleistung. Das resultierende Elutionsregime erzielte trotz reduzierter Biopolymermenge vergleichbare Endkonzentrationen im Boden und wurde als Grundlage für die anschließende Feldanwendung übernommen.

3 IN SITU SANIERUNG

Ziel des Feldversuchs ist die Mobilisation und Elution von PFAS aus der ungesättigten Bodenzone durch die Einbringung von Biopolymeren sowie der anschließende Transport in die gesättigte Zone. Dort werden die Schadstoffe abstromig der Sanierungsfläche hydraulisch erfasst und in einer Aufbereitungsanlage gereinigt.
Die biopolymerbasierte In-situ-Elution zeigte in vorherigen Untersuchungen eine PFAS-Reduktion von bis zu 99 % unter Laborbedingungen und etwa 80 % unter natürlichen Bedingungen, wodurch eine deutliche Verringerung der Schadstofffracht im Grundwasser erreicht wird. PFAS zeichnen sich durch eine stabile molekulare Struktur sowie amphiphile Eigenschaften und hohe chemische Persistenz aus, was ihre Mobilisierung erschwert.
Die eingesetzten Biopolymere fördern die Elution der PFAS aus dem Boden und bieten gegenüber reinen Wasserspülungen eine erhöhte Abreinigungsleistung. Aufgrund ihrer amphiphilen Eigenschaften können PFAS an die Aggregatstruktur der Biopolymere binden, wodurch ihre Mobilität gesteigert wird. Die verwendeten Biopolymere sind biologisch abbaubar, umweltverträglich und bereits in der In-situ-Sanierung eingesetzt worden. Insgesamt ermöglicht das Verfahren eine effizientere und beschleunigte Entfernung von PFAS aus dem Untergrund.

3.1 Aufbau des Feldversuchs

Für den Feldversuch wurde auf einer 12 × 12 m großen Fläche ein Infiltrationssystem zur gezielten Einbringung einer Biopolymerlösung in den Untergrund eingerichtet. Die Fläche wurde in 5 Teilflächen (TF1-5) unterteilt, siehe Abbildung 1. Zur Überwachung der hydraulischen und stofflichen Prozesse wurden innerhalb des Testfeldes fünf sowie im An- und Abstrom zwei zusätzliche Grundwassermessstellen aus HDPE (DN 40) mit jeweils 1 m Filterstrecke installiert.

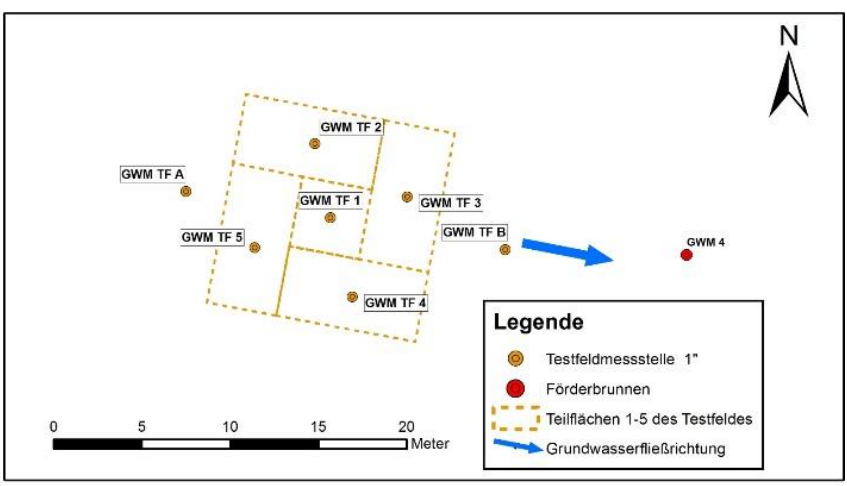


Abb. 1: Darstellung Testfeld inkl. der Teilflächen und Grundwassermesstellen

Die flächendeckende Versickerung erfolgte über 17 in Ost-West-Richtung angelegte Furchen mit einem Abstand von etwa 65 cm, in denen Tropfschläuche mit druckkompensierten Tropfern

verlegt wurden. Zur Sicherstellung eines ganzjährigen Betriebs wurden die Leitungen frostsicher ausgeführt und mit einer Rohrbegleitheizung ausgestattet. Die Grundwasserentnahme erfolgte über die bestehende Grundwassermessstelle GWM 4, aus der das Grundwasser mittels Tauchpumpe gefördert wurde. Im Anlagencontainer wurden Fördermenge, Druck und Volumenstrom kontinuierlich überwacht und das Rohwasser zunächst über einen Kiesfilter sowie zwei Aktivkohlefilter gereinigt. Nach der Aufbereitung wurde ein Teilstrom des gereinigten Grundwassers kontrolliert auf das Testfeld zurückgeführt, wobei die Biopolymerlösung zeitweise über eine Dosierstation zugemischt wurde. Der nicht für die Infiltration benötigte Anteil wurde entsprechend der wasserrechtlichen Genehmigung kontrolliert in die Regenwasserkanalisation eingeleitet. Der Versuchsaufbau gewährleistete damit eine kontrollierte Durchführung sowie eine umfassende Erfassung der hydraulischen und stofflichen Prozesse während des Feldversuchs.

3.2 Durchführung des Versuchs

Der Feldversuch begann mit einer etwa einmonatigen Wasserspülphase, in der das aus der Grundwassermessstelle GWM 4 geförderte und über eine Reinigungsanlage aufbereitete Wasser kontrolliert auf das Testfeld infiltriert wurde. Anschließend wurde über rund 2,5 Wochen die Biopolymerelution mit dem zuvor im Labormaßstab ermittelten optimalen Biopolymer durchgeführt. Hierfür wurde dem Infiltrationswasser kontinuierlich die Biopolymerlösung über eine automatische Dosierstation zugesetzt und über das Tropfschlauchsystem eingebracht. Nach Abschluss der Biopolymerzugabe folgten für etwa einen Monat weitere Porenvolumenaustausche mit aufbereitetem Grundwasser. Im Anschluss erfolgte ein Sicherungsbetrieb, bei dem das weiterhin geförderte Grundwasser aus GWM 4 über Aktivkohle gereinigt und vollständig abgeleitet wurde. Nach einem Monat wurde eine zusätzliche einmonatige Wasserspülphase durchgeführt, gefolgt von einem weiteren dreimonatigen Sicherungsbetrieb. Während der gesamten Versuchsdauer wurden Betriebsparameter kontinuierlich erfasst sowie regelmäßige Boden- und Grundwasseruntersuchungen zur Bewertung des Elutionsverlaufs durchgeführt (siehe Kapitel 3.3).

3.3 Monitoring & Analytik

Das Monitoring des Feldversuchs umfasste die Erfassung der Ausgangsbelastung sowie die kontinuierliche Begleitung aller Versuchsphasen und wurde durch die ECOS Umwelt Nord GmbH durchgeführt. Vor Versuchsbeginn erfolgten in allen fünf Teilflächen Rammkernsondierungen sowie die Entnahme repräsentativer, massengewichteter Bodenmischproben aus der ungesättigten und gesättigten Zone. Ergänzend wurden sämtliche Grundwassermessstellen beprobt. Die Analytik der Boden- und Wasserproben auf PFAS im Feststoff, im 2:1-Eluat sowie im Grundwasser erfolgte durch ein akkreditiertes Labor und diente als Referenz für die Bewertung der Sanierungswirkung.
Während der ersten drei Monate wurden die Grundwasserstände in den Messstellen des Testfeldes sowie im An- und Abstrom kontinuierlich im Fünf-Minuten-Takt mittels Datenloggern erfasst; anschließend wurde das Messnetz auf ausgewählte Messstellen (TF A, TF 1 und TF B) reduziert. Zur Erfassung des Elutionsfortschritts wurden nach den Wasserspülungen, nach der Biopolymerphase sowie nach Abschluss des Pilotversuchs weitere Bodenuntersuchungen analog zur Untersuchung der Ausgangsbelastung durchgeführt. Zusätzlich erfolgten insgesamt 14 Grundwasserbeprobungen in zweiwöchigen bis monatlichen Intervallen. Die Kombination aus hydraulischem Monitoring und chemischer Analytik bildete die Grundlage zur Bewertung des Stofftransports und der PFAS-Abreinigung.

3.4 Ergebnisse

In Abbildung 2 ist die Entwicklung der Feststoffgehalte und Eluatkonzentrationen an PFOS, PFNA und PFHxS im Laufe der vier Beprobungskampagnen der ungesättigten Bodenzone dargestellt.

Zusätzlich sind oben rechts die Abreinigungsleistungen in % angegeben (oberer Wert: Mittelwert über alle Teilflächen, Wert in Klammern: Abreinigung in der zentralen TF 1).
Bei dem Einzelstoff **PFOS** liegt bei den Feststoffgehalten von Kampagne zu Kampagne eine mehr oder weniger kontinuierliche Abnahme von insgesamt 85% (TF 1) bzw. 61% (Mittelwert) vor. Bei den Eluatkonzentrationen liegen dagegen nach den Daten der Originalproben deutlich höhere Abreinigungsraten von 91 % (Mittelwert) bzw. 94 % (TF 1) vor.
Für **PFNA** kann nach Abbildung 2 von einem exponentiellen Abklingverhalten ausgegangen werden. Bereits nach der vorgeschalteten Wasserspülung lagen in TF 1 um 93 % reduzierte Gehalte im Feststoff vor. In der Abschlussbeprobung wurden um 96 % (Mittelwert) bzw. 99 % (TF 1) reduzierte Werte ermittelt. Die Eluatkonzentrationen zeigen ein nahezu identisches Verhalten.
Hinsichtlich des Abklingverhaltens zeigen die **PFHxS**-Konzentrationen ebenfalls bereits nach der 1. Spülung sowohl im Feststoff als auch im Eluat eine intensive Abnahme. Die Abreingungsraten sind ebenfalls hoch und variieren zwischen 85 und 89 %.

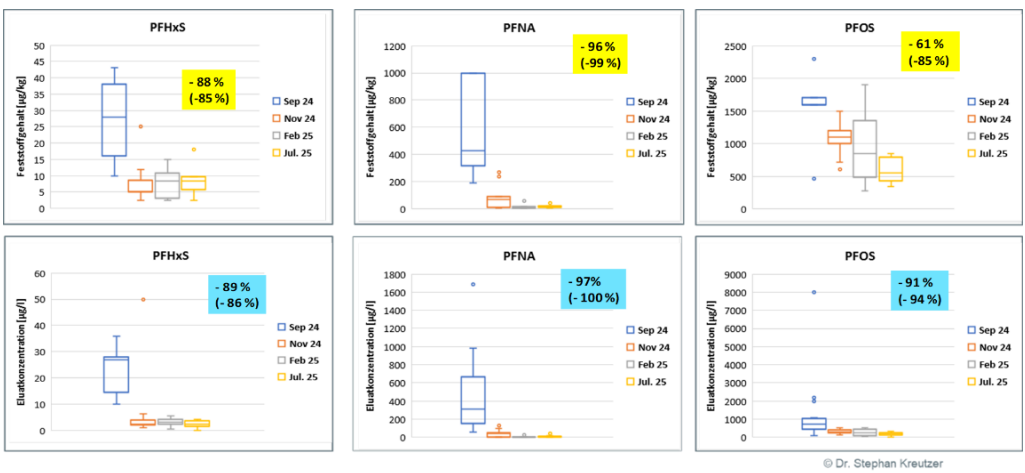


Abb. 2: Entwicklung der Feststoffgehalte und Eluatkonzentrationen im Laufe der vier Beprobungskampagnen und Angabe der Abreinigungsleistungen in % in der ungesättigten Zone

4 ZUSAMMENFASSUNG

Das angestrebte Sanierungsziel des Verfahrens, die relevante Reduzierung von Dauer und Höhe des Schadstoffeintrags in das Grundwasser, ist mit dem Verfahren erreichbar. Die Wirksamkeit einer Sorptionsbarriere kann mit dem Verfahren merklich erhöht werden, da insbesondere die für die Bemessung einer Barriere hier relevanten Einzelstoffe PFNA und PFHxS weitestgehend abgereinigt werden. Aufgrund der hohen Abreinigungsraten sollte jedoch auch geprüft werden, ob die Sanierungsziele für das Grundwasser nicht auch durch eine alleinige eine Kombination aus In-situ Bodenelution und hydraulischer Sicherung erreichbar sind.

KONTAKT

Anja Wilken, M.Eng.
a.wilken@sensatec.de
+49 431 389009-11
stellv. Niederlassungsleitung Kiel
Sensatec GmbH
www.sensatec.de

Sanierungsmaßnahmen PFAS-Altlast am Flughafen Salzburg

Hartwig Kraiger[1] & Hans Christian Haslauer[1]
[1)] GWU Geologie-Wasser-Umwelt GmbH, Salzburg, Österreich

KURZFASSUNG: Ein Teilbereich des Salzburger Flughafens wurde im Dezember 2022 als Altlast S23 mit der Priorität 1 ausgewiesen. Ausgehend von umfangreichen Voruntersuchungen wurde in einer für Feuerlöschübungszwecke genutzten Teilfläche eine erhebliche Kontamination des Untergrundes mit per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) festgestellt. Der zu Übungszwecken erforderliche jahrzehntelange Einsatz von Löschschäumen ist auch Ausgangspunkt für eine rd. 3,5 km lange Schadstofffahne im Grundwasserabstrom. Die Altlast S23 ist die erste österreichische PFAS-Altlast. Die inzwischen seit mehr als 5 Jahren angesammelten Erfahrungen ermöglichen einen Überblick über die komplexe Entwicklung von Erkundungs- und Sanierungsmaßnahmen in einem zu Beginn weitgehend unbekannten Bereich.

1 EINLEITUNG

Die „Altlast S23 Flughafen Salzburg Feuerlöschübungsgelände“ befindet sich im Westteil der Stadt Salzburg. In einem für Feuerlöschübungszwecke genutzten Teil des Salzburger Flughafens ist es durch die jahrzehntelange Verwendung von Löschschäumen zu einer erheblichen Kontamination des Untergrundes mit per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS), vornehmlich Perfluoroktansulfonsäure (PFOS), gekommen. Ausgehend von einem erhöhten PFAS-Einzelwert einer GZÜV-Messstelle (Gewässerzustandsüberwachungsverordnung), entdeckt im Rahmen des GZÜV-Sondermessprogramms „Spurenstoffe im Grundwasser“, erfolgten ab 2018 Untersuchungen des Grundwassers und ab 2019 des Untergrundes.

1.1 Hydrogeologische Grundlagen

Der Salzburger Flughafen liegt auf einer Seehöhe von ca. 430 m ü. A. bis 433 m ü. A. und befindet sich im Bereich des Salzburger Beckens, dessen spät- und postglaziale Sedimentfüllung Mächtigkeiten von bis zu 250 m erreicht. Im Bereich des Altstandortes stehen unter dem Bodenhorizont bzw. der Oberflächenbefestigung oft schluffig-tonige Sedimente bis maximal 2,5 m Tiefe an. Unter diesen feinkörnigen Sedimenten folgen kiesige Sande und sandige Kiese. In etwa 20 m Tiefe befindet sich die Oberfläche des bis zu 200 m mächtigen sog. „Salzburger Seetons“ (meist schluffige Feinsande).
In den kiesig-sandigen Sedimenten ist ein in Richtung Nordost bis Nordnordost gerichteter Grundwasserstrom ausgebildet. Der Salzburger Seeton bildet den Grundwasserstauer. Im Bereich des Flughafens treten Grundwasserspiellagen von ca. 425 m ü. A. bis 427 m ü. A. auf. Der Grundwasserflurabstand liegt demgemäß zwischen 5 m und 7 m. Das Grundwassergefälle beträgt lokal ca. 2,5 ‰ bis 3,5 ‰, die hydraulische Durchlässigkeit kann auf Basis von Pumpversuchen mit 2,5 * 10^{-3} m/s abgeschätzt werden.

2 ERKUNDUNGSMAßNAHMEN 2018 BIS 2022

2.1 Bodenuntersuchungen

2019 bis 2022 erfolgten im Bereich des Altstandortes dutzende Baggerschürfe, Rammkernbohrungen bzw. -sondierungen sowie Kernbohrungen. Aus den Aufschlüssen wurden tiefengestaffelt Feststoffproben entnommen. Die Analytik erfolgte vorwiegend auf die Eluatgehalte der PFAS20 (20 Einzelsubstanzen der EU-Trinkwasserrichtlinie; Richtlinie (EU) 2020/2184 des Europäischen

Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2020 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch) mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 10:1, teilweise auch von 2:1. Zudem wurden an einigen Proben auch adsorbierbare organische Fluorverbindungen (AOF) sowie Total Oxidizable Precursors (TOP-Assay) untersucht. Schließlich wurden auch 80 Proben auf KW-Index, BTEX und PAK 16 analysiert.
Maßgeblich für die Altlastenabgrenzung ist die Summe PFAS20 im Eluat 10:1 mit einer Konzentration >0,3 µg/l, entspricht 3 µg/kg bzw. 0,003 mg/kg. Diese Konzentration wurde seitens des Umweltbundesamtes (UBA) als standortbezogener Richtwert ermittelt. Eine Übersicht der Ergebnisse zeigt Tabelle 1.

Tab. 1: Statistische Auswertung der Ergebnisse aller Feststoffanalysen (aus Eintrag Altlastenkataster UBA 25.5.2022: https://www.altlasten.gv.at/dam/jcr:d8464f1b-8d73-4023-b5cf-470d190f55d0/S23_Prio.pdf)

	PFOS Eluat 10:1	PFOS Eluat 2:1	PFOS Feststoff	Σ PFAS Eluat 10:1
Anzahl Analysen	117 Stk	25 Stk	29 Stk	117 Stk
	[µg/l]	[µg/l]	[µg/kg]	[µg/l]
Maximum	61	120	700	64
Minimum	<0,01	<0,01	<5	<0,01
Median	0,96	1,8	60	2,4
Mittelwert	5,2	13	125	6,7
*Prüfwert**	-	-	-	*0,1*
*Richtwert***	-	-	-	*0,3*
** entspricht dem Trinkwassergrenzwert in der EU-Trinkwasserrichtlinie für 20 Einzelsubstanzen*				
*** Richtwert für erhebliche Belastung (standortbezogen)*				

2.2 Grundwasseruntersuchungen

Beginnend 2018 auf Basis von 6 vorhandenen GW-Messstellen wurde das Messstellennetz kontinuierlich erweitert. 2022 umfasste es bis zu 35 Grundwassermessstellen und Brunnen, bis April 2022 wurden an 23 Terminen rund 200 Grundwasserproben entnommen und analysiert. Die Untersuchungen erfolgten im Auftrag der Salzburger Flughafen GmbH, in enger Abstimmung mit der Behörde und dem UBA.
Zur orientierenden Untersuchung wurden zudem ab 2021 aus Bodenaufschlüssen Schöpfproben von der Grundwasseroberfläche entnommen und in Hinblick auf PFAS analysiert.
Auf Basis der GW-Analytik konnte eine Schadstoffahne in einer Länge von 3,5 bis 4,0 km dokumentiert werden.
Die höchste Konzentration wurde in der Messstelle P3 ermittelt, die Konzentration für PFAS20 lag bei mehreren Durchgängen im Bereich >10 µg/l, der Grenzwert für Trinkwasser der EU-Richtlinie von 0,1 µg/l wurde hier mehrfach um das 100-fache überschritten. Im Zentrum der Belastung zeigen die Messstellen markante Schwankungen der PFAS-Konzentrationen (Faktor 3 bis 5), im weiteren Abstrom waren die PFAS-Konzentrationen im zeitlichen Verlauf vergleichsweise konstant.
Ähnlich wie im Falle der Eluatuntersuchungen ergaben die Untersuchungen der TOP-Assays eine gute Übereinstimmung mit den Summen PFAS20. Es kann davon ausgegangen werden, dass keine relevanten Mengen an Vorläufersubstanzen im Grundwasser vorhanden sind.

2.3 Altlastenabgrenzung

Auf Basis der Bodenuntersuchungen und der Festlegung eines Richtwertes von 0,3 µg/l für eine erhebliche Belastung konnte eine Abgrenzung der Altlast vorgenommen werden. Das erheblich kontaminierte Untergrundvolumen umfasst zwei Schadensbereiche (große Fläche im

Südbereich, kleinere Teilfläche nordöstlich davon; s. Abbildung 1) mit einem Volumen von in Summe mehr als 50.000 m³. Es erfolgte im Dezember 2022 eine Ausweisung des Altstandortes als Altlast mit der Prioritätenklasse 1.

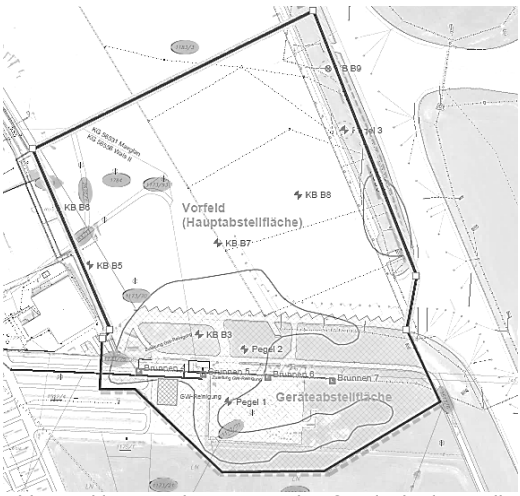


Abb. 1: Altlastenpolygon 2022 (große Fläche im Südbereich, kleinere Teilfläche im Nordosten); Vorschlag Umschließung gem. Variantenstudie; ohne Maßstab

3 VARIANTENSTUDIE

Die im Herbst 2022 durchgeführte Variantenstudie baut auf detaillierten Recherchen zum Zeitpunkt und Ausmaß von Löschschaumausbringungen auf. Dabei konnten verschiedene Einsatzmengen bestimmten Zeiträumen zugeordnet werden. Basis waren u.a. Vorgaben der Behörden bzgl. der erforderlichen Übungsanzahl sowie Photodokumentationen von Löschübungen.
Aufbauend auf dem Sanierungsziel des UBA wurden 8 Varianten diskutiert. Nach abschließender Bewertung mittels der modifizierten Kosten-Wirksamkeits-Analyse wurde eine Variante bestehend aus allseitiger Umschließung in Form einer Schmalwand (s. Lage siehe Abbildung 1) mit Grundwasserhaltung, Grundwasserreinigung mit Wiederversickerung und Oberflächenabdichtung als Bestvariante ermittelt und zur Umsetzung empfohlen.

4 BEHÖRDENVERFAHREN UND BETRIEB

Seitens der Behörde wurde unabhängig von der Variantenstudie die Umsetzung einer Sofortmaßnahme zur Reduktion des Schadstoffaustrags verlangt. In diesem Sinne wurde dem Sanierungsprojekt eine Phase 1 vorangestellt, bei der großteils auf vorhandene Brunnen und Sickeranlagen zurückgegriffen werden konnte. Neu zu errichten war lediglich eine Grundwasserreinigungsanlage (GWRA) zur Reinigung der Pumpwässer samt entsprechenden Druck- und Steuerleitungen.
Die Gesamtanlage ging nach umfangreichen Vorbereitungs- und Adaptierungsarbeiten mit der Inbetriebnahme der GWRA zum Jahresende 2023 in Betrieb. Bewilligt wurde die Entnahme von 25 l/s aus insgesamt 7 Brunnen. Die Reinigungsleistung der aus 2 Absetzbecken mit einer Belüftungseinrichtung, 2 Sand- und 3 Aktivkohlefiltern bestehenden Anlage wurde mit 0,1 µg/l PFAS20 festgelegt.
Probleme im Betrieb bereiten vor allem stark Fe-hältige Wässer, welche zu einer massiven Verschlammung von Pumpen und Rohrleitungen führen. Es wurden verschiedene Versuche zur Regenerierung von Brunnen und zur Reinigung der Pumpdruckleitungen durchgeführt. In der GWRA werden regelmäßig automatisierte Spülungen der Sandfilter durchgeführt.

Unabhängig von allen technischen Problemen funktioniert die Reinigung durchgehend im erforderlichen Ausmaß. Bislang war etwa alle 6 Monate ein Filtertausch erforderlich, wobei jeweils die Kohle des ersten Filters getauscht wurde. Im Anschluss an den Kohletausch wird die Reihenfolge der Filter derart geändert, dass der neue Filter an Position 3 die Aufgabe des Polizeifilters übernimmt. Bis Jahresende 2025 wurden rd. 785.000 m³ gepumpt, es erfolgte mittlerweile eine Entfrachtung von insgesamt rd. 620 g PFAS20.

5 WEITERE UNTERSUCHUNGSSCHRITTE

Im Zuge weiterer Untersuchungsmaßnahmen wurde ein bis dahin unbekannter PFAS-belasteter Kontaminationsbereich im südwestlichen Areal, insbesondere unterhalb des Hangar 2, entdeckt. Hier konnte auch erstmals die Perfluornonansäure (PFNA) als Hauptkomponente der PFAS20 dokumentiert werden. Die Herkunft von PFNA ist unbekannt. Zur Abgrenzung der PFAS-Belastung wurden ab Mitte 2022 flächige Detailuntersuchungen zur Abgrenzung der Altlast im Westen und Süden vorgenommen.
Nach Abschluss der Gefährdungsabschätzung durch das UBA im Mai 2022 wurden eine Vielzahl an Erkundungsmaßnahmen (15 Erkundungsschritte) durchgeführt. Die Ergebnisse von mehr als 100 zusätzlichen Bodenaufschlüssen mit rd. rund 1000 zusätzlichen PFAS-Analysen aus Proben dieser Erkundungen bedingen nun eine markante Ausweitung der erheblich von PFAS-Belastungen im Boden betroffenen Fläche.
Maßgeblich zur finalen Abgrenzung der Altlast waren einerseits konventionelle Kernbohrungen, zumeist bis in den grundwasserstauenden Salzburger Seeton und rasterförmig situierte Rammkernsondierungen mit Erkundungstiefen im Bereich bis 1,5 m, untergeordnet auch bis 4 m, mit Analytik ausgewählter Bodenproben auf PFAS20.
Auch hier erfolgten alle weiterführenden Untersuchungen im Auftrag der Salzburger Flughafen GmbH in enger Abstimmung mit dem UBA. Die Behörden wurden laufend in Besprechungen vor Ort über die Ergebnisse und weitere Maßnahmen informiert. Das UBA hat aufbauend auf den abschließenden Untersuchungsergebnissen ein neues Polygon zur Altlastenabgrenzung vorgelegt (siehe Abbildung 2).

6 LÖSUNGSANSATZ PHASE 2 NEU

Die zusätzlichen Erkundungsmaßnamen haben gezeigt, dass der von PFAS beeinträchtigte Bereich einen deutlich größeren Umfang aufweist als ursprünglich angenommen. Zudem ist auch die bestehende Bebauung von Terminalgebäuden umfasst. Aufgrund dieser Bebauung (Flughafengebäude, ein unterirdisch verlaufender Kollektorgang) ist die Errichtung einer allseitigen Dichtwandumschließung - wie sie lt. den Ergebnissen der Variantenstudie empfohlen wird technisch nicht möglich.
Es wurden in der Folge verschiedene Lösungsansätze diskutiert und mittels eines instationären Grundwassermodells (Geoconsult ZT GmbH) das Rückhaltevermögen und Auswirkungen der jeweiligen Maßnahme auf Dritte überprüft. In ersten Schritten wurden auch rein hydraulische Lösungen diskutiert, in allen Fällen ergaben sich dabei sehr große Pumpmengen. Die Auswirkungen der Grundwasserabsenkung wie auch der Wiederversickerung der gereinigten Pumpwässer hätten erhebliche Auswirkungen auf Rechte Dritter bewirkt und konnten nicht weiterverfolgt werden.
Um die Pumpmenge zu minimieren, wurde im Anstrom und seitlich der Altlast eine Lenkwand vorgeschlagen, welche PFAS-unbelastetes Grundwasser an der Altlast vorbeileitet und so die Pumpmenge reduziert.
Nach insgesamt 47 Lastfallberechnungen konnte eine Lösung gefunden werden, welche nach Errichtung einer Lenkwand bei allen Grundwasserständen, dem Betrieb von 6 Grundwasserbrunnen und der Entnahme von jeweils 2,0 l/s sowie einer Versickerung von Niederschlagswässern aus Starkregenereignissen aus der Oberflächenabdichtung eine optimale Lösung bietet. Die Lage der Lenkwand und der 6 Brunnen ist Abbildung 2 zu entnehmen.

6.1 Details Phase 2 neu

Die nach Norden offene u-förmig ausgebildete Lenkwand soll in Form einer Schmalwand (Tiefe bis 22 m) errichtet werden, begleitende Gutachten bzgl. Lärm und Erschütterung bemessen die Auswirkungen auf flughafeneigene sowie Nachbargebäude.
6 Brunnen mit einer Pumpmenge von insgesamt maximal 15 l/s verhindern in Verbindung mit der Lenkwand jedenfalls ein Ausströmen von belastetem Grundwasser aus dem Altlastbereich. Zur Beherrschung der Verockerungsproblematik werden alle Brunnen jeweils paarweise errichtet, Reinigungsmaßnahmen können somit ohne Unterbrechung des Pumpbetriebs erfolgen. Um die Vermischung unterschiedlicher Wässer und damit Ausfällungen zu vermeiden, werden Leitungen von den Brunnen zur GWRA einzeln geführt. Alle Pumpdruckleitungen werden zudem mit zusätzlichen Spülleitungen ausgestattet. Die Pumpen werden von Unterwasserpumpen auf wesentlich robustere trocken aufgestellte selbstsaugende Kreiselpumpen umgestellt.

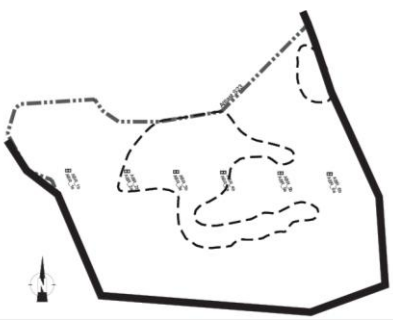


Abb. 2: Vergleich Altlastabgrenzung 2022 (strichliert) und 2025, Lage der nach Norden offenen Lenkwand (schwarze Linie) und der 6 Doppelbrunnen

Die GWRA wurde für die Phase 2 auf Basis der Betriebserfahrungen der Grundwasserreinigungsanlage der Phase 1 neu konzipiert (Ingenieurbüro für Wasserchemie Dr. Ulrich Wacht). Die vorliegende Planung sieht wie bei den Pumpbrunnen eine vollständige Redundanz vor. Es werden daher 2 parallele Linien von Sandfiltern errichtet, welche jeweils 15 l/s abarbeiten können. Die Aktivkohlefilter werden in Serie installiert, bei Bedarf kann ein Filter für mehrere Tage für den Zeitraum des Kohletausches stillgelegt werden, die beiden übrigen Filter übernehmen in dieser Zeit die Reinigungsleistung. Die Anlage sieht zur Verbesserung der Enteisenung eine vorgeschaltete Kaskadenbelüftung vor, zudem wird ein 50 m³ Becken für gereinigtes Wasser für Spülzwecke und ein ebensolches für die Aufnahme der Spülwässer vorgehalten. Um die Entsorgungsmengen der anfallenden Schlämme zu minimieren, ist ergänzend ein Schlammeindicker vorgesehen. Die Reinigungsleistung der GWRA wurde wie in der bestehenden GWRA der Phase 1mit 0,1 µg/l PFAS20 festgelegt.
Zur Hintanhaltung einer Auswaschung der PFAS in das Grundwasser ist es vorgesehen, alle aktuell nicht versiegelten Flächen innerhalb der Lenkwand mit einer Oberflächenabdichtung auszubilden. Aufgrund der im Flughafenbereich nicht möglichen Geländeanhebung ist für die Errichtung ein flächiger Aushub erforderlich. Die Profilierung der geplanten Abdichtung folgt im Norden und Osten den Geländeniveaus der nördlich situierten Abstellfläche bzw. dem Rollweg und steigt Richtung Südwesten in etwa mit 1% an.
Für die Errichtung der Oberflächenabdichtung wird der anstehende Boden derart ausgehoben, dass eine geneigte Fläche entsteht, die 70 cm unterhalb der zukünftigen mit rd. 1% geneigten Geländeoberkante liegt. Die Abdichtung erfolgt mittels 2,5 mm HDPE-Folie, die Entwässerung mittels einer 10 cm 16/32-Drainagekieslage. Darüber folgt lagenweise verdichtetes Boden-material inkl. Humusabdeckung. Ergänzend werden auf dem Niveau der Folie Nord-Süd-verlaufende Quermulden ausgebildet, welche versickernde Niederschlagswässer gesammelt nach Süden ausleiten. Diese Wässer werden wie auch die gereinigten Pumpwässer Sickerkünetten außerhalb der Lenkwand zugeführt.

Das Aushubmaterial wird vorab in einem engen Raster (Losgröße ca. 500 t) bis zur mutmaßlichen Aushubtiefe beprobt, analysiert und grundlegend charakterisiert. Maßgeblich für die Zuordnung zu Deponieklassen ist nach aktuellem Kenntnisstand ausschließlich der Parameter PFAS, wobei hier Festlegungen von Grenzwerten in der Deponieverordnung abzuwarten sind.
Zur Minimierung des Aushubs und zur Verbesserung der Bodeneigenschaften sind Verdichtungsmaßnahmen mittels Impulsverdichtung vorgesehen. Durch das Verdichten des Bodens wird die Oberfläche abgesenkt, die Entsorgungsmassen werden reduziert. Gleichzeitig kann das Rohplanum für die Verlegung der HDPE-Folie setzungsfrei hergestellt werden.
Zur Beweissicherung werden insgesamt 38 Brunnen und Pegel sowie die 6 Pumpbrunnen auf Basis eines Monitoringplans regelmäßig beweisgesichert. Neben chemischen Parametern wird auch das GW-Niveau maßgeblicher Pegel dauerregistriert.

6.2 Sanierungsprognose

Hinsichtlich der langfristigen Entwicklung der Grundwasserqualität ist davon auszugehen, dass mittelfristig (nach rd. 5 Jahren) im nahen Abstrom die Grenzwerte für PFAS20 von 0,1 µg/l unterschritten und dauerhaft eingehalten werden.
Langfristig ist für einen Bereich von 2 km abströmig der Altlast bei niedrigen/mittleren Grundwasserverhältnissen innerhalb von 10 - 25 Jahren ein Unterschreiten des Grenzwertes für PFAS20 von 0,1 µg/l zu erwarten.
Grundwasserhochstände können temporär höhere PFAS-Konzentrationen auslösen.

7 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Ein Teilbereich des Salzburger Flughafens wurde als Altlast S23 mit der Priorität 1 ausgewiesen. In einer für Feuerlöschübungen genutzten Teilfläche wurde eine erhebliche Kontamination des Untergrundes mit PFAS festgestellt.
Zur raschen Unterbindung einer weiteren Schadstoffausbreitung wurden in einer ersten Phase mehrere Sperrbrunnen in Betrieb genommen. Die Pumpwässer (bis zu 25 l/s) werden in einer mehrstufigen Grundwasserreinigungsanlage mittels Aktivkohle gereinigt und wiederversickert. Im Zuge einer detaillierten Grundwasserbeweissicherung wurde erkannt, dass die ursprünglich ausgewiesene Altlastfläche erheblich auszuweiten war. Detailuntersuchungen 2025 ermöglichten eine exakte Abgrenzung. Die endgültige Sanierungsmaßnahme sieht vor:

- Verminderung der Pumpmengen durch Umleitung anströmender unbelasteter Grundwässer mittels Lenkwand.
- Errichtung von 6 Brunnen mit einer Gesamtentnahmemenge von maximal 15 l/s, die Ausbildung als Doppelbrunnen dient der Aufrechterhaltung des Pumpbetriebs im Servicefall.
- Oberflächenabdichtung aller derzeit nicht versiegelten Altlastflächen.
- Reinigen von Pumpwässern auf Basis einer adaptierten Grundwasserreinigungsanlage und lineare Wiederversickerung außerhalb der Lenkwand.

Die zeitliche Umsetzung der Maßnahme hängt vor allem von den Vorgaben der geplanten Novelle der Deponieverordnung und der nachfolgenden Reaktion der Abfallwirtschaft auf die neuen PFAS-Grenzwerte ab.

KONTAKT

Dr. Hartwig Kraiger
office@gwu.at
+43662876360-0
GWU Geologie-Wasser-Umwelt GmbH
www.gwu.at

PFAS-Verunreinigung der Altlast ST37 Feuerwehrschule Lebring – ein Fallbeispiel

Elisabeth Winkler[1], Jürgen Maier[2] & Sara Lang[2]
[1)] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 15 – Referat Abfall- und Abwassertechnik, Chemie, Graz, Österreich
[2)] RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Frohnleiten, Österreich

KURZFASSUNG: Für die PFAS-kontaminierte Altlast ST37 „Feuerwehrschule Lebring“ wurde zur Erreichung des festgelegten Sanierungsziels eine Variantenuntersuchung durchgeführt. Nach einer systematischen Vorauswahl aus insgesamt 24 Verfahren wurden acht Sanierungs- und Sicherungsvarianten einer vertieften konzeptionellen Betrachtung unterzogen und mittels modifizierter Kosten-Wirksamkeits-Analyse (mKWA) bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination aus hydraulischer Abstromsicherung mittels vertikaler Sperrbrunnen und seitlicher Schmalwände, Grundwasserreinigung mittels Aktivkohlefiltration sowie einer In-Situ-Bodenspülung durch Rückführung der gereinigten Wässer in das Schadenszentrum die beste Gesamtbewertung aufweist.

1 EINLEITUNG

Im Rahmen von Trinkwasseruntersuchungen in den Jahren 2016 bis 2018 wurden im Leibnitzer Feld in der Steiermark erhöhte Konzentrationen von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) festgestellt. Nach darauffolgenden umfassenden Untersuchungen wurde der Altstandort „Feuerwehrschule Lebring“ im Jahr 2024 als Altlast mit der Priorität 1 ausgewiesen. Durch die jahrzehntelange Verwendung von Feuerlöschschäumen im Rahmen von Löschübungen kam es zu einer erheblichen Kontamination des Untergrundes und des Grundwassers mit PFAS, insbesondere mit Perfluoroctansulfonsäure (PFOS). In der Gefährdungsabschätzung des Umweltbundesamtes wurde als Sanierungsziel festgelegt, die Schadstoffausbreitung im Grundwasser kurzfristig auf ein solches Maß zu reduzieren, dass mittelfristig eine Rückbildung der Schadstofffahne erfolgt und damit im weiteren Abstrom dauerhaft und uneingeschränkt eine Nutzung zu Trinkwasserzwecken gewährleistet werden kann (Umweltbundesamt GmbH, 2024). Zur Erreichung des festgelegten Sanierungsziels und zur Auswahl einer geeigneten Sanierungs- bzw. Sicherungsmaßnahme wurde eine Variantenuntersuchung durchgeführt. Die in diesem Beitrag vorgestellte Variantenstudie wurde von der Fa. *blp GeoServices GmbH* erstellt (blp GeoServices GmbH, 2025).

2 STANDORTBESCHREIBUNG

Der Altstandort „Feuerwehrschule Lebring“ befindet sich im Leibnitzer Feld in unmittelbarer Nähe zur Mur in der uferbegleitenden Auzone auf der pleistozänen Niederterrasse (Würm) des Leibnitzerfeldes, die im Bereich des Altstandortes durch sandige Fein- bis Grobkiese mit Mächtigkeiten bis etwa 7 m aufgebaut wird. Diese Sedimente bilden den Grundwasserleiter. Im Liegenden sind als Grundwasserstauer feinsandige Schluffe anzutreffen. Der mittlere Grundwasserspiegel liegt zwischen 279,5 m. ü. A. und 281,5 m. ü. A. Der Grundwasserflurabstand beträgt im Mittel ca. 3 m und die Mächtigkeit des Grundwassers 3 m bis 4 m. Die Fließrichtung des Grundwassers verläuft generell von NNW nach SSE. Im weiteren Abstrom bzw. bei höheren Wasserständen wird das Grundwasser von der Mur infiltriert. Im Grundwasseranstrom ist aufgrund einer ca. 800 m flussaufwärts gelegenen Kraftwerk-Staustufe ein ausgeprägtes NW-SE-Gefälle vorhanden (siehe Abb. 2 und Abb. 3). Die hydraulische Durchlässigkeit wurde auf Basis von Kurzpumpversuchen mit durchschnittlich 2,0E-03 m/s ermittelt. Das hydraulische Gefälle beträgt rund 0,2 %. Unter Annahme einer mittleren Grundwassermächtigkeit von 3,5 m kann daraus der spezifische

Grundwasserdurchfluss im Bereich des Altstandortes mit 1,2 m³ pro Tag und Querschnittsmeter geschätzt werden. Bei einer Abstrombreite von 250 m ergibt sich eine hydraulische Fracht von rund 300 m³ pro Tag. Das Verdünnungspotential des Grundwasserstroms gegenüber dem Sickerwasser im Bereich von nicht versiegelten oder bebauten Flächen kann unter Berücksichtigung der lokalen meteorologischen Verhältnisse und der Waldbedeckung grob mit einem Faktor von rund 7 abgeschätzt werden (Umweltbundesamt GmbH, 2024).

Auf dem Standort der Feuerwehrschule Lebring wurden seit 1975 Schulungen zur Brandbekämpfung für Feuerwehren, Hilfsorganisationen sowie öffentliche und private Einrichtungen durchgeführt, bei denen auch sogenannte AFFF-Löschschäume zum Einsatz kamen.

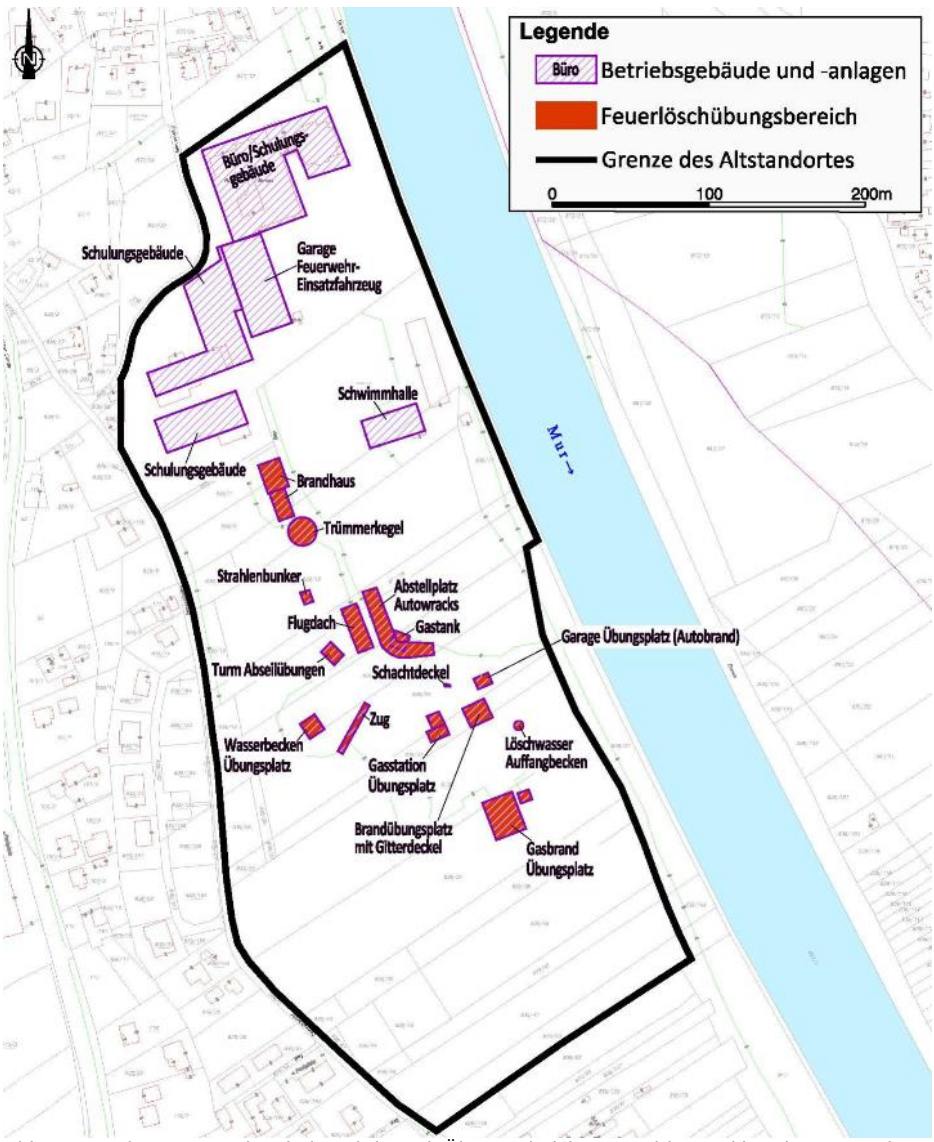


Abb. 1: Standort Feuerwehrschule Lebring mit Übungseinrichtungen ((Umweltbundesamt GmbH, 2024) und (blp GeoServices GmbH, 2023)

3 SCHADENSBILD

Die Untersuchungen des Altstandortes ergaben massive PFAS-Verunreinigungen mit Werten von max. 1.600 µg/kg im Gesamtgehalt und max. 220 µg/l in den Boden-Eluaten in den Übungsbereichen und deren näherer Umgebung mit einem Hot-Spot um den Abstellplatz der Autowracks. PFOS dominiert mit rund 60% Konzentrationsanteil in den einzelnen Proben das Schadstoffspektrum. Abbildung 2 zeigt das Standortmodel in einem Ost-West- sowie Nord-Süd-Schnitt.

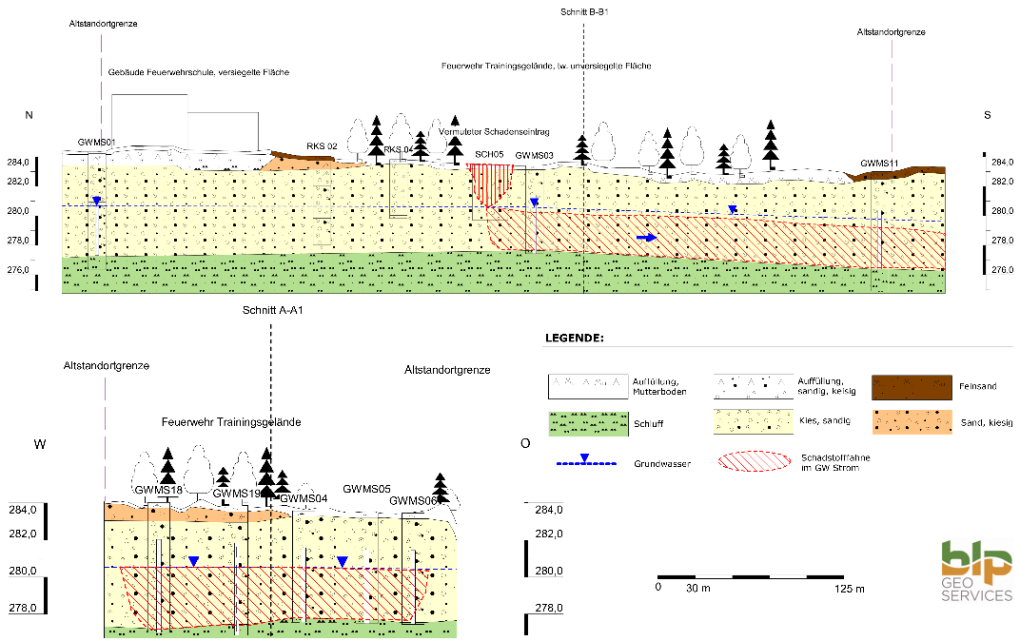


Abb. 2: Standortmodell der PFAS Kontamination in N/S-Schnitt und O/W-Schnitt (blp GeoServices GmbH, 2023)

Aufgrund des sehr durchlässigen Untergrundes kommt es zu einer massiven Ausbreitung der PFAS im Grundwasser, wobei die Fahnenlänge mit Überschreitungen des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung von 0,1 µg/l eine Länge von ca. 6,5 km aufweist (RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, 2022). Wesentlich zur Erhöhung des Risikos für die Gesundheit des Menschen und die Umwelt trägt bei, dass sowohl eine öffentliche Wasserversorgung als auch Trink- und Brauchwasserbrunnen von der Verunreinigung betroffen waren. In Abbildung 3 ist die Kontaminationsfahne im Grundwasser abströmig der Feuerwehrschule dargestellt.

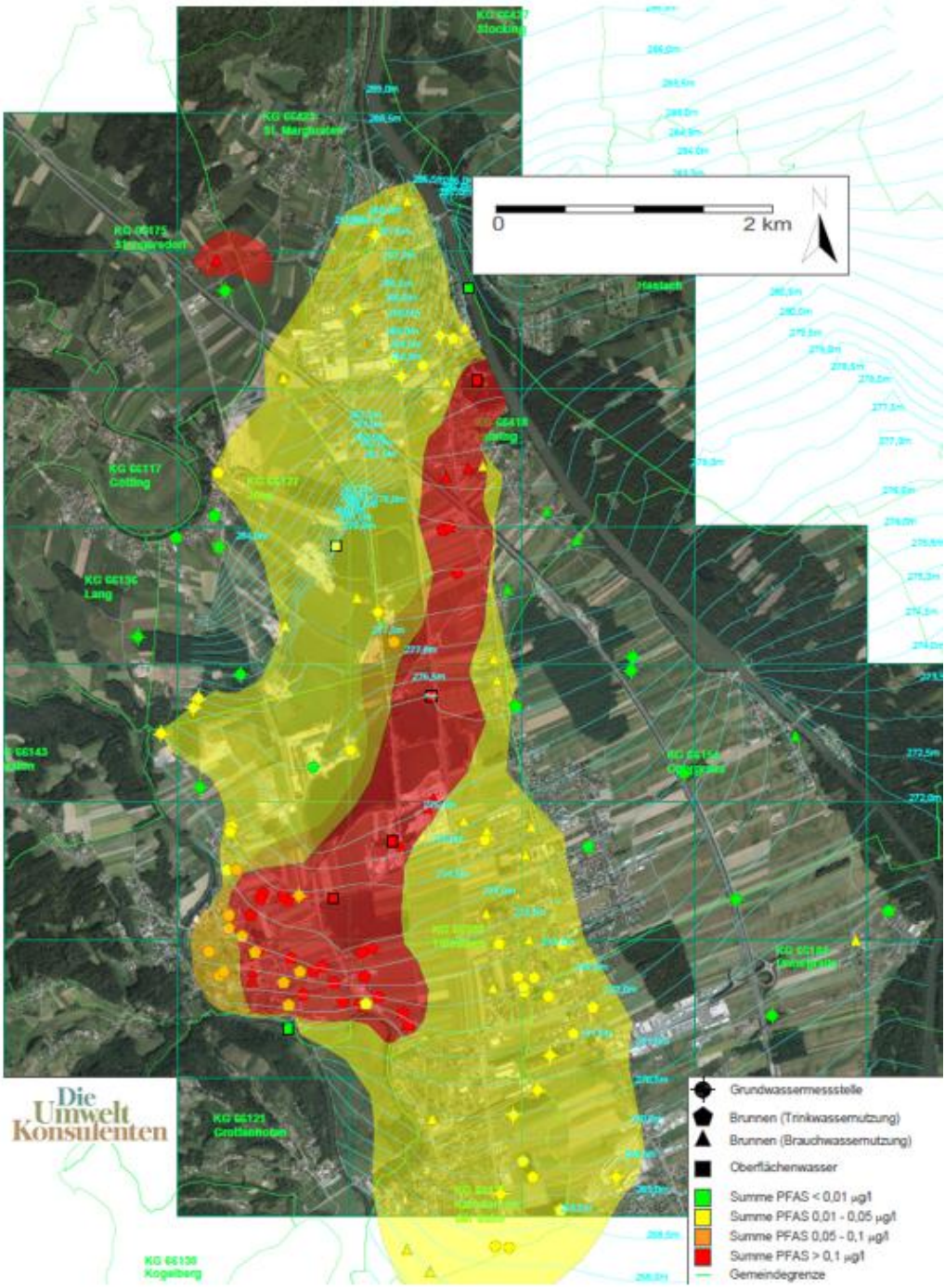


Abb. 3: PFAS-Fahne im Abstrom der Feuerwehrschule Lebring (RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, 2022)

4 METHODIK ZUR AUSWAHL DER SANIERUNGSVARIANTE

Die Auswahl der Sanierungs- bzw. Sicherungsvariante erfolgte in einem dreistufigen Verfahren. Im ersten Schritt wurden insgesamt 24 Verfahren, die grundsätzlich für die Sanierung bzw. Sicherung von Altlasten in Betracht kommen und dem Stand der Technik entsprechen, hinsichtlich der Erreichbarkeit der Sanierungsziele sowie ihrer technischen und rechtlichen Umsetzbarkeit bewertet. Im Ergebnis verblieben acht grundsätzlich geeignete Sanierungs- bzw. Sicherungsvarianten für eine vertiefte konzeptionelle Betrachtung.

Im zweiten Schritt wurden diese Varianten hinsichtlich ihrer Wirkungsweise, der standortspezifischen Umsetzung, technischer und rechtlicher Unsicherheiten, Auswirkungen auf die Nachnutzung sowie der Projektkosten vergleichend beschrieben.

Die abschließende Bewertung und Auswahl der Sanierungsvariante erfolgte mittels einer modifizierten Kosten-Wirksamkeitsanalyse (mKWA) gemäß den Förderungsrichtlinien der Kommunalkredit Public Consulting (KPC). Die mKWA ist ein Bewertungsinstrument, das die Projektkosten dem nicht monetär bewerteten Nutzen gegenüberstellt und dadurch die Auswahl der ökologisch, wirtschaftlich und technisch günstigsten Lösung im Hinblick auf die definierten Sanierungsziele ermöglicht (Ortmann, Frühwirth, & Döberl, 2011). Die Bewertung erfolgte anhand der Oberziele Ökologie, Flächenentwicklung und Projektstabilität.

5 VERBLEIBENDE SANIERUNGSVARIANTEN NACH DER VORAUSWAHL

Nach der systematischen Vorauswahl wurden acht grundsätzlich geeignete Sanierungs- bzw. Sicherungsvarianten einer vertieften Bewertung unterzogen. Die Varianten unterscheiden sich hinsichtlich des Umfangs der Schadstoffentfrachtung im Schadensherd, der Art der hydraulischen Sicherung des kontaminierten Grundwasserabstroms sowie der Projektlaufzeit und der daraus resultierenden Projektkosten. Einen Überblick über die untersuchten Varianten sowie die Ergebnisse der Variantenbewertung gibt nachfolgende Tabelle 1.

Tab. 1: Sanierungsvarianten und Ergebnisse der Variantenbewertung (blp GeoServices GmbH, 2025)

Nr	Sanierungsvariante	Projekt-laufzeit [a]	Projekt-kosten-barwert [Mio. €]	Gesamt-Wirksam-keit	Wirksamkeit / Kosten
1	Abstromsicherung mit Sperrbrunnen	50	12,1	3.732	3,08
2	Abstromsicherung mit Sperrbrunnen und seitlichen Schmalwänden	50	10,9	3.662	3,35
3	**Abstromsicherung mit Sperrbrunnen und seitlichen Schmalwänden mit Versickerung im Schadensherd**	**40**	**11,0**	**4.218**	**3,83**
4	Abstromsicherung mit Sperrbrunnen und seitlichen Schmalwänden und zusätzlich Versickerung des Grundwassers im Schadensherd mit Beimengung von Tensiden	30	14,2	4.858	3,41
5	Teilaushub im Schadensherd mit On-Site-Bodenwäsche und Abstromsicherung mit Sperrbrunnen und seitlichen Schmalwänden	30	14,0	4.571	3,26
6	Gesamtaushub mit On-Site Bodenwäsche	15	43,7	5.611	1,28
7	Funnel and Gate mit Aktivkohle	50	11,1	3.299	2,98
8	Umschließung mit Wasserhaltung	50	12,0	3.283	2,73

6 ERGEBNISSE DER VARIANTENBEWERTUNG UND AUSGEWÄHLTE SANIERUNGSVARIANTE

Die Ergebnisse der abschließenden Bewertung der acht Varianten mittels modifizierter Kosten-Wirksamkeits-Analyse (mKWA) zeigen, dass die Varianten 1, 2, 7 und 8 die geringste Wirksamkeit aufweisen, während durch zusätzliche Maßnahmen im Schadensherd bei den Varianten 3 bis 5 höhere Wirksamkeiten erzielt werden. Variante 6 weist aufgrund der vollständigen Entfernung der Schadstoffe die höchste Wirksamkeit auf, ist jedoch mit deutlich höheren Kosten verbunden. Insgesamt ergibt sich für Variante 3 das günstigste Verhältnis zwischen Wirksamkeit und Kosten und somit die beste Gesamtbewertung (siehe Tabelle 1).

Die ausgewählte Sanierungsvariante kombiniert eine hydraulische Abstromsicherung mit einer Versickerung gereinigter Grundwässer im Schadensherd. Der kontaminierte Grundwasserabstrom wird durch seitliche Schmalwände entlang der westlichen und östlichen Altstandortgrenze sowie durch voraussichtlich acht Sperrbrunnen entlang der südlichen Altstandortgrenze erfasst. Das geförderte Grundwasser wird einer Grundwasserreinigungsanlage mit Aktivkohlefiltration zugeführt. Ein Teilstrom des gereinigten Grundwassers wird in die Mur eingeleitet, während ein weiterer Teilstrom im Bereich des Schadensherdes über flächig verlegte Versickerungsleitungen auf einer Fläche von rund 4.000 m^2 wieder versickert wird. Durch die Versickerung gereinigten Grundwassers im Schadensherd soll die Mobilisierung und der Austrag der PFAS erhöht werden. Die mobilisierten Schadstoffe werden über die Sperrbrunnen erfasst, in der Grundwasserreinigungsanlage behandelt und aus dem Grundwassersystem entfernt. Die Schmalwände weisen eine Gesamtlänge von rund 500 m auf und werden etwa 1 m in den Grundwasserstauer eingebunden. Die Bemessung der Sperrbrunnen erfolgt entsprechend den hydrogeologischen Standortverhältnissen, wobei durch die Überlagerung der Entnahmetrichter eine vollständige Erfassung des kontaminierten Grundwasserabstroms sichergestellt werden soll. Begleitend zur Sanierung ist ein Grundwassermonitoring unter Nutzung der bestehenden Grundwassermessstellen vorgesehen. Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt die ausgewählte Sanierungsvariante mit der Lage der Sperrbrunnen (GWSB), der Schmalwände (strichliert) und des Versickerungsbereiches (schraffiert).

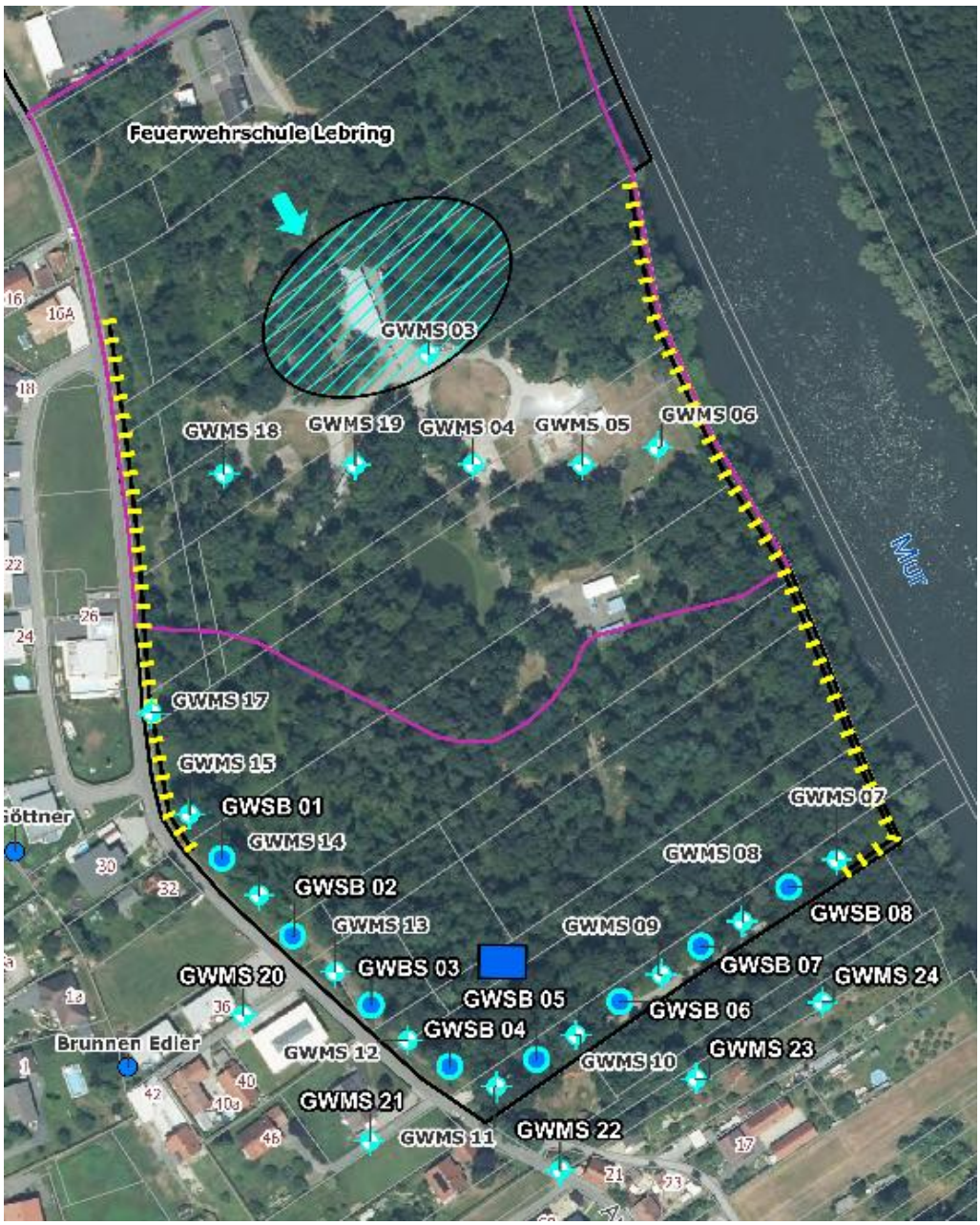


Abb. 4: Schematische Darstellung der ausgewählten Sanierungsvariante (blp GeoServices GmbH, 2025)

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zur Erreichung der Sanierungsziele der PFAS-kontaminierten Altlast ST37 „Feuerwehrschule Lebring“ wurde eine Variantenstudie durchgeführt. Nach einer Vorauswahl aus 24 Verfahren wurden acht Sanierungs- und Sicherungsvarianten mittels modifizierter Kosten-Wirksamkeitsanalyse (mKWA) bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination aus Abstromsicherung mittels Sperrbrunnen und seitlichen Schmalwänden, Grundwasserreinigung mittels Aktivkohlefiltration sowie der Versickerung gereinigter Grundwässer im Schadensherd (Variante 3) das günstigste Verhältnis zwischen Wirksamkeit und Kosten aufweist.

Die Fertigstellung der Einreichplanung ist für das dritte Quartal 2026 vorgesehen. Nach Abschluss der Detailplanung und des Vergabeverfahrens im Jahr 2027 ist bei planmäßigem Projektverlauf ein Baubeginn im dritten Quartal 2027 vorgesehen. Die Fertigstellung der Baumaßnahmen wird nach einer Bauzeit von rund sechs Monaten für das erste Quartal 2028 erwartet.

LITERATURVERZEICHNIS

blp GeoServices GmbH. (2023). Abschlussbericht Ergänzende Untersuchungen Gem. § 13 ALSAG am Altstandort "Feuerwehrschule Lebring". Wien.

blp GeoServices GmbH. (Mai 2025). Variantenuntersuchung - Mögliche Sanierungs-/ Sicherungsmethoden Altlast ST37 "Feuerwehrschule Lebring" in Lebring-Sankt Margarethen. Wien, Österreich.

Ortmann, M., Frühwirth, W., & Döberl, G. (2011). Modifizierte Kosten-Wirksamkeits-Analyse in der Altlastensanierung - Handbuch für Variantenstudien. Wien, Österreich: Umweltbundesamt GmbH, Kommunalkredit Public Consulting GmbH, denkstatt GmbH.

RM Umweltkonsulenten ZT GmbH. (2022). Abschlussbericht Ergänzende Untersuchungen gemäß § 13 ALSAG "Altstandorte und Altablagerungen Leibnitzer feld Mitte, Grundwassermonitoring (Erkundungsphase 1). Frohnleiten.

Umweltbundesamt GmbH. (4. April 2024). Altstandort "Feuerwehrschule Lebring" - Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung. Wien, Österreich.

RM Umweltkonsulenten ZT GmbH (September 2022) Abschlussbericht Ergänzende Untersuchungen gemäß §13 ALSAG „Altstandorte und Altablagerungen

Leibnitzer Feld Mitte; Grundwassermonitoring (Erkundungsphase I)“. Frohnleiten, Österreich

blp GeoServices GmbH. (November 2023). Abschlussbericht Ergänzende Untersuchungen gemäß §13 ALSAG „Altstandort Feuerwehrschule Lebring“. Wien, Österreich

KONTAKT

Dipl.-Ing. Dr. Elisabeth Winkler
e.winkler@stmk.gv.at
+43 316 8774914 / +43 676 86664914
Abteilung 15, Referat Abfall- und Abwassertechnik, Chemie, Bereich Abfalltechnik und Altlasten
Amt der Steiermärkischen Landesregierung
https://www.verwaltung.steiermark.at/

Dipl.-Ing. Dr. Jürgen Maier
maier@umweltkonsulenten.at
+43 3126 5920827 / +43 664 88271201
RM Umweltkonsulenten ZT GmbH
https://umweltkonsulenten.at/

Das transparente Krankenhaus: Abfallwirtschaftliche Untersuchungen im Gesundheitswesen

Jörg Woidasky[1], Anton Vielsack[1], Franziska Zecha[1], Tobias Viere[1] & Anne-Kathrin Cassier-Woidasky[2]
[1)] Hochschule Pforzheim, Forschungsstelle Kreislaufwirtschaft im Gesundheitswesen – Institut für Industrial Ecology, Pforzheim, Deutschland
[2)] Universität Trier, Fachbereich Pflegewissenschaft, Professur für Pflegewissenschaft I, Trier, Deutschland

KURZFASSUNG: Das Gesundheitswesen in Deutschland gehört zu den größten Rohstoffverbrauchern und Treibhausgasverursachern. Dennoch existieren derzeit nur punktuelle, meist herstellerspezifische kreislaufwirtschaftliche Lösungen, eine systematische Erfassung und Schließung der Produkt- und Materialkreisläufe steht noch aus. Gründe hierfür sind neben engen rechtlichen Vorgaben die lückenhaften Kenntnisse zu den Stoffströmen im Gesundheitswesen. Am Beispiel von Krankenhäusern skizziert der Beitrag, welche kreislaufwirtschaftlichen Kennwerte in den vergangenen Jahren erhoben werden konnten. Neben einer Verbesserung der Datenbasis ist die interdisziplinäre Bearbeitung kreislaufwirtschaftlicher Fragestellungen eine zentrale Voraussetzung für die Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft im Gesundheitswesen.

1 ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE RELEVANZ DES GESUNDHEITSWESENS

Gesundheitsausgaben machen einen substantiellen Anteil am Bruttoinlandsprodukt aus: 2021 lagen sie in Deutschland bei 12,8% des BIP, in Österreich machten sie 12,2% aus (BMWK 2023). Diese Wirtschaftsleistung wird in Deutschland von etwa 7,7 Millionen Menschen erbracht (BMWE 2026). In Deutschland liegt die Bruttowertschöpfung der Gesundheitswirtschaft bei etwa 500 Milliarden Euro, die sich im Jahr 2025 auf die medizinische Versorgung (52,7%), die industrielle Gesundheitswirtschaft (23,4%) und weitere Teilbereiche (23,9%) aufteilte. Die medizinische Versorgung mit ambulanten und stationären Einrichtungen ist damit der wirtschaftlich, aber auch umweltlich relevanteste Bereich der Gesundheitswirtschaft. Sie ist mit einem Rohstoffverbrauch von 107 Millionen Tonnen (2016) und einer Verbrauchszunahme um 80% zwischen 1995 und 2016 eine der fünf relevantesten rohstoffverbrauchenden Branchen in Deutschland. Etwa zwei Drittel dieser Rohstoffe werden importiert (Ostertag u. a. 2021). Auch die Klimawirkung des Gesundheitswesens hat mit 68 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalenten und etwa 6 % der gesamten deutschen Klimawirkung eine ähnliche Relevanz, wobei der Anteil ausländischer Treibhausgas-(THG-)Emissionen etwa bei der Hälfte der Gesamtemissionen liegt. Die THG-Emissionen im Scope 3 sind mit 81% die relevantesten, gefolgt von Scope 2 (10%) und Scope 1 (9%) (Pichler u. a. 2022). Das Gesundheitswesen ist damit sowohl eine relevante Ursache für THG-Emissionen als auch durch deren gesundheitlichen Folgen für die Bevölkerung Betroffener des Klimawandels (Kriit u. a. 2026).

2 STAND DER KREISLAUFWIRTSCHAFT IM GESUNDHEITSWESEN

Die Relevanz nachhaltiger Ansätze und zirkulärer Praktiken im Gesundheitswesen in Deutschland wurde bereits erkannt (Schuster u. a. 2024; Dohmen u. a. 2023; Kochanek u. a. 2024). Derzeit gibt es allerdings nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen und eine begrenzte Anzahl praktischer Pilotprojekte zu Kreislaufwirtschaftsansätzen für das deutsche Gesundheitswesen, denn es fehlen wichtige Informationen für die Entwicklung evidenzbasierter Transformationsstrategien hin zur Kreislaufwirtschaft (Diaz u. a. 2008; Kaposi u. a. 2024). Neben punktuellen Untersuchungen zur Beschaffung in Krankenhäusern (Ivanović u. a. 2022) oder konzeptionellen Ansätzen (Mayer u. a. 2025) finden sich in der Praxis meist lediglich unternehmensspezifische Ansätze zur Erfassung und Kreislaufführung vor allem hochwertiger Einwegprodukte wie z. B.

Klammernahtgeräte (Viamedica 2022). Die Gestaltung eines klima-, nachhaltigkeits- und kreislauforientierten Gesundheitswesen ist derzeit mangels Daten (Stüber 2026) lediglich ein Entwicklungsziel.
Das Ziel dieses Beitrages ist es, den aktuellen Stand der Umsetzung zirkulärer Ansätze im Gesundheitswesen zu skizzieren und dabei den Schwerpunkt auf die Datenverfügbarkeit abfallwirtschaftlicher Kennzahlen zu legen, um ein aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht „transparentes" Gesundheits- und Krankenhauswesen zu ermöglichen.

3 BASISDATEN ZUR KREISLAUFWIRTSCHAFT IM KRANKENHAUS

Internationale wissenschaftliche Publikationen weisen selten kreislaufwirtschaftliche Angaben deutscher Krankenhäuser auf (Mol u. a. 2022; Slutzman u. a. 2023), da es aufgrund der Datenerhebungsmethodik auf Landes- und Bundesebene keine öffentlich publizierten deutschen Kennwerte z. B. für die Abfallerzeugung pro Bett oder pro Belegungstag gibt (Vielsack, Farid, u. a. 2026). Zum Schließen dieser Forschungslücke wurde an der Hochschule Pforzheim eine deutschlandweite Benchmarkstudie konzipiert, in deren Rahmen die Jahres-Abfallstatistiken von Krankenhäusern erfasst und vergleichend aufbereitet werden. Die Datenerhebung für 2023 ergab einen Abfall-Gesamtanfall von 8,33 kg/Behandlungsfall, 1.545 kg/Bett, Jahr bzw. 4,23 kg/Bett, Tag sowie von 565,3 kg/Vollzeitbeschäftigten-Äquivalent und Jahr (Vielsack, Galler, u. a. 2026). Die Aufteilung dieser Abfallmassen auf Abfallarten bzw. -schlüssel zeigt Abbildung 1.

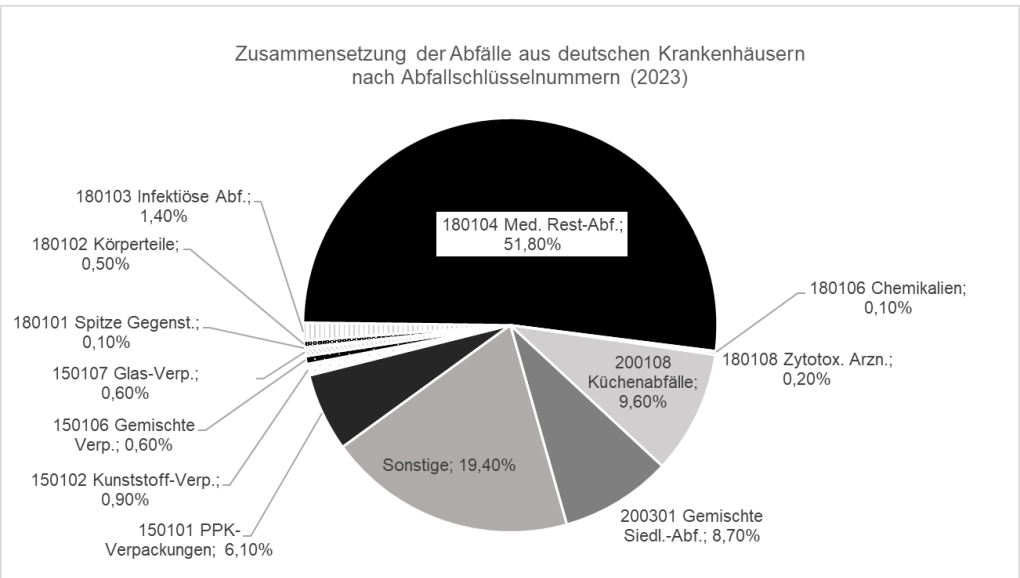


Abb. 1: Zusammensetzung der Abfälle aus deutschen Krankenhäusern nach Abfallschlüsselnummern (2023; nach (Vielsack, Galler, u. a. 2026))

4 BESCHAFFUNG

Der Beschaffungsumfang größerer deutscher Krankenhäuser mit mehreren hundert Betten liegt bei etwa 18.000 verschiedenen Produkten (Artikelnummern). Bezogen auf die absolute Anzahl der beschafften Artikel zeigt sich, dass lediglich etwa 160 Artikelnummern bereits 90% der insgesamt beschafften Artikelanzahlen abdecken. Diese häufigsten Produkte mit Medizinbezug wurden beschafft und hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und der materialspezifischen Klimawirkung untersucht und gruppiert (Markmann 2025). Die Produktkategorien mit den relevantesten

summarischen Material-Klimawirkungen (ohne Berücksichtigung der Nutzungs- oder Entsorgungsschritte) sind (1) Abdeckungen/Bezüge/Textilien, (2) Handschuhe, (3) Infusionstechnik, (4) Stationsbedarf sowie (5) Inkontinenzartikel. Sie verursachen etwa 70% der Gesamtklimawirkung der insgesamt 160 Produkte (Zecha 2026). Abbildung 2 zeigt die dieser Berechnung zugrundeliegende Aufteilung auf einzelne Werkstoffe.

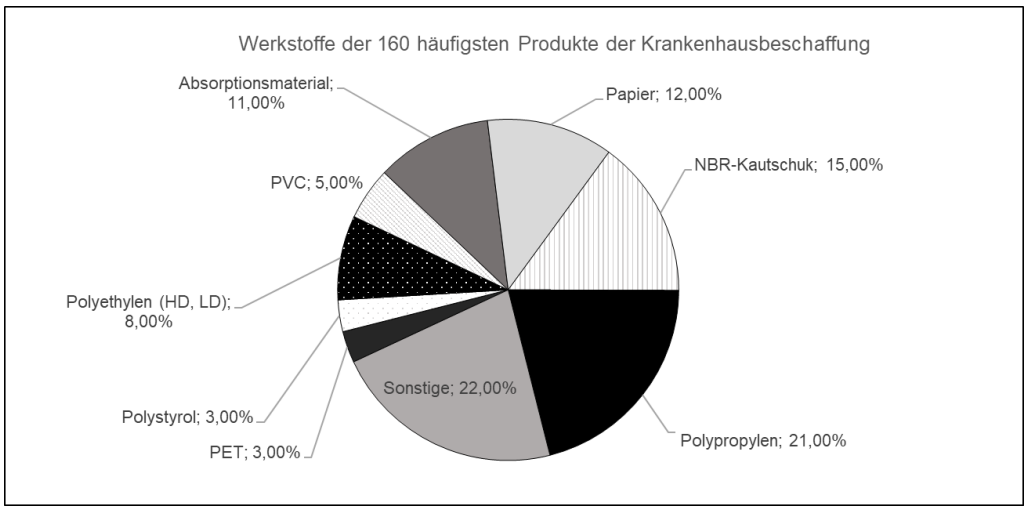


Abb. 2: Werkstoffe der 160 häufigsten Produkte der Krankenhausbeschaffung (Gew.-%; Summenwerte über alle Produkte; basierend auf (Markmann 2025))

Zur Priorisierung wurde eine stations- und funktionsbereichsspezifische Auswertung der Abfallintensität durch Zuordnung von Nennvolumina und Anzahl bestellter Müllsäcke aus Beschaffungsdaten eines Krankenhauses durchgeführt. Sie zeigte, dass 27% dieses „Entsorgungsvolumens“ von den Bereichen Zentral-OP (8%), Zentrale Notaufnahme (7%), Kardiologie (6%) und Geburtshilfe (6%) genutzt werden, alle anderen Bereiche weisen deutlich geringere Anteile auf.

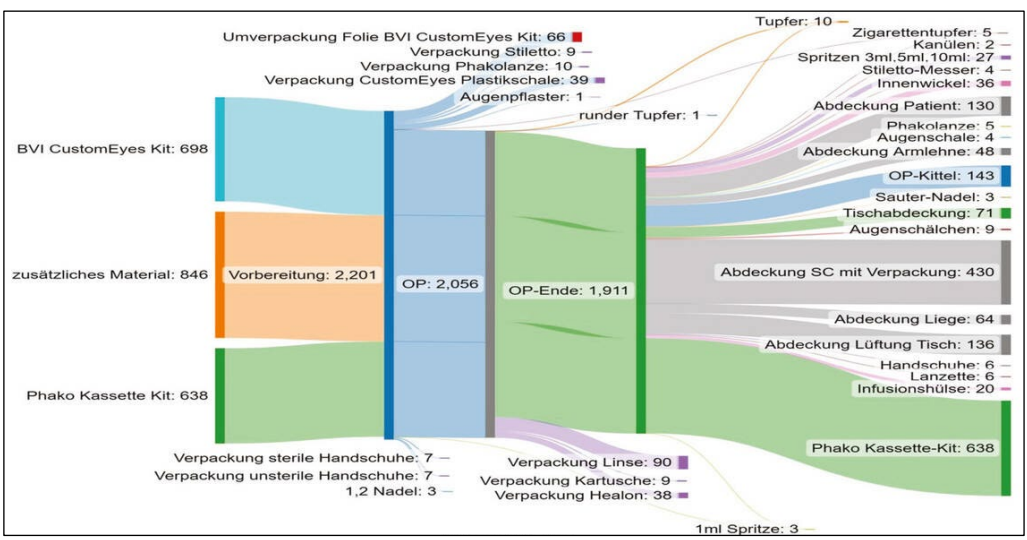


Abb. 3: Zeitaufgelöste Abfallentstehung am Beispiel einer Katarakt-OP [g] (Rando u. a. 2023)

5 NUTZUNG

Die Nutzung und vor allem der Zeitpunkt und die Umstände der Entsorgung von Produkten sind wichtige kreislaufwirtschaftliche Informationen. Im medizinischen und Pflege-Umfeld ist es besonders wichtig, die (Getrennt-)Erfassungsansätze für Abfälle auf die spezifischen Abläufe bei der Behandlung und Versorgung der Patienten abzustimmen. Eine detaillierte Prozessanalyse im Krankenhaus ist für die Entwicklung praxisgerechter kreislaufwirtschaftlicher Lösungen unabdingbar. Hierfür wurde gemeinschaftlich mit der htw saar (Saarbrücken/Deutschland) und der Universität Trier (Deutschland) ein strukturiertes Vorgehen zur Prozess-Erfassung und Analyse entwickelt und eingesetzt, das zeitlich aufgelöst den Produkteinsatz und den damit verbundenen Abfallanfall in abfallrelevanten Bereichen wie den OPs erfasst (Abbildung 3; (Rando u. a. 2023)).

6 ENTSORGUNG

Die Abfallmassen pro Bett und Jahr sind abhängig vom Leistungsumfang der Einrichtungen und erwartungsgemäß bei Universitätskliniken am höchsten (Abbildung 4). Eine Röntgen-Untersuchung der infektiösen Abfälle (Abfallschlüssel 180103*; (Vielsack, Magiera, u. a. 2026)), die in standardisierten Behältern entsorgt werden, zeigte dabei mit etwa 2/3 aller Behälter einen erstaunlich hohen Anteil an weitgehend homogenen Abfällen aus dem Laborbereich, der einen guten technischen Ausgangspunkt für Konzepte zur Abfallverwertung bietet. Unter den derzeitigen rechtlichen bzw. Vollzugs-Rahmenbedingungen in Deutschland (NN 2021) ist die Verfolgung dieser Ansätze jedoch mit hohen Zulassungshürden und Einzelfallentscheidungen verbunden.

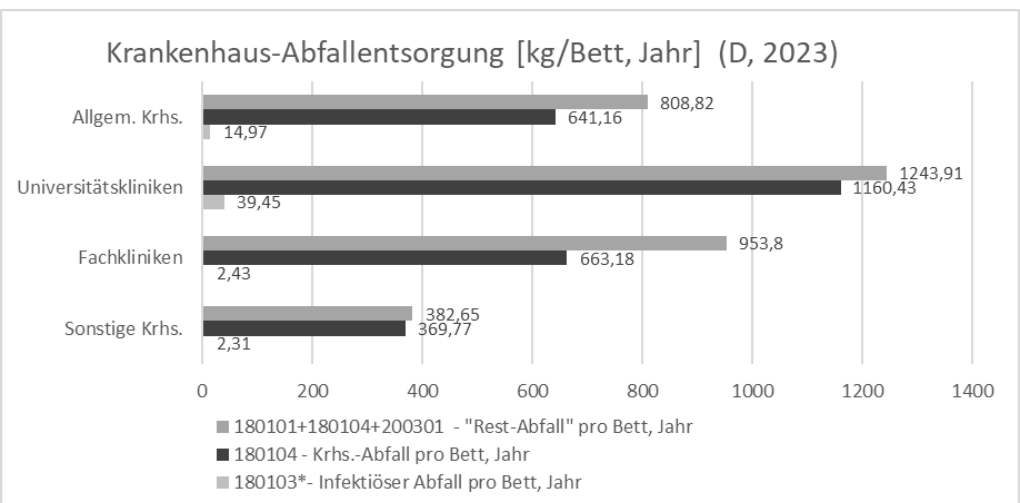


Abb. 4: Krankenhaus-Abfallentsorgung [kg/Bett, Jahr] in Krankenhäusern verschiedener Leistungsumfänge in Deutschland (nach (Vielsack, Cassier-Woidasky, u. a. 2026))

7 ZUSAMMENFASSUNG

Die kreislaufwirtschaftliche Situation in deutschen Krankenhäusern rückt nicht nur durch die wirtschaftliche und Klima-Relevanz der Gesundheitswirtschaft in den Fokus, sondern auch durch die Ansprüche und Erwartungen der Beschäftigten. Trotz hoher Motivation zur Umsetzung umweltfreundlicher Ansätze fehlt es jedoch in der Regel an wissenschaftlich begründeten, validen Ansätzen. Ein weiteres Hemmnis sind enge rechtliche Vorgaben und Verwaltungshandeln, so dass heute krankenhausspezifischer Abfall praktisch vollständig verbrannt wird. Das kreislaufwirtschaftliche Potential der Krankenhausabfälle ist jedoch groß: Je Bett und Jahr fallen über

1,5 Tonnen Abfälle an, davon sind ca. 50% allgemeine Krankenhausabfälle (Abfallschlüssel 180104). Die Krankenhausbereiche mit der höchsten abfallwirtschaftlichen Relevanz sind die Operationssäle sowie die Zentrale Notaufnahme. Kreislaufwirtschaftliche Ansätze und Innovationen in diesen und den anderen Krankenhausbereichen benötigen aber genaue Kenntnisse zu den medizin- und pflegespezifischen Prozessen, damit sie praxisgerecht und aus Sicht der Beschäftigten akzeptabel sind. Die kreislaufwirtschaftliche Weiterentwicklung im Krankenhaus und im gesamten Gesundheitswesen kann daher nur mit konsequent interdisziplinären Ansätzen gelingen.

8 DANKSAGUNG

Die Autorinnen und Autoren danken den Projektpartnern sowie den Fördermittelgebern der öffentlich geförderten Vorhaben „Medizinische Einmalgebrauchsprodukte in der Kreislaufwirtschaft (MEiK)“ des BMWE (Fkz. 03EI5020A) und „Systematische Erschließung des kreislaufwirtschaftlichen Potentials von Beatmungssystemen (SEB)“ der Deutschen Bundesstiftung Umwelt im Förderschwerpunkt CirculAID (Az. 39031/01-31) sowie dem baden-württembergischen Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst für die Unterstützung im Rahmen der „Leistungsorientierten Förderung des akademischen Mittelbaus für Forschergruppen an HAWen 2025 (Mittelbauprogramm 2025)“, von denen ausgewählte Inhalte für diese Publikation verwendet wurden. Die Verantwortung für diese Publikation liegt ausschließlich bei den Autorinnen und Autoren.

LITERATURVERZEICHNIS

BMWK. 2023. „Gesundheitswirtschaft – Fakten & Zahlen. Ergebnisse der Gesundheitswirtschaftlichen Gesamtrechnung, Daten 2022.“ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/gesundheitswirtschaft-fakten-zahlen-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

BMWE. 2026. "Gesundheitswirtschaft – Daten und Trends zur Gesundheitswirtschaft in Deutschland, 2025." Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/F/Faktenblaetter/faktenblatt-ggr.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Diaz, Luis F., Eggerth, Linda L., Enkhtsetseg, Shinee, und Savage, George M. 2008. „Characteristics of Healthcare Wastes“. *Waste Management* 28 (7): 1219–26. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.04.010.

Dohmen, Jonas, Meike Lessau, Michael Schmitz, und Jörg C. Kalff. 2023. „Recycling von chirurgischen Einweginstrumenten – lohnt sich das?“ *Zentralblatt für Chirurgie - Zeitschrift für Allgemeine, Viszeral-, Thorax- und Gefäßchirurgie* 148 (04): 329–36. https://doi.org/10.1055/a-2122-7519.

Ivanović, Tijana, Hans-Jörg Meisel, Claudia Som, und Bernd Nowack. 2022. „Material flow analysis of single-use plastics in healthcare: A case study of a surgical hospital in Germany“. *Resources, Conservation and Recycling* 185 (Oktober): 106425. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106425.

Kaposi, Adam, Attila Nagy, Gabriella Gomori, und Denes Kocsis. 2024. „Analysis of Healthcare Waste and Factors Affecting the Amount of Hazardous Healthcare Waste in a University Hospital“. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 26 (2): 1169–80. https://doi.org/10.1007/s10163-024-01890-1.

Kochanek, M, Berek, M, und Gibb, S. 2024. „S1 Leitlinie Nachhaltigkeit in der Intensiv und Notfallmedizin“. AWMF online, August 30. https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/113-004.

Kriit, Hedi K., José Chen-Xu, Jan C. Semenza, u. a. 2026. „The 2026 Europe report of the Lancet Countdown on health and climate change: narrowing window for decisive health action“. *The Lancet Public Health*, April, S2468266726000253. https://doi.org/10.1016/S2468-2667(26)00025-3.

Markmann, Melchior. 2025. „Materialidentifikation medizinischer Einmalgebrauchsprodukte als Grundlage der Kreislaufführung“. Bachelorarbeit. Pforzheim, Januar 31.

Mayer, Juliane, Helena Schittenhelm, und Peter P. Pott. 2025. „Opportunities and Challenges of Implementing Circular Economy in the Medical Device Sector in Germany“. *Sustainable Production and Consumption* 56 (Juni): 657–70. https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.04.014.

Mol, Marcos Paulo Gomes, Tara Rava Zolnikov, Arthur Couto Neves, u. a. 2022. „Healthcare Waste Generation in Hospitals per Continent: A Systematic Review“. *Environmental Science and Pollution Research* 29 (28): 42466–75. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19995-1.

NN. 2021. „Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes: Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 18“. Herausgegeben von Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall. Juni 1.

Ostertag, Katrin, Tanja Bratan, Carsten Gandenberger, Bärbel Hüsing, und Matthias Pfaff. 2021. Ressourcenschonung im Gesundheitssektor - Erschließung von Synergien zwischen den Politikfeldern Ressourcenschonung und Gesundheit. Teil 1862-4804. (Dessau-Roßlau), *UBA-Texte*, Texte 15/2021.

Pichler, Peter-Paul, Ingram S. Jaccard, Leonie Hanewinkel, und Helga Weisz. 2022. *Sachbericht zum Projekt: Evidenzbasis Treibhausgasemissionen des deutschen Gesundheitswesens GermanHealthCFP*. (Potsdam). https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/5_Publikationen/Gesundheit/Abschlussberichte/GermanHealthCFP_Sachbericht.pdf

Rando, Sabrina, Haas-Adam, Johanna, Mühlbauer, Johanna, Spengler, Robin, Wirth, Lilith, Woidasky, Jörg, Cassier-Woidasky, Anne-Kathrin. 2023. Ansätze zur Kreislaufwirtschaft im OP. *PflegenIntensiv*. Nr. 4/2023: 70–76.

Schuster, Martin, Richter, Hannah, Pecher, Sabine, Bein, Thomas, Grüßer, Linda, Kowark, Ana, Lehmann, Ferdinand, Samwer, Charlotte, Brenner, Thorsten, Coburn, Mark. 2024. Positionspapier mit konkreten Handlungsempfehlungen der DGAI und des BDA: Ökologische Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie und Intensivmedizin – Aktualisierung 2024 (DE), *Anästh Intensivmed*. 2024;65:541–557. DOI: 10.19224/ai2024.541.

Slutzman, Jonathan E., Hannah Bockius, Ilyssa O. Gordon, u. a. 2023. „Waste Audits in Healthcare: A Systematic Review and Description of Best Practices“. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy* 41 (1): 3–17. https://doi.org/10.1177/0734242X221101531.

Stüber, Sven. 2026. *Analyse zum Klimaimpact der Gesundheitsversorgung: Emissionsquellen, Handlungsfelder, Gestaltungsoptionen*. BKK Dachverband e.V. Stabsstelle Nachhaltigkeit. Berlin. https://www.bkk-dachverband.de/fileadmin/Artikelsystem/Pressemitteilungen/Pressemitteilungen_2026/Klimaimpact_Gesundheitsversorgung_Bericht.pdf.

Viamedica. 2022. „KLIK - Klimamanager für Kliniken: Suche nach Maßnahmen: Maßnahme Recycling von OP-Klammernahtgeräten“. September 28. https://www.klik-krankenhaus.de/klik-datenbank/suche-nach-massnahmen?tx_klikdb_search%5Baction%5D=show&tx_klikdb_search%5Bcontroller%5D=Measure&tx_klikdb_search%5Bmeasure%5D=497&cHash=9d8acf38ae24e279fdb37d81c3b9c6f7.

Vielsack, Anton, Anne-Kathrin Cassier-Woidasky, und Jörg Woidasky. 2026. „Benchmarkstudie zur Abfallentstehung an deutschen Krankenhäusern: Kurzdarstellung der Ergebnisse“. Preprint, Pforzheim University of Applied Sciences. Application/pdf. https://doi.org/10.60846/ABZF-CW05.

Vielsack, Anton, Fayyaz Yusuf Farid, und Jörg Woidasky. 2026. „Infectious and Other Hospital Waste in Germany: Review of Available Statistical Data“. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 28 (2): 1659–73. https://doi.org/10.1007/s10163-026-02508-4.

Vielsack, Anton, Viola Galler, Anne-Kathrin Cassier-Woidasky, Franziska Zecha, und Joerg Woidasky. 2026. Healthcare Waste in German Hospitals: A Nationwide Benchmark Study. *Waste Management & Research*. 44, Nr. 6. https://doi.org/10.1177/0734242X251405987.

Vielsack, Anton, Jim Magiera, Simon Eberle, u. a. 2026. „Infectious Medical Waste Characterization Using X-Ray Transmission with Machine Learning“. *Waste Management* 217 (Mai): 115513. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2026.115513.

Zecha, Franziska. 2026. *Transparente Stoffströme medizinischer Einwegprodukte im Krankenhaus – Grundlage für ökologische Optimierung und Kreislaufwirtschaft*. (Innsbruck; Pforzheim), 15. DGAW-Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft am 24. und 25. Februar 2026 an der Hochschule Pforzheim, 331–35. https://doi.org/10.15203/99106-187-8.

KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky
E-Mail joerg.woidasky@hs-pforzheim.de
Tel. +49 (0) 7231 28-6489
Direktor - Forschungsstelle Kreislaufwirtschaft im Gesundheitswesen
Institut für Industrial Ecology (INEC)
Hochschule Pforzheim

Ein neues Bauteil aus alten Rotorblättern - Geht das?
Bauteilrecycling von Windkraftrotorblättern

Ina-Marie Orawiec[1], Lina-Sophie Achilles[2], Matthias Oppe[3] & Andreas Büter[4]
[1)] OX2architekten gmbh, Aachen, Deutschland
[2)] Hochschule Darmstadt, Fachbereich für Bau- und Umweltingenieurwesen, Darmstadt, Deutschland
[3)] knippershelbig, Stuttgart, Deutschland
[4)] Hochschule Darmstadt, Fachbereich für Maschinenbau und Kunststofftechnik, Darmstadt, Deutschland

KURZFASSUNG: Mit dem Forschungsprojekt „power*stage, inspiriert von rethink*rotor“ soll der Nachweis erbracht werden, dass die Wiederverwendung ausgedienter Rotorblätter von Windenergieanlagen zur Überdachung einer Freilichtbühne eine Weiternutzung der produktgebundenen „Ingenieur:innen-Kunst“ und des Materials im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft darstellt. Dieser neuartige und bisher unerforschte Ansatz ist notwendig, da die Verwertung von GFK-Großbauteilen aufgrund gesetzlicher Vorgaben, die sich auf lineare Wirtschaftskonzepte beziehen, bisher keine Alternative zur Entsorgung (z. B. thermische Verwertung) vorsieht.
Die Stromversorgung soll über Solarsegel und in die Rotorblätter eingebrachte, recycelte Fahrzeug-Akkus der Firma Voltfang autark sichergestellt werden.
Im Zentrum steht die Frage, ob durch konstruktive Wiederverwendung von Rotorblättern, den Einsatz von Second-Life-Energiespeicher und energieautarke Konzepte ökologische Belastungen der Bau- und Veranstaltungsbranche messbar reduziert werden können. Die Fragestellung wird mithilfe von Methoden der Ökobilanzierung untersucht. Dabei stehen insbesondere die Entwicklung geeigneter Ziel- und Untersuchungsrahmen, Referenzsysteme und Vergleichsszenarien für die Bewertung von Rotorblatt-Reuse-Konzepten im Fokus. Gleichzeitig wird geprüft, inwiefern solche Lösungen auf andere Standorte übertragbar sind und als Impulsgeber für nachhaltige Veranstaltungskonzepte, die Akzeptanz der Energiewende und regionalen Strukturwandel wirken können. Eine weitere wichtige Fragestellung die sich bei der Realisierung ergibt ist: Wie kann bei einem Rotorblatt-re-use sichergestellt werden, dass die „Powerstage“ allen Festigkeitsanforderungen genügt?

1 DIE “POWER*STAGE” DESIGN UND ANFORDERUNGEN

*1.1 power*stage - circular by design*

Im Forschungsprojekt „power*stage“ inspiriert von „rethink*rotor“, soll nachgewiesen werden, dass ausgediente Rotorblätter von Windenergieanlagen beispielsweise zur Überdachung einer Freilichtbühne hochwertig umgenutzt werden können. Die neue Anwendung zielt nicht nur auf den Erhalt des Faser-Kunststoff-Verbundes, sondern vor allem auf die im Bauteil gebundene ingenieurtechnische Leistung. Am Beispiel der „power*stage“ wird die Leistungsfähigkeit des technischen Objektes in Form von Material, Konstruktion und Wissen in einer neuen Anwendung im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft nachgewiesen. Dieser neuartige und bislang kaum erforschte Ansatz ist notwendig, da für GFK-Großbauteile derzeit nur eingeschränkte Verwertungswege bestehen und die geltenden Rahmenbedingungen überwiegend auf lineare Nutzungskonzepte ausgerichtet sind. Die Stromversorgung der Freilichtbühne soll autark über Solarsegel sowie in die Rotorblätter integrierte, wiederverwendete Traktionsbatterien aus Elektrofahrzeugen (Voltfang GmbH) erfolgen. Abbildung 1 zeigt den Entwurf der Freilichtbühne „power*stage“ Die tragenden Dachbalken, wie auch die Stützen, sind durch Rotorblätter realisiert. Die Integration der wiederverwendete Traktionsbatterien aus Elektrofahrzeugen (Powerpacks) für den autarken Bühnenbetrieb ist in den Wurzelbereich der Rotorblätter vorgesehen.

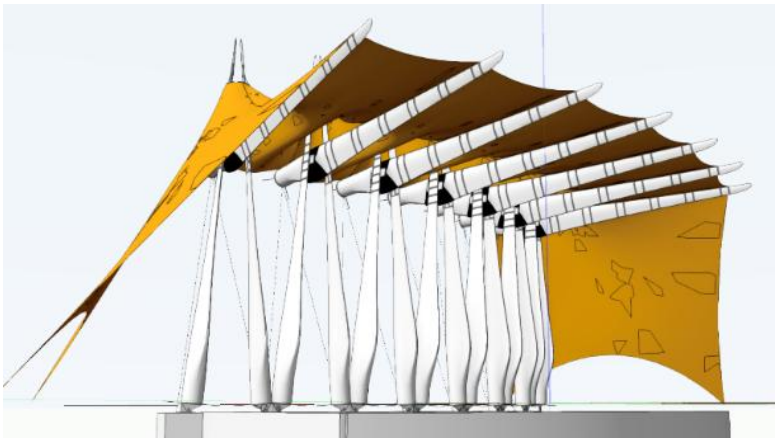


Abb. 1: Die „power*stage“ bestehend aus 21 Rotorblättern

1.2 Anforderungen aus Sicht der Nachhaltigkeit

Die Wiederverwendung ausgedienter Rotorblätter als tragende Elemente einer Veranstaltungsbühne wird im Projekt „power*stage“ als potenzieller Beitrag zur Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft verstanden. Die ökologische Vorteilhaftigkeit eines solchen Ansatzes lässt sich jedoch nicht allein aus der Materialwiederverwendung ableiten. Vielmehr hängt sie von einer Vielzahl ökologischer, sozialer, funktionaler und gestalterischer Anforderungen ab, die sowohl das Bauwerk selbst als auch dessen Nutzungskontext betreffen. Aus diesem Grund wurde die Entwicklung der „power*stage“ von Beginn an durch Nachhaltigkeitsüberlegungen begleitet und ein projektbezogener Kriterienrahmen entwickelt. Ausgangspunkt bildete die Analyse bestehender Leitfäden, Zertifizierungssysteme (wie z.B. „*blauer Engel*“) und Best-Practice-Beispiele für nachhaltige Veranstaltungen. Die identifizierten Kriterien wurden zu einem ersten Bewertungskatalog zusammengeführt und anhand ausgewählter Musikfestivals unterschiedlicher Größe und Ausrichtung überprüft, ergänzt und weiterentwickelt. Ziel war es, relevante Nachhaltigkeitsanforderungen für Veranstaltungen, Veranstaltungsorte und Veranstaltungsinfrastrukturen zu identifizieren sowie daraus Anforderungen für die Entwicklung der power*stage abzuleiten. Die Analyse zeigte, dass nachhaltige Veranstaltungen nicht ausschließlich durch ökologische Kriterien geprägt werden. Neben Aspekten wie Mobilität, Energieversorgung, Beschaffung, Catering oder Abfallmanagement spielen auch soziale Fragestellungen, Barrierefreiheit, Bildungsarbeit sowie die Einbindung in regionale und gesellschaftliche Kontexte eine wichtige Rolle. Die daraus abgeleiteten Anforderungen bilden die Grundlage für die weitere Entwicklung des Projekts.
Für die power*stage wurden die Anforderungen schrittweise konkretisiert und auf die besonderen Rahmenbedingungen eines Bauwerks aus wiederverwendeten Rotorblättern übertragen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die funktionale Nutzung der Rotorblätter innerhalb des Tragwerkskonzepts, die Minimierung zusätzlicher Materialbedarfe, die Rückbaubarkeit der Konstruktion sowie die langfristige Nutzungsflexibilität. Gleichzeitig soll die Wiederverwendung der Rotorblätter für Besucherinnen und Besucher sichtbar werden und zur Vermittlung von Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung beitragen. Im weiteren Projektverlauf werden diese Anforderungen gemeinsam mit den beteiligten Fachdisziplinen um konstruktive, funktionale und gestalterische Aspekte ergänzt und weiterentwickelt.
Darüber hinaus wurden Anforderungen an potenzielle Standorte entwickelt. Berücksichtigt werden dabei unter anderem die Erreichbarkeit, die langfristige Nutzbarkeit, die Einbindung in bestehende kulturelle und gesellschaftliche Strukturen sowie potenzielle Beiträge zum Strukturwandel im Rheinischen Revier. Die Nachhaltigkeitsanforderungen werden somit nicht isoliert für das Bauwerk selbst, sondern für das Zusammenspiel von Bauwerk, Standort und Nutzungskontext entwickelt.

1.3 Mechanische Anforderungen an die Powerstage

Basierend auf dem in Bild 1 dargestellten Entwurf ist im Betrieb der „power*stage“ im Wesentlichen mit dem Eigengewicht und mit den Gewichtskräften der integrierten Akkus zu rechnen. Diese müssen mit und Wind-, Schneelasten überlagert werden. Die veränderlichen Lasten (hier Wind- und Schneelast) sind für den Aufstellungsort individuell festzulegen. Sie enthalten neben vorwiegend statischen Lasten und sind normativ geregelt. Eine wichtige Fragestellung, die sich bei der Realisierung ergibt ist: Wie kann bei einem Rotorblatt durch das *re-use* sichergestellt werden, dass die „Powerstage“ allen Festigkeitsanforderungen genügt? Die Weiterverwendung von gebrauchten Rotorblättern im Anwendungsbereich des Hochbaus erfordert eine strukturierte Vorgehensweise bei der Klassifizierung. Ein klar definiertes Ablaufdiagramm ist eine wichtige Hilfestellung für die Planung sowie bei der Antragsstellung/ Erteilung eines Ver- bzw. Anwendbarkeitsnachweises für die Weiterverwendung gebrauchter Rotorblätter im Hochbau in Form einer Zustimmung im Einzelfall kombiniert mit einer vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung.

2 ENTWICKLUNG EINES NACHALTIGKEITSBEWERTUNGSANSATZES FÜR DIE POWER*STAGE

2.1 Entwicklung und Anwendung des Bewertungsansatzes

Die in Abschnitt 1.2 beschriebenen Anforderungen wurden im weiteren Projektverlauf in einen projektbegleitenden Bewertungsansatz überführt. Ziel war es, Nachhaltigkeitsaspekte systematisch in die Entwicklung der power*stage einzubinden und Entscheidungsprozesse innerhalb des interdisziplinären Projektteams zu unterstützen.
Hierzu wurden die entwickelten Kriterien in Form einer multikriteriellen Entscheidungshilfe zusammengeführt und auf verschiedene Entwurfsvarianten angewendet. Berücksichtigt wurden unter anderem der Materialeinsatz, die funktionale Nutzung der Rotorblätter, die Rückbaubarkeit der Konstruktion, die Nutzungsflexibilität sowie die Sichtbarkeit der Wiederverwendung im Gesamtkonzept. Die Bewertung erfolgte iterativ und wurde im Projektverlauf mehrfach angepasst, da sowohl die Anforderungen als auch die Entwürfe kontinuierlich weiterentwickelt wurden. Die Ergebnisse dienten dabei nicht als alleinige Entscheidungsgrundlage, sondern unterstützten die fachübergreifenden Diskussionen innerhalb des Projektteams. Im Verlauf des Projekts wurde eine Vorzugsvariante identifiziert, die die unterschiedlichen Anforderungen besonders ausgewogen vereinte. Parallel hierzu wurden die entwickelten Nachhaltigkeitsanforderungen auf potenzielle Standorte im Rheinischen Revier angewendet. Hierfür wurde eine strukturierte Eignungsprüfung entwickelt, welche ökologische, soziale und funktionale Kriterien berücksichtigt. Die Ergebnisse dienten der Identifikation geeigneter Standorte für die weitere Projektentwicklung und ermöglichten gleichzeitig eine frühzeitige Berücksichtigung standortspezifischer Anforderungen.

2.2 Entwicklung eines ökobilanziellen Untersuchungsrahmens

Die Arbeiten zur Ökobilanzierung begleiteten die Entwicklung der power*stage von Beginn an als Teil der Nachhaltigkeitsbewertung. Dabei orientierten sie sich an den Grundprinzipien der Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044. Aufgrund des frühen Projektstadiums sowie des innovativen Charakters des Vorhabens standen zunächst Fragestellungen des Ziel- und Untersuchungsrahmens, geeignete Referenzsysteme sowie die Identifikation relevanter Einflussgrößen im Vordergrund. Dabei zeigte sich früh, dass die Entwicklung eines geeigneten Untersuchungsrahmens für die ökobilanzielle Einordnung eines neuartigen Rotorblatt-Reuse-Konzepts selbst eine zentrale Forschungsaufgabe darstellt.
Im Zuge der ökobilanziellen Begleitung des Projekts wurden unterschiedliche Ansätze zur Festlegung von Systemgrenzen, Referenzsystemen und Vergleichsszenarien diskutiert und weiterentwickelt. Erste Vergleiche mit einer mobilen Veranstaltungsbühne dienten dabei als Orientierungsmaßstab für die Diskussion möglicher Referenzsysteme. Gleichzeitig wurden die

wesentlichen Einflussgrößen entlang des Lebenswegs der Bühne untersucht, Materialentscheidungen kritisch hinterfragt und potenzielle Hotspots frühzeitig sichtbar gemacht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse dienten als Grundlage für die weitere Entwicklung des Bewertungsansatzes und die ökobilanzielle Begleitung der Entwurfsentwicklung.

2.3 Erste Erkenntnisse und Herausforderungen

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass insbesondere Fundamente, stählerne Tragwerkskomponenten und Membranmaterialien einen relevanten Einfluss auf die Umweltwirkungen der Bühne haben können. Gleichzeitig wird deutlich, dass die funktionale Einbindung der Rotorblätter in das Tragwerkskonzept eine zentrale Voraussetzung darstellt, um den Ressourceneinsatz für zusätzliche Bauteile möglichst gering zu halten. Daraus ergeben sich besondere Anforderungen an die Auswahl geeigneter Rotorblätter. Ziel des Projekts ist die Nutzung von Rotorblättern, für die derzeit nur begrenzte Weiternutzungsoptionen bestehen und die andernfalls überwiegend thermischen Verwertungswegen zugeführt würden. Gleichzeitig müssen die eingesetzten Bauteile eine Vielzahl konstruktiver, funktionaler und gestalterischer Anforderungen erfüllen. Hierzu zählen unter anderem geometrische Eigenschaften, Tragfähigkeit, Zustand und Eignung für die vorgesehene Nutzung innerhalb des Tragwerkskonzepts. Die bisherigen Arbeiten zur Ökobilanzierung verdeutlichen zudem, dass Informationen zu Materialzusammensetzung, Aufbau, Nutzungshistorie und zukünftiger Verfügbarkeit häufig nur eingeschränkt vorliegen. Dies erschwert sowohl die ökobilanzielle Bewertung als auch die Auswahl geeigneter Rotorblätter. Darüber hinaus zeigen die bisherigen Ergebnisse, dass die Nachhaltigkeitsbewertung nicht ausschließlich der nachträglichen Bewertung eines fertigen Entwurfs dient, sondern bereits während der Konzept- und Planungsphase wichtige Hinweise für die weitere Entwicklung des Bauwerks liefern kann. Die bisherigen Arbeiten unterstreichen damit die Notwendigkeit, ökologische Fragestellungen frühzeitig und parallel zur technischen Entwicklung des Bauwerks in den Entwurfsprozess einzubinden. Neben den Anforderungen aus Sicht der Nachhaltigkeit stellt die technische Qualifizierung der Rotorblätter eine weitere zentrale Voraussetzung für deren sichere und langfristige Weiterverwendung im Bauwesen dar.

3 HERAUSFORDERUNG BEI DER WEITERNUTZUNG VON ROTORBLÄTTERN IN ANDEREN ANWENDUNGEN

Eine wichtige Fragestellung die sich bei der Realisierung einer „power*stage“ ergibt, ist: Wie kann bei der Nutzung von Rotorblättern in einer neuen Anwendung sichergestellt werden, dass die „power*stage“ allen Festigkeitsanforderungen genügt? Der *Bauteil re-purpose* erfordert daher eigentlich die mechanische Charakterisierung weiterverwendeter Composite. Da jedes Rotorblatt seine eigene Belastungshistorie hat, gelten die Ergebnisse einer zerstörenden Prüfung eigentlich nur für das betrachtete Rotorblatt. Auf Basis der Betriebsfestigkeit von faserverstärkten Kunststoffen und deren Versagensverhaltens soll hier beginnend von der Bauteilebene ein erstes Konzept vorgestellt werden, welches es ermöglicht alte Rotorblätter oder FRP im Hinblick auf eine Weiterverwendung hin zu qualifizieren.

3.1 Lasten und mögliche Schäden aus dem ersten Leben

Rotorblätter von Windkraftanlagen erfahren im Einsatz verschiedene Belastungen. Neben den Umweltlasten z.B. durch UV-Strahlung, Feuchtigkeit und Temperatur können auch Impactlasten (Vogelschlag, Eis, ...) eine Rolle spielen. Die zyklischen Lasten aus dem Betrieb und Sonderlasten (z.B. durch die 50 Jahres Boe) sind die dimensionierenden Lastfälle, wobei hier die 50-Jahres Boe (je nach Aufstellungsort zwischen: 83 - 137 km/h) der dominierende Lastfall ist. Während die Umweltlasten im Wesentlichen zu einer Alterung der Kunststoffmatrix führen (z.B. zu Versprödung), können Impacts lokale Schädigungen, wie Delaminationen, erzeugen, die in druckbeanspruchten Bereichen kritisch werden können, da sie die Beulstabilität des Laminats

reduzieren. Die Impactschäden lassen sich je nach Größe visuell oder mit zerstörungsfreien Prüfverfahren ZFP (z.B. LogIn Thermographie, Ultraschall, …) identifizieren.
Bei multiaxial verstärkten Faserverbunden können z.B. zyklische Lasten nach Lastniveau und Zyklenzahl in hoch beanspruchten Bereichen zu Zwischenfaserbrüchen führen. Die Zwischenfaserbrüche bewirken ab einer gewissen Schadensdichte Delaminationen. Das Versagen des Laminates entsteht dann final durch Faserbrüche. Die Steifigkeit eines Laminates wird sich daher über die Lebensdauer (Zyklenzahl) reduzieren. Der Steifigkeitsverlust bis zum Versagen hängt wesentlich von Laminataufbau ab. Die Auslegung der Rotorblätter sieht vor, dass es im Betrieb zu keiner Schädigung kommt. Hierfür werden umfangreiche Versuche an Material, bauteilähnlichen Proben und sogar an ganzen Rotorblättern gemacht. Die im Betrieb entstehenden Dehnungsniveaus im Material sind daher eher gering. Auch der während der Betriebszeit eintretende lokale und globale Steifigkeitsverlust sollte eher klein sein. Globale und lokale Steifigkeitsänderungen stellen somit ein Indiz für Schädigungen dar.

3.2 Versagensverhalten und Damage Toleranz von Faserverbunden

Die in 2.1. dargestellten, unter Umständen im Bauteil nur lokal auftretenden Steifigkeitsverluste, führen im Bauteil, gerade bei zyklischen Beanspruchungen mit geringem Dehnungsniveau, in der Regel zu Beanspruchungsumverlagerungen im Material. Für einen gut konstruierten Faserkunststoffverbund sind sie somit nicht unbedingt kritisch, da der Effekt der Beanspruchungsumverlagerung eine Schadenstoleranz bewirkt und damit z.B. auch die statische Restfestigkeit erhöhen kann. Diese Schadenstoleranz der FRP, wie sie auch z.B. der Certification Specification von Hubschraubern CS27 und CS29 zugrunde liegt, ist hierfür ein wesentlicher Schlüssel.
Tritt ein Steifigkeitsverlust auf, hängt er in Größe und Art stark vom Schichtaufbau des FRP Bauteils ab. Eine Schadensentstehung und deren Wachstum wird durch die Sonder- und Betriebslasten bedingt, die das Bauteil im ersten Leben ertragen musste. Für eine Bewertung ist es daher wichtig, welche Belastungen das Rotorblatt in der Primäranwendung (im ersten Leben) ausgesetzt war. Da die aber in der Regel nicht bekannt ist, lässt sich der Materialzustand realistisch nur durch die chemische Materialalterung und die entstandene innere Schädigung (Zwischenfaserbrüche und Delaminationen) abschätzen. Jetzt ist eine unsichtbare Schädigung per se noch nicht kritisch. Kritisch wird sie erst dann, wenn sie unter der neuen Belastung zu einem Versagen führt. Die Schadenstoleranz fordert: Die katastrophale Auswirkung eines Primärschadens (Anrisse, Delamination, …) soll vermieden werden. Ein Teilschaden darf sich nicht zur Katastrophe auswachsen! d.h. a) Tragfähigkeit darf bei partieller Schädigung nicht verloren gehen. b) Der Schädigungsprozess muss aufzuhalten oder wenigstens kontrollierbar (stabil) sein. Zusammenfassend lässt sich feststellen: Sichtbare Schäden sind nicht tolerierbar, unsichtbare Schäden sind dann tolerierbar, wenn sie im experimentellen Nachweisversuch berücksichtigt wurden. Hierbei muss gezeigt werden, dass die geringste mögliche Restfestigkeit der sicheren Last entspricht. (Schadenstoleranz) und Dimensionierend ist hierbei immer der Schaden, der mit den verwendeten ZFP-Methoden gerade erkannt werden kann. Diese Schädigung definiert den anzusetzenden Ausgangszustand für den Nachweisversuch.

4 KONZEPT ZUR BEWERTUNG ALTER ROTORBLÄTTER

Es gibt zwei wichtigen Fragengruppen, die für eine erfolgreiche Umnutzung beantwortet werden müssen:
*Wie ist der Zustand bzw. Alterungszustand des Rotorblattes? D.h. g*ibt es sichtbare/unsichtbare Schädigungen? *bzw.* Wo und wie groß sind sie? usw. Die Untersuchung sollte zerstörungsfrei erfolgen. Mit der Zeit werden sich typische Schadensbilder herausbilden, die den Einsatz KI-gestützter Verfahren ermöglichen und dazu beitragen können, die nächste zentrale Fragengruppe zu beantworten.
Kann das 20 Jahre alte Rotorblatt die Lasten, die bei der neuen Anwendung entstehen, noch tragen? Bzw. Wie schadenstolerant ist es?

Um die Festigkeit 20 Jahre alter Rotorblätter zu bewerten, ist der klassische Weg, Proben aus dem Rotorblatt zu schneiden und mechanisch zu untersuchen. Ob Zugversuch oder Schwingfestigkeitsversuche durchgeführt werden, hängt von der neuen Anwendung ab. Für die Bemessung sind neben dem E-Modul insbesondere die Bruchdehnungen von Interesse. Werden derartige Versuche an Proben durchgeführt, die einer geschädigten Stelle entnommen wurden, können den typischen Schadensbildern Festigkeiten/Steifigkeiten zugeordnet werden. Liegen genügend Daten vor, kann hier im Weiteren eine KI zur Bewertung von Schädigungen hilfreich sein. Diese Untersuchungen sind zerstörend, d.h. das untersuchte Rotorblatt kann nicht weiterverwendet werden. Nichtsdestotrotz sind derartige Untersuchungen notwendig. Unter der Annahme, dass das nunmehr als Bauteil im Hochbau eingesetzte Rotorblatt schadenstolerant ist, besteht neben dem klassischen Weg auch die Möglichkeit, über einen statischen Biegeversuch die Nutzbarkeit der alten Rotorblätter nachzuweisen. Voraussetzung hierfür ist eine hauptsächlich statische Belastung in der neuen Anwendung. Für die Powerstage bedeutet das, dass jedes Rotorblatt z.B. in einen Prüfstand im Einbauzustand eingebracht wird. Mit Zusatzgewichten werden die maximal zu erwartenden Lasten mit einer Sicherheit eingebracht. Treten lokale Schädigungen, im Vergleich größere Verformungen oder hohe lokale Dehnungen auf, sind die Blätter zu verwerfen. Zulässige Werte für Dehnung und Verformung sind im Vorfeld zu ermitteln. Über in die „power*stage“ eingebrachte Dehnungs- und Verformungssensoren kann zusätzliche Sicherheit erzeugt werden, da so die Dehnung an besonders hochbelasteten Stellen überwacht werden kann.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Ein 2nd Life von Rotorblättern ist möglich, wenn der Zustand und die Eigenschaften der „alten“ Rotorblätter bekannt sind, wenn die kritischen Lasten und die Versagensformen der neuen Anwendung bekannt sind (das Lastniveau der ehemals als Rotorflügel eingesetzter Bauteile sollte geringer sein, als das der ursprünglichen Anwendung), wenn das Entwurfsprinzip an die neue Anwendung angepasst wird (z.B. durch Verwendung einer geringeren zulässigen Dehnung) und wenn an einem Muster Schadenstoleranz nachgewiesen wurde.
Zusätzliche Sicherheit schaffen: eine KI gestützte Bewertung (auf Erfahrungen lernen), die Definition regelmäßiger Inspektionen (ZFP) an besonders gefährdeten Stellen und/oder ein On-line“ Health-Monitoring System (Dehnungs- u/o Verformungsmessung)

DANKSAGUNG

Besonderen Dank gilt allen Partnern (OX2architekten GmbH, Aachen - Konsortialführung; Hochschule Darmstadt, Jakobshof - Südstadtkultur e.V. Aachen; Voltfang GmbH, Aachen; Stadt Bedburg; Stadt Elsdorf), den vielen Mitwirkenden der verschiedenen Fachbereiche, die mit Ihrer Arbeit das Projekt unterstützt und weitergebracht haben. Besonderen Dank gilt der EU und dem Land NRW, die das Forschungsprojekt „power*stage“ inspiriert von „rethink*rotor“ möglich gemacht haben. Das Projekt wird durch die Europäische Union und das Land Nordrhein-Westfalen im Rahmen des EFRE/JTF-Programms NRW 2021-2027 unterstützt.

Zehn Jahre Social Urban Mining mit BauKarussell – reale Wirkungen, Schlussfolgerungen und Learnings

Markus Meissner[1], Thomas Romm[2], Sonja Zumpfe[3], Andreea Crudici[2] & Jasmin Bermadinger[3]
[1)] Österreichisches Ökologie-Institut, Wien, Österreich
[2)] Romm ZT, Wien, Österreich
[3)] BauKarussell e.Gen., Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Social Urban Mining verbindet selektiven Rückbau mit sozialwirtschaftlicher Arbeit und adressiert zentrale Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft im Bausektor. Die Analyse von zehn durchgeführten Rückbau-Projekten zeigt, dass im Durchschnitt über 100.000 kg Materialien pro Gebäude entfernt und davon große Mengen wiederverwendet oder für ein hochwertiges Recycling bereitgestellt werden. Sozialwirtschaftliche Einrichtungen leisten dabei rund 2.800 Arbeitsstunden pro Projekt und binden durchschnittlich 16 Personen ein. Ökonomisch bilanziert Social Urban Mining durchwegs positiv für Auftraggeber:innen, es können sogar im Mittel 56 % der Kosten durch Erlöse aus werthaltigen Materialien und Re-Use direkt gedeckt werden. Die Schlussfolgerungen betonen, dass Social Urban Mining ökologische Vorteile durch sortenreine Trennung, hohe Wiederverwendungsquoten und vermiedene Entsorgung erzielt. Wirtschaftlich entsteht ein Mehrwert von etwa 1,5 €/m² BGF, während Re-Use-Erlöse häufig die Kosten übersteigen. Sozial wirkt das Konzept durch Qualifizierung und Beschäftigung benachteiligter Menschen sowie durch die Stärkung lokaler Re-Use-Märkte. Insgesamt schafft Social Urban Mining materielle und immaterielle Mehrwerte, reduziert Transporte, beschleunigt Rückbauprozesse und fördert ein breiteres Bewusstsein für Kreislaufwirtschaft.

1 HINTERGRUND

Der Bausektor ist einer der wesentlichen Wirtschaftsbereiche, die für eine Transformation in Richtung Kreislaufwirtschaft adressiert werden müssen. Bauen findet sich in unterschiedlichsten Strategiepapieren als relevantes Handlungsfeld, als Transformationsschwerpunkt o.ä. wieder. (EU COM 2019; BMK 2022, 2023b; Wirtschaftsagentur Wien 2024; Magistrat der Stadt Wien 2025). Verständlich, denn das Gesamtabfallaufkommen lag im Jahr 2023 bei rd. 67,2 Mio. t und 16% davon, also 8,4 Mio. t, waren Bau- und Abbruchabfälle (BMLUK 2025). Bauen ist auch eines der sieben Handlungsfelder im Bundesabfallvermeidungsprogramm (BMK 2023a, S. 21). Der Bundesabfallwirtschaftsplan nennt Urban Mining als Konzept, um primär die Wertstoffe in Infrastrukturen zu identifizieren. Erst dann können diese gezielt nach Nutzungsende dem Wirtschaftskreislauf wieder zugeführt werden (BMK 2023b, S. 374). Die Recycling-Baustoff Verordnung (RBV 2016) ist mit Ihren Bestimmungen und der begleitenden Norm zum verwertungsorientierenden Rückbau (ON B 3151) europaweit richtungsweisend hinsichtlich Erkundung und Vorab-Planung. Gleichzeitig formulieren wir den Anspruch den absoluten Ressourcenbedarf zu reduzieren. Als Indikatoren stehen der Material-Fußabdruck und der inländische Materialverbrauch (DMC) im Zentrum (BMK 2022).

Österreich hat auch erkannt, dass sozialwirtschaftliche Einrichtungen in dieser Transformation eine wichtige Rolle spielen können. Im Bereich der Wiederverwendung von Haushaltsprodukten bilden sich Netzwerke und Beteilige handeln als kompetente Abfallwirtschaftsakteure (vgl. Meissner 2021). Weitere Organisationen bieten Service im Bereich Bauen an, von der Baustellenendreinigung bis zu Baumeisterleistungen. Dazu tragen ganz wesentlich sozialwirtschaftliche Einrichtungen bei, die Wiederverwendung mit Arbeitsmarktintegration, niederschwelliger Qualifizierung und geförderter Beschäftigung benachteiligter Menschen verbinden. Auch im EU-

Aktionsplan zur Kreislaufwirtschaft wird die Pionierrolle der Sozialwirtschaft bei der Transformation und bei der Schaffung und Qualifizierung von Green Jobs hervorgehoben (BMK 2022).

Im Jahr 2016 verdichteten die pulswerk GmbH, Romm ZT und Re-Use Austria ihre Überlegungen um die Phase des Rückbaus von Gebäuden im Sinne kreislaufwirtschaftlicher Ansprüche zu aktivieren. Mit dem Konzept Social Urban Mining verbinden sie die Potentiale der Urbanen Mine „Gebäude“ mit den Leistungen und Zielen von sozialwirtschaftlichen Einrichtungen. Seit 2022 macht die Genossenschaft BauKarussell vorhandene Potenziale von Gebäuden sichtbar und schafft Wertschöpfung im Sinne der Kreislaufwirtschaft. Dabei agiert die Genossenschaft mit seinen Partnern als Fachplaner zur Analyse und Verortung der Gebäudewerte sowie als operativer Rückbauer nach ON B 3151 (Schad- und Störstoffentfrachtung) mit dem Ziel der höchstmöglichen Wiederverwendung bzw. -verwertung der im Gebäude vorhandenen Komponenten und Bauteile. Die arbeitsintensive manuelle Demontage von Bauteilen birgt ein erhebliches Qualifizierungs- und Beschäftigungspotenzial und schafft die Möglichkeit für Menschen, in diesem Bereich beruflich neu Fuß zu fassen. Werte der urbanen Mine werden dem jeweiligen Auftraggeber offengelegt und gutgeschrieben. (vgl. Meissner et al. 2017, 2018, 2021a, 2021b, 2022; Schanda 2021; Schanda et al. 2022; Bermadinger 2025; Zumpfe und Meissner 2026; Romm und Kasper 2018; Romm 2018). Seit 2016 wurden mehr als 30 Social Urban Mining Konzepte für private, gemeinnützige und öffentlichen Auftraggeber erarbeitet und danach im Auftrag der jeweiligen Bauherr:innen umgesetzt. Nach zehn Jahren Entwicklung ist zu erwarten, dass die angepeilten ökologischen, sozialen und ökonomischen Wirkungen sichtbar werden. Dieser Artikel widmet sich der Frage dieser Wirkungen.

2 METHODE

Die Zusammenschau vorhandener Projektunterlagen ergibt, dass zehn Projekte inhaltlich und datentechnisch als repräsentativ für das Konzept angesehen werden können. Social Urban Mining ist ein flexibles Konzept, welches sich an die Gegebenheiten der jeweiligen Rückbau-/Sanierungsvorhaben anpassen lässt. Auf Basis von Leistungsportfolios, Projektumfängen und Datenverfügbarkeit beziehen die Autor:innen zehn Projekte in die Analyse ein. Als Datenquellen werden Mengenaufzeichnungen, Zeitaufzeichnungen, Wiegescheine, Rechnungen, Angebote, Planunterlagen, Schad- und Störstofferkundungen oder Stückzahlangaben herangezogen.

In Schritt eins wurden diese Datensätze aus drei Sichtweisen betrachtet:
Die **Ressourcensicht** spiegeln folgende Angaben wider:

- Masse der aus den Gebäuden entfernten Abfälle indem abbruchvorbereitende Gewerke ausgeführt wurden.
- Masse der aus den Gebäuden entfernten werthaltigen Abfallfraktionen wie Aluminium, Bleiakkumulatoren, Eisenschrott, Kupfer, Messing etc.
- Masse an in die Wiederverwendung vermittelten gebrauchten Produkte.
- Masse der in Summe aus den Gebäuden entfernten Ressourcen.

Die **sozialen Wirkungen** werden anhand folgender Indikatoren betrachtet:

- Operative Arbeitsleistung der sozialwirtschaftlichen Partnerorganisationen.
- Anzahl an Personen, die Teilqualifizierung und Beschäftigung erhalten.

Auf **ökonomischer Ebene** zeigen sich diese Faktoren:

- Anteil des Projektvolumens, welches durch die Urban Mine finanziert werden kann.
- Der Mehrwert aus dem Verkauf sehr sortenrein getrennter, werthaltiger Abfallfraktionen.
- Der Mehrwert aus dem Verkauf von Re-Use Produkten in Bezug zum finanziellen Aufwand für die Durchführung.

Diese Sichtweisen beschreiben die Wirkungen jener Projekte, die Social Urban Mining in ihre Projektentwicklung einbezogen haben. Potenzielle Auftraggeber:innen vergleichen im Zuge ihrer Entscheidungsfindung das alternative Vorhaben Social Urban Mining mit ihrem üblichen Vorgehen, also einem dzt. regelkonformen verwertungsorientierten Sanierungsvorhaben oder Rückbau durch eine von ihnen beauftragtes Bau- oder Abbruchunternehmen inkl. einer umweltgerechten Entsorgung. Auf Grundlage vorliegender Projektdaten und entsprechender Annahmen wird dieser Vergleich für die ausgewählten zehn Projekte nachgerechnet. Dabei werden drei Aspekte beobachtet: **Mehrwert durch die intensive Bewirtschaftung von werthaltigen Abfallfraktionen**: Die operative Arbeit erfolgt manuell, oder mittels Handwerkzeugen. Es ist daher möglich und gewünscht, dass eine hohe Sortiertiefe direkt vor Ort erzielt wird. Durch dieses Vorgehen steigen die spez. Preise der jeweiligen Fraktionen. Der Vergleich erfolgt anhand von spez. Tonnenpreisen für den Verkauf einer Materialfraktion zum jeweiligen Zeitpunkt des Projektes. **Mehrwert durch Re-Use-Vermittlung**: Für die entsprechenden Massen entfallen Entsorgungs- und Transportkosten. Für diesen Vergleich ziehen wir Annahmen für einen spezifischen Tonnenpreis und Transportpauschalen pro Mulde heran. **Mehrwert durch Rückbau-leistungen**: Die Umsetzung von Social Urban Mining entfernt durch abbruchvorbereitende Arbeiten und Re-Use aus dem Objekt Materialien und Produkte, die anschließend nicht mehr durch nachfolgende Unternehmen zu entfernen sind. Für diesen Mehrwert wird auf die Expertise des Architekturbüros Romm ZT zurückgegriffen. Auf Grundlage jahrelanger Erfahrung in der Ausschreibungsgestaltung werden spezifische Preise für die Entfernung und Entsorgung dieser Massen angenommen und der Mehrwert berechnet. Für den Rückbau einer Tonne Bau-/Abbruchabfälle werden durchschnittliche Kosten angesetzt. Alle Annahmen sind mit Unsicherheiten verbunden und erfolgen daher tendenziell konservativ.

3 ERGEBNISSE

Die detaillierten Aufzeichnungen, die im Rahmen der Umsetzung der zehn Social Urban Mining Konzepte erfolgten, erlaubt eine statische Auswertung (siehe dazu Tabelle 1). Die Stichprobengröße mit N=10 ist gering, jedoch erachten es die Autor:innen als notwendig, ökologische, soziale und ökonomische Daten und Wirkungen auf Grundlage realer Projekte in die aktuellen, meist theoretischen Diskussionen zu Kosten und Wirkungen von Kreislaufwirtschaft im Bausektor zu präsentieren. Alle genannten Ergebnisse spiegeln die geringe Stichprobengröße wider: Die Streuungen sind beachtlich und folgen den sehr unterschiedlichen Ausgangssituationen der Projekte, Gebäudetypen, Zustand und Rahmenbedingungen in der Umsetzung.

Alle zehn Projekte bleiben aufgrund von entsprechenden Vereinbarungen ungenannt.

Im Bereich der **ökologischen Wirkung** wurden durch Social Urban Mining im Mittel 101.033 kg Ressourcen aus einem Gebäude entfernt. Das Maximum waren 109.560 kg, das Minimum 33.688 kg. Dieser Wert summiert sich aus drei Anteilen: Im Mittel wurden 40.527 kg Schad- und Störstoffe für eine fachgerechte Entsorgung bereitgestellt. Weitere 27.754 kg werthaltige Materialen wurden an Verwerter weitergegeben sowie 32.759 kg Komponenten in die Wiederverwendung vermittelt. Die Erlöse der letzten beiden Anteile wurden zu 100% den Bauherrn gutgeschrieben und finanzieren die Arbeit des ersten Anteils mit. Die Minimalwirkungen liegen bei 6.515 kg nicht werthaltige Abfälle, 900 kg werthaltige Materialien bzw. 4.165 kg Re-Use Produkte. Die Maximalwerte liegen bei 132.232 kg Entfrachtung, 81.173 kg werthaltige Materialien bzw. 109.560 kg Re-Use Produkte. Als robuster Kennwert gegen Ausreißer weisen wir ausdrücklich auf die Medianwerte hin: Die Mediane liegen bei 26.375 kg Entfrachtung, 23.120 kg werthaltige Materialien bzw. 23.338 kg Re-Use Produkte.

Die **sozialen Wirkungen** basieren auf dem Umstand, dass alle operativen Arbeiten durch sozialwirtschaftliche Einrichtungen abgewickelt wurden. Diese leisteten im Mittel 2.856 Leistungsstunden pro Projekt. Der Umfang liegt zw. dem Minimum von 498 h und einem Maximum von

7.146 h. Der Median liegt mit 2.168 h für diesen Wert nahe am Mittelwert. Zwischen 5 und 44 Personen wurden von den sozialwirtschaftlichen Einrichtungen in die Leistungserbringung eingebunden. Der Mittelwert liegt bei 16 Personen, der Median bei 13 Personen.

Im Sinne der **ökonomischen Wirkungen** werten wir die Zahlen in drei Richtungen aus:
Social Urban Mining zielt auf die Nutzung der vorhandenen Werte von Rückbaugebäuden ab. Setzt man nun realisierte Erlöse aus werthaltigen Materialien und Re-Use ins Verhältnis zu den Auftragsvolumina, so zeigt sich, dass im Mittel 56% der Auftragsvolumina durch die Urbane Mine gegenfinanziert wurde. Dieses Verhältnis streut zw. 14% (Minimum) und 100% (Maximum). Der Median liegt mit 53% nahe am Mittelwert.

Denselben Ansatz kann man für die beiden Leistungen „Bewirtschaftung werthaltiger Materialien" bzw. Re-Use-Vermittlung" durchführen. Können, im Auftrag des Bauherrn, im Zuge von Social Urban Mining werthaltige Materialen aus den Gebäuden entfernt werden, so erfolgt dies manuell und ein einer sehr sortenreinen Form. Werthaltige Materialien werden in einer Vielzahl genau definierter Vorgaben getrennt gesammelt und weitergegeben. Im Vergleich zu einem maschinellen Vorgehen mit Mischfraktionen ermöglicht dies höhere spezifische Tonnenerlöse und damit Mehreinnahmen aus der Urbanen Mine. Im Mittelwert der zehn Projekte liegt dieser Mehrwert bei +26%, im Median bei +30%. Auch hier schwankt der Wert, durch die unterschiedlichen Zustände und Rahmenbedingungen der Projekte, beträchtlich zw. 0% (Minimum) und +67% (Maximum). Wird die Leistung „Re-Use-Vermittlung" abgerufen so stehen den Kosten die Re-Use-Erlöse gegenüber. Im Vergleich zu den investierten Kosten für die Beauftragung liegt der Mehrwert im Mittel bei +138%, im Median bei +45%. Dieser Indikator weist die größten Schwankungen auf: Das Minimum von -82% und das Maximum von +547% zeigen deutlich, wie stark die Erlöse durch den Verkauf von Re-Use Produkten von Gebäudetyp, der Marktsituation, dem aktuellen Zustand und verfügbaren Zeitfenstern abhängen.

Tab.1: Statistische Kennwerte für ökologischen, sozialen und ökonomischen Wirkungen aus zehn umgesetzten Social Urban Mining Projekten im Zeitraum 2019 bis 2026

statistischer Kennwert	Einheit	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum
Masse Gesamt	**[kg/Projekt]**	**101.033**	**78.717**	**33.688**	**176.760**
Masse Abfall	[kg/Projekt]	40.527	26.375	6.515	132.232
Masse werthaltige Materialien	[kg/Projekt]	27.754	23.120	900	81.173
Masse Re-Use Produkte	[kg/Projekt]	32.759	23.338	4.165	109.560
Sozialwirt. Beschäftigung	[h/Projekt]	2.856	2.168	498	7.146
Anzahl an Personen	[PAX/Projekt]	16	13	5	44
Gegenfinanzierung durch Urban Mining	[%]	+56%	+53%	+14%	+100%
Relativer Mehrwert durch Bewirtschaftung der werthaltigen Materialien	[%]	+26%	+30%	0%	+67%
Relativer Mehrwert durch die Leistung der Re-Use Vermittlung	[%]	+138%	+45%	-82%	+547%

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Social Urban Mining ist ein Wertschöpfungskonzept, das materielle und immaterielle Ressourcen mit einem Mehrwert verknüpft. Dies lässt sich auf folgenden Sektoren des Social Urban Minings in der Wirkungsanalyse von 10 Praxisprojekten quantifizieren:

Aus **Ressourcensicht** gesehen entfernt Social Urban Mining im Mittel aus dem Bauwerk im Zuge des Rückbaus mit manueller Arbeit 101.000 kg. 40% davon werden für eine fachgerechte

Verwertung bereitgestellt. 27% sind werthaltige Materialen und 32% Produkte für die Wiederverwendung. Pro Projekt werden absolut im Mittel mehr als 32.000 kg Produkte in Wiederverwendung vermittelt und als Abfall vermieden. Social Urban Mining trennt Materialien sehr fraktionsrein und in so hoher Qualität, dass höhere Erlöse aus werthaltigen Materialien erzielt, Entsorgungskosten reduziert und ein hochwertiges Recycling ermöglicht werden.

Im Zusammenspiel finanziert die Urbane Mine im Mittel 56% der Projektaufwände. Bauteile werden zur Wiederverwendung demontiert und vermittelt. Die Erlöse aus Re-Use übertreffen die Aufwendungen im Mittel um 138%. In Einzelfällen liegen die Erlöse jedoch unter den Aufwendungen. D.h. eine Umsetzung dieser Leistung muss abhängig vom Zustand des Gebäudes und den Rahmenbedingungen für die Vermittlung (Zeit, Zielgruppen) geplant werden. Alle im Projekt realisierten ökonomischen Werte der Urbanen Mine fließen transparent in die Finanzierung der Entfrachtungsarbeiten ein (Open Book).

Bezieht man die Kennwerte auf die Größe der Gebäude in Form der Brutto-Grundfläche BGF, dann zeigt sich, dass Social Urban Mining im Vergleich zum branchenüblichen Vorgehen im Bereich der werthaltigen Materialien ein Potential von +0,6 EUR/m², oder einen Mehrwert von +30% ermöglicht. Die Leistung der Re-Use Vermittlung generiert einen Mehrwert von rund +0,5 EUR/m². Durch die Weitergabe der Re-Use-Produkte werden im Mittel Entsorgungskosten von +0,4 EUR/m² vermieden. Zusammengefasst erlaubt eine Umsetzung aller Aspekte von Social Urban Mining eine Wertschöpfung von +1,5 EUR/m² BGF. Die durchgeführten Entfrachtungsarbeiten können unabhängig von Behördenverfahren oder Ausschreibungszeitplänen unmittelbar nach Absiedelung der Nutzer:innen erfolgen. Der eigentliche Rückbau startet somit in einem bereits teilentfrachteten Gebäude und kann entsprechend schneller vonstattengehen.

Aus **sozialwirtschaftlicher und gesellschaftlicher Sicht** gesehen ermöglichen Social Urban Mining Planungen im Durchschnitt knapp 2.800 Stunden Qualifizierung und Training für regionale Transitarbeitskräfte. Unterstützt werden Langzeit-Arbeitslose auf dem Weg zurück in die Beschäftigung. In Summe waren bereits fast 300 Personen dieser Zielgruppe operativ für BauKarussell tätig. Social Urban Mining aktiviert eine Reihe von lokalen Abnehmer:innen, Unternehmen, die fachgerecht demontieren und durch Beschaffung von Gebrauchtgütern ihre Kaufkraft steigern. Angeboten werden Bauteile, Komponenten und Produkte zu leistbaren Preisen. Dies schafft einen hohen Anreiz zur Wiederverwendung und unterstützt den Marktaufbau für Re-Use-Produkte aus dem Gebäudesektor.

Neben dieser einzigartigen Wertschöpfung durch die direkte Verbindung von Wertstoff- und Re-Use-Erlösen mit Dienstleistungen im vorbereitenden Rückbau, schafft Social Urban Mining **weitere materielle und immaterielle Mehrwerte**, die qualitativ gewichtet werden müssen. Social Urban Mining wirkt durch die Wiederverwendung in die höchste Hierarchiestufe der Abfallwirtschaft. Findet diese direkt am selben Bauplatz werden Abtransporte und Lieferfahrten vermieden und lokal der Verkehr entlastet. Es führt zu sinnstiftender Beschäftigung und Teilqualifizierung für am Arbeitsmarkt benachteiligte. Gleichzeitig liefern Umsetzungsprojekte positive referenzierte Beiträge für in der Öffentlichkeitsarbeit der Auftraggebenden. Social Urban Mining kann ein erhöhtes Bewusstsein schaffen, durch öffentlichkeitswirksame Formate, wie eine Re-Use Box oder Open Mine Days und damit zu positiver „Stimmung“ um ein Projekt beitragen.

Angaben zur Abfallvermeidung sind ein insbesonders für Nicht-Fachleute leicht kommunizierbarer Indikator. Eine vertiefende Auswertung in Richtung Erhöhung der Ressourceneffizienz muss gleichwohl tiefer gehen. Dazu werden in den facheinschlägigen Diskussionen eine Vielzahl verschiedener Indikatoren berechnet, die die Ressourcennutzung in Vorketten, Entsorgung oder im In-/Ausland berücksichtigen (vgl. Wilts et al. 2019; Meissner 2024; BMK 2022). Mittelfristig erscheint es zielführend, dass Aktivitäten wie Social Urban Mining auch anhand derartiger Indikatoren erfasst werden können. Dazu bedarf es einer eindeutigen Festlegung durch die Fachwelt, welche für Analysen auf Projektebene und/oder staatlicher Ebene zum Einsatz kommen sollen.

LITERATURVERZEICHNIS

Bermadinger, Jasmin (2025): Neun Jahre Social Urban Mining. Wie die Bauwende mit der Sozialwirtschaft gelingt. In: Circular Insider Austria 2025, 2025, S. 24.

BMK (2022): Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie. Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft. Hg. v. BMKUEMIT. Wien.

BMK (2023a): Abfallvermeidungsprogramm 2023. Hg. v. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Wien.

BMK (2023b): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023_Teil1. Hg. v. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Wien.

BMLUK (2025): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2025 für das Referenzjahr 2023. Hg. v. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft. Wien.

EU COM (2019): COM (2019) 640 final - The European Green Deal. Hg. v. EU Commission. Brussels.

Magistrat der Stadt Wien (2025): Zirkuläres Wien: Eine runde Sache. Der Wiener Weg der Ressourcenschonung und Kreislaufwirtschaft. Unter Mitarbeit von Mitarbeiter*innen aller Abteilungen des Magistrats sowie der Unternehmungen und Unternehmen der Stadt Wien. Wien.

Meissner, Markus (2021): Sammlung potentiell interessanter Re-Use Netzwerke in Europa. Tln. bei der 20Jahre Konferenz rreuse.

Meissner, Markus (2024): Reduktion des Ressourcenbedarfs im Gesundheitswesen am Beispiel von mehrwegfähigen Medizinprodukten. Dissertation. Universität für Bodenkultur, ABF Wien.

Meissner, Markus; Pladerer, Christian; Neitsch, Matthias; Romm, Thomas (2018): BauKarussell - Social Urban Mining. In: R. Pomberger (Hg.): Recy & DepoTech 2018. Tagungsband zur 14. Recy & DepoTech-Konferenz, 2018, Leoben. Unter Mitarbeit von R. Pomberger. Eigenverlag, Leoben S. 421–426.

Meissner, Markus; Romm, Thomas; Neitsch, Matthias (2021a): Recommendations to support the enhancement of the public perception of the use of secondary raw materials and reuse products. in the frame of the EU-project CONDEREFF Construction & demolition waste management policies for improved resource efficiency. im Auftrag Amt STMk Landesregierung. Vienna.

Meissner, Markus; Romm, Thomas; Neitsch, Matthias; Schanda, Irene; Borszki, Roman (2021b): FAQs: reuse of building components. Hg. v. pulswerk GmbH, Romm ZT und Re-Use Österreich. Vienna.

Meissner, Markus; Romm, Thomas; Neitsch, Matthias; Smith Elisabeth; Pawlowsky, Andreas; Sparer Greta (2017): BauKarussell: Abfallvermeidung im Rückbau. Projektbericht 2016-2017. pulswerk GmbH. Wien.

Meissner, Markus; Romm, Thomas; Schanda, Irene; Borszki, Roman (2022): FAQs zum Re-Use von Gebäudekomponenten. In: Roland Pomberger (Hg.): Recy & DepoTech 2022 - Posterkonferenzband. 16. Recy & DepoTech-Konferenz, 9. bis 11.11.2022, Leoben. Unter Mitarbeit von Roland Pomberger. Leoben: aVW Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft Eigenverlag, S. 111–114.

Recycling-Baustoffverordnung (2016): Verordnung des BMLFUWW, RBV, vom 06.03.2019. Fundstelle: Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich. In: Österr. Nationalrat (Hg.): BGBl. II Nr.181/2015.

Romm, Thomas (2018): Logistik der Kreislaufwirtschaft im urbanen Bauen. Vortrag auf der Fachtagung. Forum Baustelle - Entsorgung und Recycling. imh GmbH. Wien, 26.04.2018.

Romm, Thomas Matthias; Kasper, Thomas (2018): Ökoeffizientes Bauen mit Ressourcen vor Ort. In: A.Hillebrandt, P. Riegler-Floors, A. Rosen und J. Seggewies (Hg.): Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource. 1.Auflage. München: Detail Business Information GmbH (Edition Detail), S. 36–40.

ÖNORM ON B 3151, 2022: Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode.

Schanda, Irene (2021): BauKarussell: Mit Social Urban Mining zu einer nachhaltigen, sozialen und zukunftsfähigen Baubranche. In: Österr Wasser- und Abfallw. DOI: 10.1007/s00506-020-00741-1.

Schanda, Irene; Lechner, Robert; Meissner, Markus (2022): Social Urban Mining: Kreislaufwirtschaft und Beschäftigung im Gebäuderückbau. In: Nachhaltige Technologien, 2022 (02), S. 24–26.

Wilts, Henning; Galinski, Laura; von Gries, Nadia; Saurat, Mathieu; Schinkel, Jennifer; Steger, Sören et al. (2019): Geeignete Maßstäbe und Indikatoren zur Erfolgskontrolle von Abfallvermeidungsmaßnahmen. Texte 79/2019. Hg. v. Umweltbundesamt Deutschland. Dessau-Roßlau (Texte).

Wirtschaftsagentur Wien (2024): Zirkuläres Bauen. Technologie Report. 2. Hg. v. Stadt Wien. Wien.

Zumpfe, Sonja; Meissner, Markus (2026): Urban Mining im Konnex des verwertungsorientierten Rückbaus. In: Huber-Heim, Dittrich und Schönberg (Hg.): Handbuch Kreislaufwirtschaft. Strategien & Geschäftsmodelle, Ressourcenmanagement, Digitalisierung, rechtliche Rahmenbedingungen. Wien: Linde international, S. 136–140.

Umsetzung und Betriebserfahrung der ersten österreichischen Gipsrecyclinganlage

Monika Döll
Saint-Gobain Austria GmbH, Business Development, Bad Aussee, Österreich

KURZFASSUNG: Die GzG Gipsrecycling GmbH ist ein Joint Venture der Unternehmen Saint-Gobain Austria, PORR und Saubermacher mit dem Ziel, einen geschlossenen Recyclingkreislauf für Gipskartonplatten in Österreich zu etablieren. Mit der Inbetriebnahme der GzG-Gipsrecyclinganlage in Stockerau wurde in Österreich ein wichtiger Meilenstein für die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen gesetzt. Die Anlage ist die erste industrielle Einrichtung des Landes, die sich auf das Recycling von Gipskartonplatten spezialisiert hat. Fast ein Jahr nach Betriebsstart fällt die Bilanz der Betreiber positiv aus: Die angelieferten Mengen steigen deutlich, die gesetzlichen Rahmenbedingungen wirken und der Aufbau eines geschlossenen Stoffkreislaufs für Gips gelingt zunehmend in der Praxis.

1 GESETZLICHE VORGABEN ALS TREIBER DES GIPSRECYCLINGS

Der Erfolg der Anlage ist eng mit den neuen gesetzlichen Rahmenbedingungen verbunden. Mit der Recyclinggipsverordnung wurde Anfang 2025 ein wichtiger Schritt gesetzt, um die getrennte Erfassung und hochwertige Verwertung von Gipskartonabfällen in Österreich zu etablieren.
Seit April 2025 müssen Gipskartonplatten auf Baustellen getrennt von anderen Bauabfällen gesammelt werden. Zusätzlich wurden Qualitätsanforderungen für aufbereiteten Recyclinggips definiert. Einen weiteren wesentlichen Impuls brachte das seit 1. Jänner 2026 geltende Deponieverbot für Gipskartonplatten. Dadurch wurde die stoffliche Verwertung zur bevorzugten Entsorgungsoption. Die Auswirkungen zeigen sich unmittelbar in den Mengenströmen.
Die neuen Regelungen verfolgen dabei mehrere Ziele gleichzeitig. Neben der Reduktion von Deponievolumen wird die Nutzung sekundärer Rohstoffe gefördert, wodurch natürliche Gipsvorkommen geschont und CO_2-Emissionen entlang der Wertschöpfungskette reduziert werden können.

2 DIE GROSSE HERAUSFORDERUNG DER VERUNREINIGUNGEN

Trotz moderner Anlagentechnik entscheidet letztlich die Qualität der Vorsortierung über den Erfolg des Recyclings. Aus Sicht der GzG beginnt Kreislaufwirtschaft bereits auf der Baustelle.
Werden Gipskartonplatten gemeinsam mit Beton, Ziegeln oder anderen Baumaterialien gesammelt, erhöht sich der Sortieraufwand erheblich. Gleichzeitig steigt die Belastung der Anlagentechnik. Verunreinigungen verursachen zusätzliche Kosten und können die Qualität des gewonnenen Recyclinggipses beeinträchtigen. Die bisherige Trennqualität wird deshalb noch kritisch bewertet. Hier sind sowohl Bauunternehmen als auch Rückbauunternehmen, Entsorger und Planer gefordert. Schulungen, klare Sammelsysteme und eine frühzeitige Berücksichtigung der Kreislaufwirtschaft bei Bau- und Abbruchprojekten werden entscheidend sein, um die Qualität der getrennten Sammlung weiter zu verbessern.

3 RECYCLINGPROZESS

Der eigentliche Recyclingprozess beginnt mit der Verwiegung und Qualitätskontrolle der angelieferten Materialien. Entscheidend für eine hochwertige Wiederverwertung ist der Anteil an Fremdstoffen. Um Anlieferern die Orientierung zu erleichtern, wurde ein einfaches Ampelsystem entwickelt, das zulässige und nicht zulässige Materialien klar definiert.

Nach der Annahme durchlaufen die Gipskartonplatten mehrere technische Aufbereitungsschritte. Zunächst erfolgt die Zerkleinerung des Materials. Anschließend werden Metalle wie Schrauben und Befestigungselemente mittels Magnetabscheidung entfernt. Mehrere Sieb-, Sortier- und Reinigungsstufen sorgen danach dafür, dass Papierbestandteile, Folien, Fliesenreste, Tapeten oder andere Störstoffe getrennt werden. Das Ergebnis ist hochwertiger Recyclinggips in Form sogenannter Gipsnuggets. Diese erfüllen die Anforderungen der Recyclinggipsverordnung, erreichen das Abfallende und können somit wieder als Rohstoff eingesetzt werden.

4 CLOSED-LOOP RECYCLING MIT BAHNTRANSPORT

Der aufbereitete Recyclinggips wird anschließend per Bahn in das Saint-Gobain-Gipsplattenwerk nach Bad Aussee transportiert. Dort dient er als Sekundärrohstoff für die Herstellung neuer Gipskartonplatten. Dieses Konzept stellt einen geschlossenen Materialkreislauf dar: Aus alten Gipskartonplatten entstehen nach Aufbereitung wieder neue Bauprodukte gleicher Qualität. Je nach Produkttyp liegt der Recyclinggipsanteil derzeit bei bis zu 40 Prozent. Damit wird bereits heute ein bedeutender Teil des Primärrohstoffbedarfs durch recyceltes Material ersetzt.
Besonders hervorzuheben ist der CO_2-arme Bahntransport zwischen Recyclinganlage und Produktionswerk. Dadurch werden nicht nur Rohstoffe geschont, sondern auch Transportemissionen reduziert. Das Projekt zeigt exemplarisch, wie Kreislaufwirtschaft und Klimaschutz miteinander kombiniert werden können.

5 KREISLAUFWIRTSCHAFT ALS NEUER STANDARD

Die bisherigen Betriebserfahrungen der GzG-Gipsrecyclinganlage zeigen, dass die Voraussetzungen für einen geschlossenen Gipskreislauf in Österreich vorhanden sind. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen wurden geschaffen, die technische Infrastruktur ist verfügbar und die Nachfrage nach hochwertigen Recyclingrohstoffen wächst kontinuierlich. Für die kommenden Jahre wird entscheidend sein, die getrennte Sammlung von Gipskartonplatten flächendeckend in der Bauwirtschaft zu verankern. Je besser die Materialqualität bei der Anlieferung ist, desto effizienter funktioniert der Recyclingprozess und desto höher kann der Anteil von Sekundärrohstoffen in neuen Produkten ausfallen.

Die Anlage in Stockerau übernimmt dabei eine Pionierrolle. Sie demonstriert, dass hochwertige Baustoffe nicht zwangsläufig als Abfall enden müssen, sondern erneut zu wertvollen Rohstoffen werden können. Damit leistet sie einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung, zur Reduzierung von Deponiemengen und zur Umsetzung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft im österreichischen Bauwesen.

KONTAKT

Mag. Monika Döll
Monika.doell@saint-gobain.com
www.gzg.at

Beurteilung von Gipskartonabfällen im Zusammenhang mit dem Deponierungsverbot – ein erster Erfahrungsbericht

Arne M. Ragossnig[1] & Uliana Moroz[1]
[1)] RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Bau- und Abbruchabfälle stellen den massemäßig wichtigsten Abfallstrom dar. Kreislaufwirtschaftliche Ansätze können daher einen signifikanten Hebel haben. Die Herausforderung besteht in der Sicherstellung sauberer Stoffkreisläufe unter Vermeidung ungewollter Schadstoffverschleppung in Neuprodukte bzw. Recyclate.
Der vorliegende Beitrag diskutiert diesen Aspekt anhand der Implementierung eines Gipsplatten-Kreislaufs in Österreich vor dem Hintergrund der Errichtung und Nutzung von Trockenbaukonstruktionen erfolgter Kontaminationen durch asbesthaltige Spachtelmassen.

1 EINLEITUNG - ALLGEMEINE RAHMENBEDINGUNGEN FÜR VERWERTUNGSORIENTIERTEN RÜCKBAU

Die Basis für die Sicherstellung eines verwertungsorientierten Rückbaus bilden in Österreich die Bestimmungen des § 5 der Recyclingbaustoffverordnung (RBV, 2016, BGBl. II Nr. 181/2015) (Recyclingbaustoffverordnung, 2016). In § 6 (1) und § 6 (2) werden darüber hinaus durch den Bauherrn und Bauunternehmer sicherzustellende Trennpflichten definiert. Hier wird unabhängig vom Umfang eines Rückbauvorhabens die Trennung von gefährlichen und nicht gefährlichen Abfällen vor Ort sowie die Trennung weiterer Stoffgruppen nach Möglichkeit vor Ort bzw. – wenn dies technisch nicht möglich oder mit unverhältnismäßigen Kosten verbunden ist – in einer nachgelagerten Behandlungsanlage als rechtliches Erfordernis festgelegt.

Weiters legt die RBV (2016) in § 5 (1) die Anforderung für die Erstellung von Schad- und Störstofferkundungen (SSE) (ab einer Mengenschwelle von > 750 t) fest. Gipshaltige Abfälle sind explizit als Störstoffe genannt. Störstoffe sind zu entfernen und die entfernten Abfälle, die Schad- und Störstoffe enthalten, sind vor Ort voneinander zu trennen und einer ordnungsgemäßen Behandlung zuzuführen.

Weiters ergeben sich durch die Bestimmungen des § 4 Recyclinggips-Verordnung (RGV) (Recyclinggips-Verordnung, 2024) detailliertere Trennpflichten (ohne definierte Mengenschwellen) im Rahmen von Bau- und Abbruchtätigkeiten, die festlegen, dass folgende drei gipshaltige Abfälle für jedes Rückbauvorhaben vor Ort zu trennen und trocken zu lagern sind:

- Gipsplatten, Gips-Wandbauplatten, Gips-Feuerschutzplatten und Gipsplatten mit Vliesarmierung (Gipsvliesplatten) sowie imprägnierte Gipsplatten, imprägnierte Gips-Wandbauplatten, imprägnierte Gips-Feuerschutzplatten und imprägnierte Gipsplatten mit Vliesarmierung (Gipsvliesplatten),
- Gipsfaserplatten,
- Calciumsulfatestrich.

Sollte eine Trennung am Anfallsort technisch nicht möglich oder mit unverhältnismäßig hohen Kosten verbunden sein (vgl. § 4 (2) RGV (Recyclinggips-Verordnung, 2024)), kann die Trennung nachgelagert in einer dafür genehmigten Behandlungsanlage erfolgen.

Es erscheint zweckmäßig, die Erkundung und Beurteilung von gipshaltigen Baustoffen im Rahmen der SSE entspr. § 4 RBV (2016) vorzunehmen, da gipshaltige Baustoffe ohnehin im Rahmen der SSE als Störstoffe zu identifizieren sind.

Entspr. den rechtlichen Rahmenbedingungen der RBV (Recyclingbaustoffverordnung, 2016) sowie der RGV (Recyclinggips-Verordnung, 2024)) können hinsichtlich Rückbauvorhaben prinzipiell drei Fälle unterschieden werden:

- Bauvorhaben unter 750 t Bau- und Abbruchabfälle, wo keine SSE vorliegt.
- Bauvorhaben, wo eine SSE durch eine interne (Anmerkung: mit dem Rückbau-/Abbruchunternehmen in einem Dienst- oder Organschaftsverhältnis stehende) rückbaukundige Person durchgeführt wurde oder wo der Aspekt des Umgangs mit Gipsabfällen nicht ausreichend abgedeckt wurde sowie
- Bauvorhaben, wo eine SSE durch eine externe rückbaukundige Person oder externe Fachperson/Fachanstalt im Sinne des AWG 2002 (Abfallwirtschaftsgesetz, 2002) durchgeführt wurde und der Aspekt des Umgangs mit Gipsabfällen ausreichend abgedeckt wurde.

In *Abb. 1* befindet sich eine detaillierte Darstellung der hier genannten drei Fälle sowie die jeweils erforderlichen Trennpflichten und Übergabemöglichkeiten an befugte Abfallsammler und -behandler im Sinne des aktuell gegebenen Rechtsrahmens im Abfallrecht.

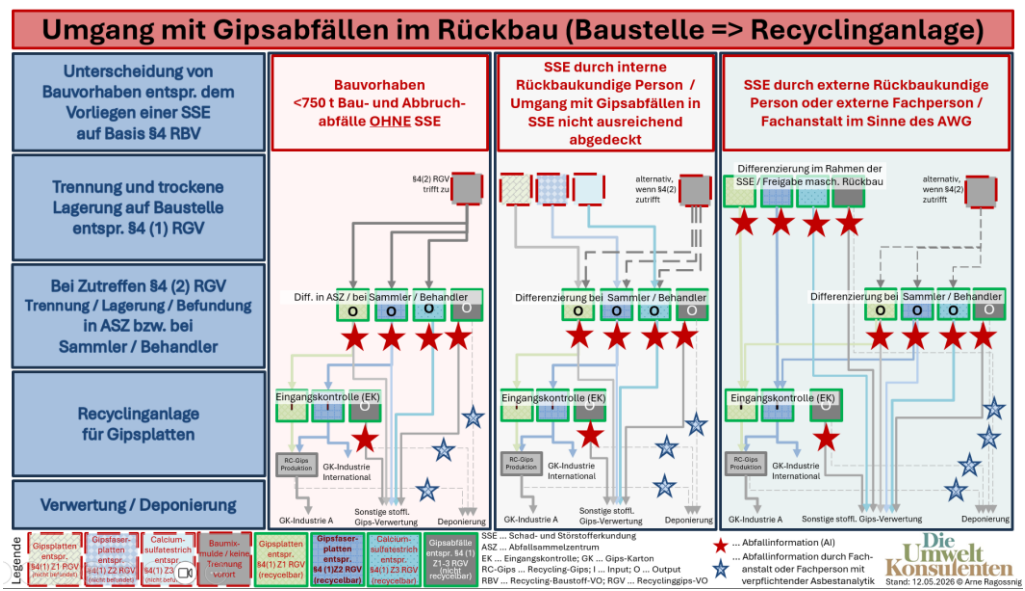


Abb. 1: Szenarios der Stoffstromlenkung für Gipsabfälle im Rahmen des verwertungsorientierten Rückbaus (eigene Darstellung)

Für die Differenzierung recycelbarer und nicht recycelbarer Gipsabfälle ist neben organoleptisch erkennbaren Kriterien zur Beurteilung der Recyclingfähigkeit vor dem Hintergrund des Behandlungsgrundsatzes 4.2.1.2 des Bundes-Abfallwirtschaftsplans 2023 (BAWP, 2023) (BMK, 2023) vor allem eine potenzielle Asbest-Kontamination von Putzen, Spachtelmassen und Fliesenklebern (PSF) maßgeblich. Entsprechend dem angeführten Behandlungsgrundsatz sind Bauteile bzw. Beton mit asbesthaltigen PSF von höchstens 0,1 M.-% von Bauteilen bzw. Beton ohne asbesthaltigen PSF vor Ort zu trennen. Ein Recycling asbesthaltiger Bauteile – Bauschutt (z.B. Gipskartonplatten mit asbesthaltigen PSF) oder Beton – ist nur dann zulässig, wenn der Asbestgehalt < 0,008 M.-% beträgt. Um eine rechtskonforme Umsetzung von Bauvorhaben sicherzustellen, wird auf diesen Aspekt im Rahmen der Durchführung von SSE besonderes Augenmerk zu legen sein. Für Rückbauvorhaben, wo eine durch eine externe befugte Fachperson oder Fachanstalt sowie eine externe rückbaukundige Person durchgeführte SSE vorliegt, besteht die Möglichkeit der Trennung von für ein Recycling nicht geeigneten Gipsplattenabfällen vor Ort. Es soll

in solchen Fällen eine Stoffstromlenkung nicht recycelbarer Gipsabfälle von der Baustelle direkt zu einer alternativen Verwertung oder Deponierung möglich sein. Dafür ist eine Novelle der Deponieverordnung (DVO, 2008) erforderlich. In der Darstellung in *Abb. 1* wird der aktuell in Expertenkreisen diskutierte diesbezügliche Novellierungsentwurf in diesem Zusammengang bereits abgebildet.

Für Gipsplattenabfälle ist das vorher Ausgeführte dahingehend von Relevanz, da diese in Bauwerken durchaus als Materialverbunde vorliegen können und daher

- durch eine Erkundung im Vorfeld der Rückbaumaßnahme
- in Verbindung mit einem entsprechenden Rückbau- bzw. Demontagekonzept
- und der entsprechenden Vorgangsweise im Rahmen des Rückbaus (Entfrachtung, Trennung vor Ort)

sicherzustellen ist, dass gipshaltige Abfälle jedenfalls im Rahmen des Rückbaus als Störstoffe entfrachtet werden und dabei idealerweise bei den Gipsplatten, Gips-Wandbauplatten und faserverstärkten Gipsplatten zwischen recycelbaren Gipsplattenabfällen, die auf der Baustelle getrennt erfasst werden, trocken gelagert und in weiterer Folge einer Gips-Aufbereitungsanlage zugeführt werden, sowie sonstigen gipshaltigen Abfällen, die als nicht recycelbar bzw. nicht für die Herstellung von RC-Gips geeignet auf der Baustelle getrennt erfasst und in weiterer Folge einer alternativen Verwertung oder Deponierung zugeführt werden, unterschieden werden sollte.

Die Unterscheidung von recycelbaren und nicht recycelbaren Gipsplatten auf der Baustelle des Rückbauvorhabens hilft dabei, den Logistikaufwand und die damit einhergehenden Umweltauswirkungen für nicht recycelbare Gipsabfälle möglichst gering zu halten und darüber hinaus sicherzustellen, dass eine Schadstoffverschleppung in Gips-Aufbereitungsanlagen minimiert werden kann.

2 SPACHTELMASSEN UND DEREN RELEVANZ FÜR DEN RECYCLINGKREISLAUF GIPSPLATTEN

2.1 Allgemeines zur Verwendung von Spachtelmassen

Spachtelmassen zählen zu den verdeckt eingebauten potenziell asbesthaltigen Baustoffen (AGÖF et al., 2022). Asbest wurde in der Vergangenheit als Asbeststaub in Spachtelmassen bewusst beigefügt. Dies geschah in Einzelfällen bis 1994, um die Konsistenz einzustellen und die mechanischen Eigenschaften zu verbessern. Neben der Zumischung bei der Produktion war auch die Beigabe vor Ort üblich (LfU, 2020).

Laut AGÖF ist davon auszugehen, dass in ca. 25 % der vor 1995 in Deutschland errichteten oder sanierten Gebäude asbesthaltige Spachtelmassen, Putze und Fliesenkleber zu finden sind (AGÖF et al., 2022).

Es soll dezidiert festgehalten werden, dass bei den durch die österreichische Gipsindustrie hergestellten Gipskartonplatten sowie auch den durch die österreichische Gipsindustrie in Verkehr gebrachten Spachtelmassen aufgrund der verwendeten Rohstoffbasis davon auszugehen ist, dass hier keine Asbestkontaminationen vorliegen. Das Verbauen der Gipskartonplatten in den Gebäuden erfolgte jedoch auch durch andere Gewerke, die hier eigene aus anderen Quellen bezogene Spachtelmassen verwendeten bzw. auch aus verarbeitungstechnischen Gründen Vorort bewusst Asbest zu den Spachtelmassen zusetzten.

In den meisten Fällen ist bei historischen Asbest-kontaminierten Spachtelmassen von einem Asbestgehalt von ≥ 1 M.-% auszugehen. Jedoch können Spachtelmassen durch andere

Materialschichten überdeckt sein, was somit bei Beprobung und nachfolgender Analytik zu einer „Asbestverdünnung“ führt. Dies kann bei einem Gesamtquerschnitt des Oberflächenbelags zu einer Konzentration < 0,1 M.-% führen und fälschlich als unkritisch bewertet oder nicht diagnostiziert werden. Oft kann davon ausgegangen werden, dass der Asbestanteil bei Spachtelmassen etwa zwischen 0,5 M.-% und 4 M.-% liegt. Bei „Betonsanierungen“ an Fassaden von 1978 bis 1994 wurde der Asbest vor Ort beigemischt und kann bis 3 M.-% betragen (Bossemeyer et al., 2019). Da Spachtelmassen jedoch nur in dünnen Schichten oder für Fugen in Gebäuden verwendet wurden, entstehen aus geringen Mengen eines Produkts großflächige Anwendungen in den betroffenen Gebäuden (VDI, 2015).

Das voran Genannte betrifft historisch genutzte Spachtelmassen, wo Asbest bewusst zugesetzt wurde. Seit 1. Januar 2004 ist in Österreich auf Basis der Chemikalienverbotsverordnung (Chemikalienverbotsverordnung, 2003) entspr. §2 das Inverkehrbringen und die Verwendung von Stoffen, Zubereitungen und Fertigwaren, denen Asbestfasern absichtlich zugesetzt wurden, verboten. Dies schließt nicht aus, dass in den Grundstoffen zur Herstellung von Bauprodukten natürlich vorhandener geogener Asbest vorhanden ist, obwohl deren Inverkehrbringen im Einklang mit den geltenden europarechtlichen Bestimmungen ((REACH Verordnung, 2006), (CLP-Verordnung, 2008)) erfolgte. Eine analytische Unterscheidung zwischen anthropogen und geogen vorhandenem Asbest und ein sinnvoller Umgang mit den Ergebnissen derartiger analytischer Befunde ist nicht trivial, wie unter anderem dem wissenschaftlichen Beitrag von Schimpf et al. (2022) entnommen werden kann. Während die Konzentration von anthropogen, absichtlich beigemengten Asbest in Spachtelmassen im Prozentbereich liegt, ist bei geogen enthaltenem Asbest mit Analysenergebnissen im Bereich von ca. 2 Größenordnungen darunter auszugehen. Der diesbezügliche Wertebereich der Asbest-Konzentrationen bewegt sich jedoch über dem für das Recycling maßgeblichen Grenzwert von 0,008 M.-% Asbest.

Wesentlich ist, dass Spachtelmassen im Rückbau im Regelfall (Ausnahme: Schadstoffsanierung) nicht als eigener Bauteil entfernt werden, sondern im Verbund mit Bauteilen – oft Gipsplatten – als Abfall anfallen. Dieser genannte Fall ist im Speziellen bei der Gestaltung eines Gipsplattenkreislaufs unter Beachtung der Grundsätze einer maximalen Bereitstellung von Sekundärrohstoffen bei gleichzeitiger Sicherstellung der Schaffung eines sauberen Stoffkreislaufs von maßgeblicher Relevanz.

2.2 Anwendung von Spachtelmassen im Trockenbau

Trockenbauwände, Vorsatzschalen sowie abgehängte Decken mit Gipskartonplatten können Verspachtelungen aufweisen, die bis zu 10 M.-% Asbest enthalten (Bossemeyer et al., 2019). Anzumerken ist, dass die Gipsplatten und Gipskartonplatten selbst jedenfalls nicht Asbest verdächtig sind; die potenziell auffällige Spachtelmasse wurde als linearer Fugenfüller, flächiger oder punktueller Glattspachtel verwendet.

Ohne Analyse ist eine Unterscheidung von asbestfreien Baustoffen nicht möglich. Wenn jene Flächen übermalt sind, ist die tatsächliche Lage der potenziell asbesthaltigen Spachtelmassen zusätzlich verborgen und schwer zu lokalisieren bzw. zutreffendenfalls schwer zu sanieren. Insbesondere in Fällen, wo im Rahmen einer SSE Einschränkungen hinsichtlich invasiver Beprobungen bestehen, ergeben sich Schwierigkeiten bei der „in-Situ“ Befundung der Gipsplatten.

Die tatsächlich zum Einsatz gekommene Masse an Spachtelmasse pro m² Trockenbau hängt von verschiedensten Faktoren (Plattenformate, Befestigungstechnik, Kantenquerschnitt, Ausbauqualität, …) ab. In Abstimmung mit Inverkehrbringern von Spachtelmassen könnte hierzu als plausible und erwartbare Einsatzmenge für Fugenspachtel 0,3 kg Spachtelmasse / m² Gipskartonplatte und für den Einsatz als Flächenspachtel eine erwartbare Einsatzmenge von 1,5 kg Spachtelmasse / m² Gipskartonplatte identifiziert werden. Entsprechend den Absatzmengen wird

bei Spachtelmassen von 90 % Anwendung als Fugenspachtel und lediglich 10 % Anwendung als Flächenspachtel ausgegangen.



Abb. 2: Verwendung von Spachtelmassen als Fugenspachtel (links vor dem Spachteln, rechts nach dem Spachteln) (eigene Aufnahmen)

Unter der Prämisse eines Standardformats einer Gipskartonplatte mit 1250 x 2000 mm bzw. einer Dicke von 12,5 mm (Flächengewicht 8,5 kg/m²) kann das Verhältnis Masse Gipskarton zu Masse Fugenspachtel mit 28,33 und jenes zu Masse Flächenspachtel mit 5,67 angegeben werden. Die genannten Faktoren wurden auf Basis von Flächengewichten bzw. Flächen-spezifischem Spachtelmasseneinsatz ermittelt, d. h. korrekt sind diese Werte unter der Voraussetzung, dass eine Platte zumindest auf 2 von 4 Kanten Fugenspachtel bzw. auf einer von zwei Seiten Flächenspachtel aufweist. Gewichtet man diese Faktoren mit den anteiligen Absatzanteilen von Fugen- und Flächenspachtel ergibt sich ein Gesamtfaktor von 26,06. Demnach kann, unter der Annahme eines Asbestgehalts der Gipskartonplatte von 0 M.-% mittels des für die Spachtelmasse ermittelten Analysenwerts durch Division mit dem Faktor 26,06, der Asbestgehalt des mit Spachtelmassen beaufschlagten Gipskartonplattenabfalls ermittelt werden.

3 BEURTEILUNGSMETHODIK DER RECYCLINGFÄHIGKEIT VON GIPSPLATTEN-ABFÄLLEN (VORSCHLAG)

Es wird vorgeschlagen die Befundung von Gipskartonplatten-Abfällen zur Beurteilung des Zutreffens einer Ausnahme vom Deponierungsverbot entsprechend dem Novellierungsentwurf der DVO §7 Z15 (DVO, 2008) im Falle der Beurteilung von Gipsplattenabfällen in Haufwerken oder in Transportgebinden nach den nachfolgend erläuterten Vorgaben durchzuführen. Bei dem Vorschlag handelt es sich um eine in Fachkreisen aktuell diskutierte Herangehensweise zur Sicherstellung eines rechtkonformen Umgangs mit Gipskartonabfällen nach den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft und hinsichtlich der Prüfkosten der Verhältnismäßigkeit.

Die Beurteilung gliedert sich dabei in folgende Teilschritte:
1. verpflichtender Ortsaugenschein
2. Beprobung
3. chemische Analyse
4. Befundung

Ad 1) Im Rahmen eines verpflichtend durchzuführenden Ortsaugenscheins ist festzustellen, ob in der konkret zu beurteilenden Charge Spachtelmassen enthalten sind. Wenn Spachtelmassen vorhanden sind, hat eine Beprobung (Schritt 2) sowie eine chemische Analyse (Schritt 3) entsprechend den nachfolgenden Absätzen zu erfolgen. Sollte es sich um Gipskartonplatten-Abfallchargen aus der Errichtung von Bauwerken (z. B. Verschnitte) handeln, wo keine Spachtelmassen enthalten sind, kann Schritt 2 und Schritt 3 übersprungen werden. Der Ortsaugenschein ist mittels Inspektionsbericht (im Falle einer Probenahme entspr. Schritt 2 inkl. Probenahmeprotokoll) jedenfalls mit aussagekräftigen Fotodokumentationen der Flächen und Kanten der beurteilten Gipskartonplatten zu dokumentieren.

Ad 2) Bei Antreffen von Spachtelmassen sind je Beurteilungsmenge einer zu beurteilenden Charge mindestens 5 Stichproben von Spachtelmasse mit jeweils ca. 5 g Probenmasse bzw. ca. 1 cm³ zu entnehmen, die der konkreten Beurteilungsmenge zuordenbar sind. Als Beurteilungsmaßstab wird hier 8 m³ vorgeschlagen, da dies das Volumen des meist verwendeten Transportgefäßes – einer Absetzmulde – ist. Bei zu beurteilenden Chargen > 8 m³ ist die zu beurteilende Charge in Beurteilungsmengen von max. 8 m³ gedanklich zu teilen und die Beprobungsvorschrift ist sinngemäß für jede Beurteilungsmenge anzuwenden.

Ad 3) Die im Schritt 2 erhaltenen Stichproben einer Beurteilungsmenge sind unvermischt und der konkreten Beurteilungsmenge zuordenbar an das Labor zu übergeben. Im Labor wird aus den fünf einer Beurteilungsmenge zuordenbaren Stichproben in gleichen Massenverhältnissen eine Mischprobe für die jeweils zu beurteilende Beurteilungsmenge hergestellt. Die Mischprobe wird einer REM-Analytik entspr. der Analysenvorschrift VDI 3866, Blatt 5, Anhang B (VDI, 2017) unterzogen. Für die weitere Befundung ist der Analysenwert ohne Berücksichtigung des Konfidenzintervalls maßgeblich.

Ad 4) Der je Beurteilungsmenge erhaltene Analysenwert ist durch den Faktor 26,06 zu dividieren, um den für den Grenzwertvergleich maßgeblichen für die Beurteilungsmenge zutreffenden Beurteilungswert zu ermitteln. Beinhaltet die zu beurteilende Charge mehrere Beurteilungsmengen ist der arithmetische Mittelwert der Analysenwerte der Mischproben der einzelnen beurteilten Beurteilungsmengen zu bilden und durch den Faktor 26,06 zu dividieren.

Liegt der Beurteilungswert für eine beurteilte Charge bei ≥ 0,008 M.-% Asbest ist die entsprechende Charge als nicht recycelbar zu befunden und eine Ausnahme vom Deponierungsverbot (§7 Z15 DVO) (DVO, 2008) liegt vor. Bei einem Beurteilungswert < 0,008 M.-% Asbest ist die entsprechende beurteilte Charge als recycelbar zu befunden und es besteht ein Deponierungsverbot für die beurteilte Charge.

Der vorgeschlagene Ansatz hinsichtlich der Befundung von Gipskartonabfällen stellt eine pragmatische Herangehensweise dar, die unter den Prämissen der Verhältnismäßigkeit mit hinreichender Genauigkeit eine Differenzierung von mit historisch belasteter Spachtelmasse kontaminierten Gipskartonabfälle von Gipskartonabfällen erlaubt, die mit Spachtelmassen beaufschlagt sind, die lediglich geringfügige dem rechtlichen Rahmen hinsichtlich Inverkehrbringen entsprechende Asbestkonzentrationen aufweisen.

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag wird die Herausforderung der Unterscheidung anthropogener Asbest-Belastungen von Gipskarton-Spachtelmassen von lediglich geogen bedingter Asbest-Belastungen diskutiert.

Nachfolgende Beispiele sollen darstellen inwieweit es gelingt durch die vorgeschlagene Methodik / Faktoren bei einem bestimmten Asbest-Messwert für eine Mischprobe zwischen Gipskartonabfällen mit historisch anthropogen Asbest-belasteten und rezenten lediglich geogen bedingt Asbest-belasteten Spachtelmassen zu differenzieren.

Unter Anwendung des aggregierten Faktors von 26,06 sieht die Situation für die Messwerte für eine Mischprobe jeweils wie nachfolgend diskutiert aus:

- bei Messwerten für die Mischprobe von 0,3 M.-% und höher, wo klar eine anthropogene Belastung vorliegt, wäre die beurteilte Gipskarton-Abfall-Charge zu deponieren, die Ausnahme vom Deponierungsverbot träfe zu und die Charge dürfte nicht recycelt werden.
- Bei einem Messwert von 0,2 M.-%, wo ebenfalls eine anthropogene Belastung anzunehmen wäre, wäre die beurteilte Gipskarton-Abfall-Charge bereits recycelbar und dürfte nicht mehr deponiert werden.
- Bei einem Messwert von 0,1 M.-%, wo eine anthropogene Belastung nicht auszuschließen wäre, wäre die beurteilte Gipskarton-Abfall-Charge bereits recycelbar und dürfte nicht mehr deponiert werden.
- Bei einem Messwert von 0,03 M.-%, wo lediglich eine geogen bedingte Asbest Belastung anzunehmen wäre, wäre die beurteilte Gipskarton-Abfall-Charge recycelbar und dürfte nicht mehr deponiert werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Abfallwirtschaftsgesetz (2002). Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 - AWG 2002), Wien.

AGÖF: Bruns-Tober E., Richardson N., Wesselmann M., Thumulla J. Weber-Thumulla S. (2022). Umwelt, Gebäude & Gesundheit.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), (2020). Schadstoffratgeber Gebäuderückbau. Available: https://www.lfu.bayern.de/abfall/schadstoffratgeber_gebaeuderueckbau/suchregister/doc/439.pdf.

BMK (2023). Bundes-Abfallwirtschaftsplan, Wien.

Bossemeyer H., Dolta S., Schubert U., Zwiener G., (2019). Schadstoffe im Baubestand, RM Rudolf Müller Medien GmbH

Chemikalienverbotsverordnung (2003). VO d. Bundesministers f. Land- u. Forstwirtschaft, Umwelt u. Wasserwirtschaft über weitere Verbote u. Beschränkungen bestimmter gefährl. Stoffe, Zubereitungen u. Fertigwaren (Chem-VerbotsV StF: BGBl. II Nr. 477/2003).

CLP-Verordnung (2008). VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen.

Deponieverordnung (DVO) (2008). Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien.

REACH Verordnung (2006). VERORDNUNG (EG) Nr. 1907/2006 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH).

Recyclingbaustoffverordnung (2016). VO d. BMLFUW ü. d. Pflichten b. Bau- o. Abbruchtätigkeiten, d. Trennung u. d. Behandlung v. b. Bau- o. Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen, d. Herstellung u. d. Abfallende v. Recycling-Baustoffen.

Recyclinggipsverordnung (2024). VO d. BMK ü. d. Behandlung von Gipsabfällen und die Herstellung und das Abfallende von Recyclinggips.

Schimpf, S., Richardson, N., Obeloer, D., Müller, S., Ries, G., Klapal, L., & Mertens, J. (2022). Geogener Asbest eine Handlungsempfehlung zur einheitlichen Einstufung und Analytik, In: Umwelt, Gebäude und Gesundheit, Innenraumhygiene, Asbest und Arbeitsschutz, AGÖF - Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute.

Verein Deutscher Ingenieure e.V (VDI), Gesamtverband Schadstoffsanierung e.V., (2019). Asbesthaltige Putze, Spachtelmassen und Fliesenkleber in Gebäuden.
Verein Deutscher Ingenieure (2017). Bestimmung von Asbest in technischen Produkten - Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren, VDI Richtlinie 3866, Blatt 5, Anhang B.

KONTAKT

Hon.-Prof. (FH) DI Dr. Arne M. Ragossnig, MSc. (OU)
ragossnig@umweltkonsulenten.at
+43 1 349 10 10 12 / +43 664 88 27 1200
Geschäftsführender Gesellschafter
RM Umweltkonsulenten ZT GmbH
https://umweltkonsulenten.at/

KI-basierte Erkennung des Zusammenhangs zwischen Chemismus und Auslaugbarkeit mineralischer Nebenprodukte und Abfälle (KIA)

Kai Ernst[1] & Daniel Vollprecht[1]
[1)] Universität Augsburg, MRM, Lehrstuhl für Ressource and Chemical Engineering, Augsburg, Deutschland

KURZFASSUNG: Im Rahmen des Projekts KIA (KI-basierte Erkennung des Zusammenhangs zwischen Chemismus und Auslaugbarkeit mineralischer Nebenprodukte und Abfälle) wird das Auslaugungsverhalte von insgesamt drei mineralischen Stoffströmen experimentell untersucht und mithilfe KI-gestützter Datenauswertung, kausale Zusammenhänge zu deren chemischer Zusammensetzung und Mineralogie identifiziert. Weiterführend wird LIBS (laser induced breakdown spectroscopy) als neue Methode genutzt, um die mineralischen Stoffströme hinsichtlich ihrer elementaren Zusammensetzung zu analysieren und anhand der identifizierten kausalen Zusammenhänge, deren Auslaugungsverhalten KI-basiert zu prognostizieren. Zu den im Projekt KIA betrachteten mineralischen Stoffströmen gehören Elektroofenschlacken, Fraktionen aus der Bauschuttaufbereitung sowie eine Fraktion aus der Aufbereitung von Bodenaushub. Das Nutzen von KI-basierter Auswertung, um die genauen Zusammenhänge zwischen chemischer Zusammensetzung, Mineralogie und Umweltverhalten festzustellen, bildet die Grundlage für sensorbasierte Qualitätsüberwachung und führt potenziell zur enormen Einsparung an Primärrohstoffen und weiterer Ressourcen.

1 EINLEITUNG

Die Substitution mineralischer Primärrohstoffe kann in großem Maß durch die alternative Nutzung von Rezyklaten aus mineralischen Nebenprodukten und Abfällen gewährleistet werden. Die damit verbundenen Stoffströme repräsentieren eine enorme Ressourcenbasis, wobei innerhalb des Bausektors die Bau- und Abbruchabfälle einschließlich des Bodenaushubs, die mengenmäßig wichtigste Abfallgruppe in Deutschland bilden (Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V., 2024). Auch Schlacken aus Elektrolichtbogenöfen (EAF-Schlacken), die im Zuge des Stahlrecyclings als mineralisches Nebenprodukt unvermeidlich anfallen, bilden eine bedeutende Ressource für mineralische Rezyklate, deren Menge zukünftig aufgrund zunehmender EAF-Nutzung ansteigen wird. Trotz dieses grundlegenden Potenzials sind Teilmengen dieser Stoffströme nicht als Ersatzbaustoff verwertbar, da der tatsächliche Verwertungsweg im Wesentlichen von deren Umweltverhalten (Feststoffgehalt an Schadstoffen und/oder Auslaugung an Schadstoffen) abhängig ist. Das Auslaugverhalten wird mit Hilfe von Elutionsversuchen charakterisiert, die häufig eine kosten- und zeitintensive Hürde bilden, weshalb Materialien oftmals vorsorglich deponiert werden, statt eine stoffliche Verwertung anzustreben. Des Weiteren fordern die zeitintensive Durchführung von Elutionsversuchen Lagerkapazitäten und die Beanspruchung enormer Flächen. Aus Sicht der Prozessanalyse werden zudem industrielle Materialdaten, insbesondere die chemische Zusammensetzung und die Mineralogie, bisher nicht ausreichend systematisch ausgewertet und genutzt, um die kausalen Mechanismen zu identifizieren, die das Auslaugungsverhalten mineralischer Materialien steuern. Umfassende Erkenntnisse zu den kausal steuernden Mechanismen können wiederum zur Prozessoptimierung in der Aufbereitung genutzt werden und die Nutzung schnellerer Analysemethoden ermöglichen.

Um diese Probleme anzugehen, werden in dem Projekt KIA bisherige Prozessdaten mit neuen robusten Datensätzen hinsichtlich chemischer Zusammensetzung, Mineralogie und Auslaugverhalten kombiniert zusammengeführt. Aus diesen umfassenden Datensätzen können mit Hilfe künstlicher Intelligenz- (KI) basierten Auswertemethoden komplexe Zusammenhänge und kausale Mechanismen zwischen chemischer Zusammensetzung, Mineralogie und Auslaugbarkeit identifiziert werden. Zudem wird Laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS) als neue

Methode zur real-time Analyse der Elementzusammensetzung mineralischer Materialien genutzt. Um die LIBS-Spektren hinsichtlich quantitativer Elementzusammensetzung auszuwerten, wird ein weiteres KI-Modell verwendet, welches basierend auf den zuvor identifizierten mechanistischen Zusammenhängen, eine Vorhersage zu der Auslaugung des analysierten Materials treffen kann. In dem Projekt KIA soll dieser neue Ansatz an drei mineralischen Stoffströmen durchgeführt werden. Dazu gehören EAF-Schlacken, Fraktionen aus der Bauschuttaufbereitung sowie eine Fraktion aus der Aufbereitung von Bodenaushub. Trotz bestehender Theorien zu den relevanten Mechanismen, die das Auslaugverhalten verschiedener Schadstoffe der drei mineralischen Materialien erklären, sind nicht alle komplexen Zusammenhänge zwischen chemischer Zusammensetzung, Mineralogie und Auslaugung ausreichend identifiziert.

1.1 EAF-Schlacken

EAF-Schlacken, die beim Einschmelzen von Stahlschrott im Lichtbogenofen als oxidisches Nebenprodukt entstehen, setzen sich aus den Hauptkomponenten CaO, SiO_2, Al_2O_3, MgO, Fe_2O_3, MnO_2 sowie TiO_2 zusammen (Tang et al., 2015) und bilden im erstarrten Zustand ein komplexes Mineralgemisch, das u.a. aus freiem CaO, Silikaten, Ferriten, Spinellen und Wüstit besteht (Kishore et al., 2025). Das regulatorische Umweltverhalten der EAF-Schlacken wird maßgeblich durch die Auslaugung der potenziellen Schadstoffe Chrom, Vanadium, Molybdän und Fluorid definiert. Die Auslaugbarkeit ist von den Mineralphasen und deren Löslichkeit abhängig, in denen die Schadstoffe gebunden vorliegen. So wurden in EAF-Schlacken Mineralphasen identifiziert, die je nach Schlackenzusammensetzung und Abkühlbedingungen auskristallisieren und abhängig von ihrer Löslichkeit, Schadstoffe unterschiedlich stark auslaugen (Mombelli et al., 2012). Des Weiteren wurde der SiO_2-Gehalt und dessen Verhältnis zu CaO in der schmelzflüssigen Schlacke als wichtiger Einflussparameter auf die Struktur der Schlackenschmelze sowie die Bildung schadstoffbindender Mineralphasen während des Erstarrungsprozesses identifiziert (Mombelli et al., 2014). Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wird industriell der SiO_2-Gehalt von EAF-Schlacken durch Zugabe von Quarzsand konditioniert, was zu einer deutlich geringeren Schadstoff-Auslaugung führt. Neben der chemischen Zusammensetzung wurden auch weitere Parameter und deren Korrelationen zur Schadstofffreisetzung untersucht (Abkühlrate, optische Basizität, Mineralphasen), was die Komplexität der wirkenden Faktoren auf die steuernden Auslaugungsprozesse widerspiegelt.

1.2 Feinfraktionen aus der Bauschuttaufbereitung

Bauschutt bildet einen meist heterogen zusammengesetzten Stoffstrom, der u.a. aus Resten von Beton/Stahlbeton, Mörteln sowie Ziegeln, Mauerwerk, Keramiken und Gipsplatten besteht. Die Bauschuttaufbereitung umfasst häufig Zerkleinerungs- und Sortiertechniken, um verschiedene Korngrößenfraktionen als Recyclingprodukte zu erhalten. Insbesondere die erzeugten feinen Fraktionen überschreiten häufig den regulatorischen Grenzwert für die Auslaugung von Sulfat (SO_4^{2-}). Dazu gehören die Feinfraktion des Vorabsiebs, die nach der Materialaufgabe durch Siebung aussortiert wird, sowie die Fraktion Bauschuttsand, die nach Materialzerkleinerung durch Brechen und anschließendes Sieben entsteht. Sulfat im Bauschutt stammt aus unterschiedlich löslichen SO_4^{2-}-haltigen Mineralphasen, die aus der variierenden Zusammensetzung des Rohmaterials stammen. In diesem Zusammenhang wurden Korrelationen zwischen SO_4^{2-}-Gehalten im Feststoff und ausgelaugtem SO_4^{2-} in aufbereitetem Bauschutt mit unterschiedlichen Anteilen an Beton, bituminösen Partikeln, Keramik und Gips untersucht. Hohe SO_4^{2-}-Auslaugung wurde hauptsächlich in aufbereiteten Materialien mit > 30 % keramischen Partikeln (z. B. Ziegelbruch) oder > 2 % Gipspartikeln (Putz, Gipskartonplatten, Stuck usw.) beobachtet (Barbudo et al., 2012). Gleichzeitig wurde Sulfatauslaugung auch mit anderen Bestandteilen (Beton, Mörtel, natürliche Zuschlagstoffe) assoziiert. Aufgrund der Komplexität der Auslaugungsmechanismen verschiedener SO_4^{2-}-Quellen, der Heterogenität der Bauschuttzusammensetzung und teilweise

unterschiedlich konfigurierten Auslaugungsversuchen, die eine Vergleichbarkeit erschweren, ist eine robuste Analyse auf der Grundlage einer breiten Datenbasis erforderlich (Andrade et al., 2024).

1.3 Schlufffraktion aus der Bodenaufbereitung

Die Aufbereitung von Bodenaushub erfolgt häufig in Nassklassierungsanlagen, wobei das Rohmaterial mit Wasser vermengt, über Waschaggregaten gereinigt und durch Siebung nach der Korngröße klassiert wird. Die anfallende feine Schlufffraktion akkumuliert potenzielle Schadstoffe, wobei speziell Feststoff- und Eluat-Gehalte an Arsen (As) und anderen Schwermetallen häufig regulatorische Grenzwerte für eine stoffliche Verwertung überschreiten. Arsen und weitere Schwermetalle können im Bodenaushub in sehr variablen Gehalten vorkommen, die häufig geogenen Ursprungs sind. Die Schwermetalle akkumulieren innerhalb der Feinfraktion an den großen spezifischen Oberflächen von Eisenhydroxiden sowie Tonmineralen, weshalb das Auslaugverhalten maßgeblich durch Sorptionsprozesse der vorliegenden Mineraloberflächen beeinflusst wird. Obwohl regulatorisch primär der Feststoffgehalt an As und anderen Schwermetallen bewertet wird, konnte festgestellt werden, dass hohe As-Feststoffgehalte nicht immer mit einer hohen Auslaugung korrelieren und untersuchte Proben von Bodenaushub zeigten, dass die Auslaugung unabhängig von dem Gesamtgehalt im Feststoff ist (Li, et al., 2017). Demnach sind die Mechanismen, die das Auslaugverhalten von As und anderen Schwermetallen kontrollieren, durch den komplexen Einfluss weiterer Faktoren gesteuert.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Beprobung EAF-Schlacken

Die Probenbereitstellung von EAF-Schlacken erfolgt durch die Max Aicher Umwelt GmbH. Da verschiedene Stahlqualitäten, Abkühlbedingungen und Konditionierungen eine unterschiedliche Auswirkung auf die Mineralphasen und dem damit verbundenen Umweltverhalten der Schlacke widerspiegeln, repräsentiert die Beprobung eine möglichst breite Variabilität dieser Einflussparameter (Tab. 1). Im Detail fällt je nach verwendeter Stahlqualität im Elektroofen entweder Baustahl-Schlacke (BS) oder Qualitätsstahl-Schlacke (QS) an, die via Schlackenkübel entnommen und durch 5 verschiedene Quarzsande konditioniert wird. Die Abkühlbedingungen variieren dabei zwischen der langsamen Abkühlung an der Luft oder der schnellen Abkühlung in Wasser. Dabei wird die Luftkühlung nochmals weiter differenziert in langsame Abkühlung auf dem Schlackenbeet und schnelle Abkühlung durch direkte Materialentnahme aus dem Schlackenkübel.

Tab. 1: Übersicht zu insgesamt 26 Schlackenproben und den zugehörigen Einflussparametern

Schlackentyp	Konditionierung	Abkühlung	Probenanzahl
QS	5 verschiedene Quarzsande (Q1-Q5)	Langsam (Luft)	5
		Schnell (Luft)	5
	3 verschiedene Quarzsande (Q1-Q3)	Schnell (Wasser)	3
BS	5 verschiedene Quarzsande (Q1-Q5)	Langsam (Luft)	5
		Schnell (Luft)	5
	3 verschiedene Quarzsande (Q1-Q3)	Schnell (Wasser)	3
		Gesamt	**26**

2.2 Beprobung Bauschutt und Bodenaushub

Aus Fraktionen der Bauschuttaufbereitung sowie einer Fraktion der Bodenaufbereitungsanlage werden insgesamt 30 Proben von der Heinrich Feeß GmbH & Co KG zur Verfügung gestellt (Tab. 2). Es werden im wöchentlichen Abstand 10 Proben aus der Fraktion Vorabsieb (ungebrochenes Material) und 10 Proben aus der Fraktion Bauschuttsand (gebrochenes Material) entnommen. Zusätzlich werden im wöchentlichen Abstand 10 Proben aus der Schlufffraktion der Bodenaufbereitung (Nassklassierung) bereitgestellt. Durch die zeitlichen Abstände der einzelnen Probenahmen und die damit verbundene Variabilität hinsichtlich chemischer Zusammensetzung, Mineralogie und Auslaugung, soll ein repräsentativer Datensatz entstehen.

Tab. 2: Übersicht zu insgesamt 30 Proben aus Fraktionen der Bauschutt- und Bodenaushubaufbereitung

Aufbereitungsfraktionen	**Fraktionen**	**Probenanzahl**
Gemischter Bauschutt	Fraktion Vorabsieb	10
	Fraktion Bauschuttsand	10
Bodenaushub	Fraktion Schluff Nassklassierung	10
	Gesamt	**30**

2.3 Labor- und LIBS-Analytik

Die Proben werden durch Trocknung, Zerkleinerung und Homogenisierung zu repräsentativen Teilproben aufbereitet und mit ausgewählten Labormethoden analysiert. Für die Analyse der chemischen Zusammensetzung wird eine RFA-WDX (Supermini 200; Pd-Anode 200W 50kV; Rigaku) verwendet. Die Analyse der mineralogischen Zusammensetzung wird mit XRD (DG-Phaser; Cu-Kα; Bruker) durchgeführt. Zur morphologischen Analyse sowie zur Analyse der chemischen Zusammensetzung werden ausgewählter Mineralphasen zusätzlich mit einem REM-EDX analysiert (Merlin; ZEISS). Für die Auslaugversuche werden Eluate nach DIN 19529 (< 4 mm, Wasser/Feststoff-Verhältnis 2:1, 24 h Schütteln) hergestellt. Für die Messung der Kationen-Konzentrationen werden die Proben mit Hilfe einer ICP-OES (ARCOS III; Spectro Ametek) analysiert. Die Messung der gelösten Anionen-Konzentrationen wird mit einem IC (930 Compact; Metrohm) durchgeführt.

Die LIBS-Einheit wird durch den Industriepartner Laser Analytical Systems & Automation GmbH bereitgestellt. Das System soll als Förderbandüberwachung installiert werden, sodass die drei Stoffströme nach breitflächiger Aufbringung stetig im Rundlauf gefördert werden und multiple Materialanalysen möglich sind. Grundlegend wird bei dem Verfahren ein hochenergetischer Laserpuls auf eine kleine Probenfläche fokussiert. Zunächst wird das Probenvolumen verdampft und es bildet sich aufgrund von Ionisationsprozessen ein Plasma. Sobald der Laserpuls stoppt, zerfällt das Plasma und angeregte Atome/Ionen emittieren elementspezifische Spektrallinien, welche spektral aufgelöst detektiert und in Form eines Spektrums dargestellt werden (Andrade et al. 2021).

2.4 Anwendung von KI-Modellen

Die Verknüpfung von LIBS-Rohdaten mit dem Auslaugverhalten der drei Stoffströme erfordert zwei methodisch unterschiedliche KI-Modelle, da die zugrunde liegenden Zusammenhänge auf verschiedenen Datenebenen bestehen. Das erste Modell dient der Auswertung der Laboruntersuchungen und ist ein Machine-Learning-Modell, das aus Datensätzen lernt, Muster zu erkennen und auf neue, unbekannte Daten anzuwenden. Dabei bilden die Features die Ergebnisse der Feststoffuntersuchungen (Elementgehalte, Elementverhältnisse, Mineralphasengehalte, kategorische Prozessvariablen) und die Targets die Ergebnisse der Auslaugversuche (Eluatwerte). Es werden verschiedene Modelltypen (z. B. Random Forest) getestet, um nichtlineare

Zusammenhänge zu erfassen, die mit klassischer Regression nicht abbildbar sind. Das zweite Modell dient der Auswertung der LIBS-Rohspektren und basiert auf einem Convolutional Neural Network (CNN). Es lernt, welche spektralen Merkmale (Peakpositionen, -formen, -verhältnisse) prädiktiv für bestimmte Elementgehalte sind und wird auf Datensätzen trainiert, die einerseits LIBS-Spektren mit RFA-Referenzmessungen paaren und andererseits simuliert wurden. Durch Verknüpfung beider Modelle werden die auf dem Förderband analysierten Materialien automatisiert hinsichtlich ihrer quantitativen Elementzusammensetzung ausgewertet (Modell 2), woraus anschließend mittels der im ersten Modell gelernten Zusammenhänge, das voraussichtliche Auslaugungs-verhalten prognostiziert wird. Damit lässt sich direkt aus der schnellen LIBS-Elementanalyse eine Aussage zum Umweltverhalten der untersuchten mineralischen Materialien ableiten.

3 AUSBLICK UND HERAUSFORDERUNGEN

Der in dem Projekt KIA angestrebte Ansatz, Datensätze zwischen chemischer Zusammensetzung, Mineralogie und Auslaugverhalten KI-basiert hinsichtlich kausaler Zusammenhänge auszuwerten und mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse LIBS-Spektren mineralischer Materialien bzgl. Umweltverhalten zu bewerten, beinhaltet ein hohes industrielles Anwendungspotential. Aufwendige Probenvorbereitungen und zeitintensive Laboruntersuchungen könnten perspektivisch ersetzt werden, Lagerkapazitäten verringern sich und eine kontinuierliche Prozess- bzw. Qualitätsüberwachung ist gegeben. Allerdings stellt dieser Ansatz mehrere Herausforderungen.

Einerseits ist die analysierte Probenanzahl der drei betrachteten Stoffströme begrenzt. Aus diesem Grund ist es möglich, dass die zur Verfügung gestellten Proben (insbesondere Bauschutt- und Bodenaushub) aufgrund schwankender Zusammensetzungen im Rohmaterial, keine hohen Schadstoffgehalte aufweisen und deshalb die benötigten mechanistischen Zusammenhänge zwischen chemischer Zusammensetzung, Mineralogie und Auslaugbarkeit nicht identifiziert werden können. Zwar wird durch den zeitlich-versetzten wöchentlichen Probenahmetakt versucht, ein möglichst breites Spektrum verschiedener Rohmaterialzusammensetzung zu repräsentieren, allerdings müssen die daraus gewonnenen Erkenntnisse eventuell durch weitere Probennahmen und Analysen validiert werden.

Auch die geplante Installation der LIBS-Einheit über ein Förderband und die schnelle Materialanalyse bietet Herausforderungen. Häufig wird das zu analysierendes Material unter LIBS-Systemen nicht bewegt oder nur leicht rotiert. Der Übertrag zu der Analyse auf schnellen Förderbändern führt zu Schwierigkeiten und Anpassungen. Zudem zeigten LIBS-Analysen Fehlerquellen durch Matrixeffekte, Partikelheterogenität und instrumentelle Schwankungen. Unterschiede in den Mineralmatrizes beeinflussen die Plasmaeigenschaften erheblich, was zu variablen spektralen Reaktionen führt und die quantitative Analyse erschwert. Zusätzlich muss geprüft werden, welche Anzahl an LIBS-Spektren des Materialstroms benötigt wird, um eine repräsentative Abschätzung der Elementzusammensetzung des Rohmaterials zu erhalten. Da bei LIBS ein deutlich kleineres Probenvolumen analysiert wird, verglichen mit dem Gesamtvolumen des anfallenden Materialstroms (Haufwerke/Kübelfüllungen), müssen ggf. mehrere LIBS-Spektren aufgenommen und zugehörige Elementgehalte gemittelt werden.

4 DANKSAGUNG

Das Projekt KIA wurde im Rahmen des Programms KI Produktionsnetzwerk Augsburg mit der Förderkennzahl FOP-004-DV gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

Andrade, D. F., Pereira-Filho, E. R., & Amarasiriwardena, D. (2021). Current trends in laser-induced breakdown spectroscopy: a tutorial review. *Applied Spectroscopy Reviews*, 56, 98-114.

Andrande, J. F., Cordoba, R. E., & Schalch, V. (2024). A review of leaching testing methods and identification of key pollutants in leachate from construction and demolition waste. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 9637-9654.

Barbudo, A., Galvin, A. P., Agrela, F., Ayuso, J., & Jimenez, R. (2012). Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Waste Management*, 32, 1229-1235.

Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V. (2024). 14. Monitoring Bericht. *Kreislaufwirtschaft Bau Mineralische Bau- und Abbruchabfälle*, 1-16.

Kishore, K., Sheikh, M. S., & Hadi, M. N. (2025). A critical analysis of electric arc furnace (EAF) slag for sustainable geopolymer concrete production. *Materials Today Sustainability*, 29.

Li, J., Kosugi, T., Riya, S., Hashimoto, Y., Hou, H., Terada, A., & Hosomi, M. (2017). Use of batch leaching tests to quantify arsenic release from excavated urban soils with relatively low levels of arsenic. *J. Soils Sediments*, 17, 2136-2143.

Mombelli, D., Mapelli, C., Barella, S., Gruttadauria, A., Le Saout, G., & Garcia-Diaz, E. (2014). The efficiency of quartz addition on electric arc furnace (EAF) carbon steel slag stability. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 586-596.

Mombelli, D., Mapelli, C., Gruttadauria, A., Baldizzone, C., Magni, F., Levrangi, P. L., & Simone, P. (2012). Analysis of Electric Arc Furnace Slag. *Steel Research*, 83, 1012-1019.

Tang, H., Zhang, T., Yang, X., & Li, H. (2015). Classification of different types of slag samples by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) coupled with random forest based on variable importance (VIRF). *Analytical Methods*, 7, 9171-9176.

KONTAKT

M.Sc Kai Ernst
kai.ernst@uni-a.de
+49 821 598 69208
Lehrstuhl für Resource and Chemical Engineering
Institut für Material und Resource Management, Universität Augsburg

Zirkulär bauen: Bestand erhalten, Kreisläufe schließen

Christina Dornack[1,2], Claudia Kemfert[1,3], Mechthild Baron[1], Leonie Dahlmann[1,2], Hermann Keßler[1], Julia Michaelis[1], Eva-Maria Schatz[1], Ina Sieber[1,3,4] & Bendix Vogel[1,5]
[1)] Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin, Deutschland
[2)] Technische Universität Dresden, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Deutschland
[3)] Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Deutschland
[4)] Universität Kassel, Institute for Sustainability, Deutschland
[5)] Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, Deutschland

KURZFASSUNG: Dieser Text ist Teil der Stellungnahme des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU, 2026). Der Bau- und Gebäudebereich muss die Nachfrage nach Wohnraum nachhaltig bedienen, dabei jedoch seinen ökologischen Fußabdruck verkleinern. Hierfür stellt zirkuläres Bauen einen wichtigen Ansatz dar. Konzepte der Kreislaufwirtschaft, die in anderen Wirtschaftsbereichen immer stärker zum Tragen kommen, werden hier noch zu wenig realisiert. Zirkuläre Baumaßnahmen können den Verbrauch an Rohstoffen, Energie und Fläche mindern und langfristig Kosten senken. Für eine breite Umsetzung bedarf es eines Paradigmenwechsels, der neben ökologischen Aspekten auch Fragen nach dem gesellschaftlichen Wert der gebauten Umwelt, der Wirtschaftlichkeit und den rechtlichen Voraussetzungen aufwirft. Veränderungen lassen sich entlang von fünf Ansatzpunkten erreichen: digitalisieren, qualifizieren, fördern, Kreisläufe schließen sowie das Leitbild leben.

1 WAS KREISLAUFWIRTSCHAFT IM BAU BEDEUTET

Bestand erhalten, Neubaubedarf mindern: Der Neubau von Gebäuden ist mit hohen Energie- und Ressourcenverbräuchen sowie Treibhausgasemissionen verbunden. Daher gilt es auch hier, die oberste Stufe der Kreislaufhierarchie – das Vermeiden – zu priorisieren. Es kann nicht nur ökologischer, sondern auch ökonomischer sein, ein bestehendes Gebäude zu sanieren als es abzureißen und neu zu bauen. Dies wird auch in der Politik anerkannt, zum Beispiel zielt auch die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie auf Bestandserhalt ab.

Sekundärbauprodukte einsetzen: Die zunehmende Verwendung gebrauchter Baustoffe, -materialien und -teile kann den Primärrohstoffverbrauch und damit auch den ökologischen Fußabdruck von Baumaßnahmen erheblich vermindern. Dabei sollten nicht nur Sekundärbaustoffe aus dem Recycling wie aufbereiteter Gips oder Gesteinskörnungen aus Beton und Ziegel zum Einsatz kommen. Zudem können hochwertige sekundäre Baumaterialien, beispielsweise Stahlprofile oder Bauteile wie Betondecken, Fenster, Türen und Treppen, wiederverwendet werden.

Um- und Rückbau mitdenken: Damit es in Zukunft leichter wird, Gebäude flexibel weiterzunutzen und Bauprodukte im Kreislauf zu halten, sollte von vornherein nach zirkulären Prinzipien geplant und gebaut werden. Hierfür eignen sich standardisierte, wartungsfreundliche und trennbare Konstruktionen sowie langlebige, idealerweise schadstofffreie und recyclingfähige bzw. wiederverwendbare Bauprodukte (s. Abb. 1). Von Bedeutung sind standardisierte Herstellerangaben und eine digitale Dokumentation der eingesetzten Produkte.

2 WARUM ZIRKULÄRES BAUEN GROßE CHANCEN BIRGT

Die massiven Umweltschäden, die mit dem Bauen verbunden sind, können und müssen gemindert werden. Die Umweltwirkungen ziehen sich durch den gesamten Prozess von Rohstoffgewinnung, Errichtung, Betrieb und Instandhaltung von Gebäuden bis hin zum Abbruch und der Deponierung von Bauabfällen. Mehr als ein Drittel des Rohstoffbedarfs in Deutschland entsteht im Hoch- und Tiefbau. Der Bau- und Gebäudebereich verursacht mehr als die Hälfte des

jährlichen Abfallaufkommens und einen Großteil des Flächenverbrauchs. 8 % der deutschen Treibhausgasemissionen entfallen auf die inländische Baustoffproduktion. Durch Effizienzsteigerungen sinken der Gebäudeenergieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen bereits zunehmend. Durch zirkuläres Bauen lassen sich zusätzlich die grauen Emissionen mindern, die außerhalb der Betriebsphase entstehen.

Zirkuläres Bauen kann die negativen Umweltwirkungen des Bauens erheblich verringern. Ökobilanzen können die Entscheidung unterstützen, ob Gebäude erhalten oder rückgebaut werden sollen. Werden mehr Sekundärbauprodukte eingesetzt, verringert sich der Bedarf an Rohstoffen und Produkten, die neu abgebaut oder hergestellt werden müssen, ebenso wie die Abfallmenge.

Die ökonomischen Chancen des zirkulären Bauens werden häufig unterschätzt. Zirkuläres Bauen kann langfristig rentabel sein, da die Kosten für Instandhaltung und Umbau geringer sind als bei konventioneller Bauweise. Pioniere haben bereits neue Geschäftsmodelle entwickelt, etwa um wertvolle Rohstoffe aus nicht mehr genutzten Gebäuden wieder in den Markt zu bringen. Dabei sind digitale Tools für Planung und Dokumentation sowie digitale Marktplätze essenziell. Zirkuläres Bauen kann ein starker Treiber für Innovation und Modernisierung des Bausektors werden.

Kreislaufgerechtes Bauen bietet gesellschaftlichen Nutzen. Die gebaute Umwelt muss sich an dynamische gesellschaftliche Entwicklungen anpassen. Der demografische Wandel führt zu einer steigenden Nachfrage nach barrierearmen, flexibel nutzbaren Wohnungen und nach Wohnraum für kleine Haushalte. Gerade in wachsenden Städten und Ballungszentren nimmt gleichzeitig der Bedarf an zusätzlichen Wohnflächen zu. Kreislaufgerecht konzipierte Gebäude oder Umbauten bieten Anpassungsfähigkeit, zum Beispiel durch modulare Bauweise. Werden Bauprodukte schadstofffrei gestaltet, um sie hochwertig wiederverwenden zu können, hat dies auch positive Auswirkungen auf die Luftqualität in Innenräumen und damit auf die menschliche Gesundheit. Darüber hinaus hat der Gebäudebestand eine hohe baukulturelle Bedeutung und prägt die Identität von Menschen. Zirkuläres Bauen unterstützt den Erhalt vorhandener Bausubstanz und greift lange etablierte, teils in Vergessenheit geratene Praktiken der Baukultur wieder auf.

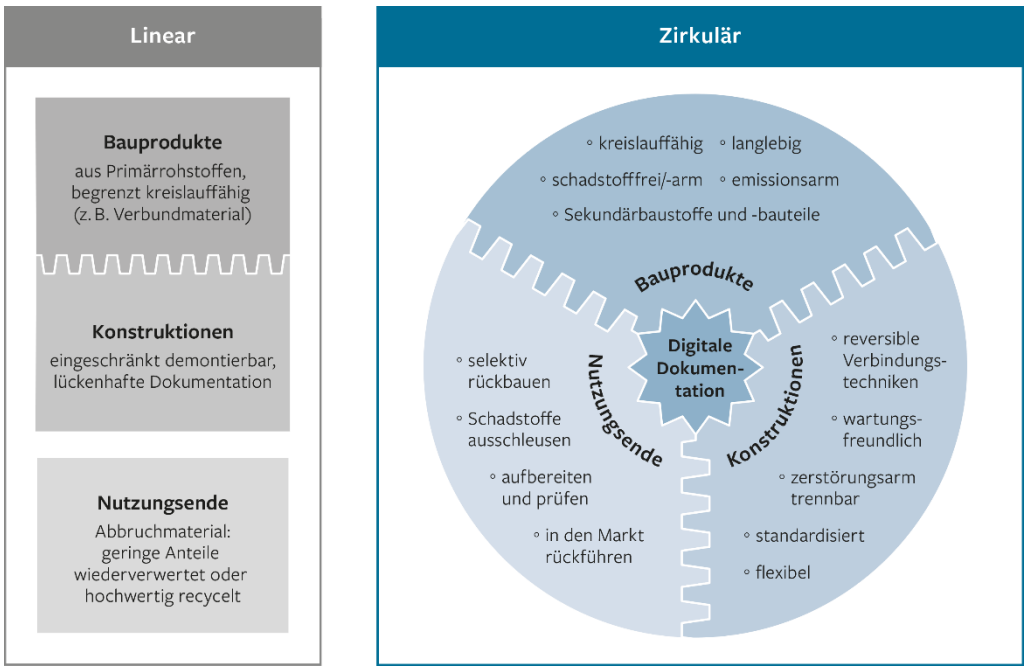


Abb. 1: Lineare versus kreislaufgerechte Merkmale für Bauprodukte, Konstruktionen und Nutzungsende (SRU, 2026).

3 WARUM ZIRKULÄRES BAUEN ZU WENIG IN DIE UMSETZUNG KOMMT

Baupolitik und Bauwirtschaft stehen unter Druck. Prioritäres politisches Ziel ist es, in Regionen mit hoher Nachfrage bezahlbaren Wohnraum bereitzustellen. Gleichzeitig sind die Flächen für Neubau knapp, die Baukosten steigen, Fachkräfte fehlen und die Treibhausgasemissionen sind zu hoch. Die Kreislaufwirtschaft im Bau zu fördern ist vor diesem Hintergrund besonders herausfordernd.

Kreislaufgerechtes Bauen kann zunächst höhere Investitionen erfordern. Kostenvorteile zeigen sich oft erst, wenn sie über den Lebenszyklus abgeschätzt und berücksichtigt werden. In der Praxis wird diese Perspektive bisher selten eingenommen. Zudem bilden Marktpreise nicht den vollen ökologischen und gesellschaftlichen Nutzen des zirkulären Bauens ab.

Bestehendes Recht erschwert die Wiederverwendung von Bauprodukten. Nach ihrer Demontage werden Bauprodukte rechtlich häufig zunächst als Abfall behandelt und es ist aufwendig, diese Einstufung zu ändern. Sekundärbauprodukte sind zudem im Bauproduktenrecht noch unzureichend erfasst und können daher kaum nach DIN-Normen oder CE-Kennzeichnungen zertifiziert werden. Daher muss im Regelfall jedes Sekundärbauprodukt einzeln darauf geprüft werden, ob es sich für die erneute Verwendung eignet. Darüber hinaus entspricht ihr Einsatz häufig nicht dem Stand der Technik, was rechtlich pauschal als Mangel an Bauplan und Ausführung gewertet wird. Dies hemmt die Bereitschaft, Sekundärbauprodukte in Planung und Umsetzung zu berücksichtigen und diese zu versichern.

Zirkuläres Bauen hinterfragt eingespielte, lange praktizierte Herangehensweisen. Baumaßnahmen sind häufig komplex und erfordern die Kooperation von Akteuren mit unterschiedlichen Perspektiven und Interessen. Hier haben sich in Industrie, Gewerbe und Handel, Planung sowie

Verwaltung über Jahrzehnte Standards und Routinen herausgebildet, die sich verändern müssen, um mehr Kreislaufführung zu ermöglichen.

Im Bau- und Gebäudebereich besteht die Sorge, dass komplexe zusätzliche Regulierungen drohen. Aus guten Gründen bestehen im Baubereich zahlreiche Vorschriften, etwa zum Schall- und Brandschutz, zum Denkmalschutz und zur Energieeffizienz. Genehmigungsprozesse sind oft langwierig, denn unter anderem führen die vielen Vorgaben oft zu unvollständigen bzw. mangelhaften Bauanträgen, zudem fehlen Fachkräfte in Behörden. Daher besteht bei manchen Akteuren Skepsis gegenüber zusätzlichen regulatorischen Instrumenten zur Förderung des zirkulären Bauens.

Das Bauen im Bestand bringt besondere Herausforderungen mit sich. Aufgrund der Vielfalt der Objekte, der Eigentumsverhältnisse und der Sanierungsanlässe sind individuelle Planungen und Baumaßnahmen notwendig. Häufig ist nicht ausreichend bekannt, welche Bauprodukte im Gebäude wann in welcher Form verbaut wurden, weil Dokumentationen fehlen. Auch sind die Umbau- und Wiederverwendungsmöglichkeiten bei nicht zirkulär konzipierten Gebäuden oft limitiert.

Angesichts dieser Herausforderungen ist es wichtig, mit gut umsetzbaren Instrumenten funktionierende Lösungen in den Markt zu bringen, ohne einzelne Akteure zu überfordern. Beim zirkulären Bauen sollten Chancen sichtbar gemacht, Innovationen angeregt und erfolgreiche Pionierlösungen, wie beispielsweise modulares bzw. serielles Bauen, gefördert werden.

4 WARUM NICHT NUR IM NEUBAU, SONDERN AUCH IM BESTAND ZIRKULÄR GEBAUT WERDEN SOLLTE

Wenn Zirkularität im Bauwesen bisher eine Rolle spielte, dann vor allem im Neubau. Im Hoch- und Tiefbau kann sie systematisch bereits von der Entwicklung und Planung an mitgedacht und umgesetzt werden. Jedoch gibt es einen Bestand von rund 20 Mio. Wohngebäuden in Deutschland. Dagegen ist der Neubau mit 100.000 Wohngebäuden pro Jahr vergleichsweise klein.

Baumaßnahmen im Bestand sind aufgrund ihrer enormen Menge ein großer Hebel für mehr Zirkularität. Anlässe sind dabei unter anderem die Instandhaltung, Modernisierung oder Umnutzung. Zahlreiche Gebäude werden umgebaut, um sie etwa auf veränderte Wohnbedürfnisse passgenau zuzuschneiden, barrierearm zu gestalten oder ihre Energieeffizienz zu verbessern. Um Emissionen rasch zu mindern und die Klimaziele einzuhalten, müssen sehr viele Gebäude in absehbarer Zeit energetisch saniert werden. Insbesondere in der Sanierung von Großwohnanlagen oder Quartieren lassen sich durch modulare und serielle Baumaßnahmen Kosten- und Zeitvorteile erzielen. Letztlich addiert sich die Vielzahl kleiner Arbeiten in den Bestandsgebäuden zu einem breiten Gesamteffekt.

Die Art und Weise, wie der Bestand umgebaut wird, beeinflusst, wie lange er genutzt werden kann. Baumaßnahmen im Bestand wirken lange nach. Werden sie kreislaufgerecht konzipiert und umgesetzt, können Gebäude idealerweise länger genutzt werden und sind in der Regel zukünftig einfacher umzubauen. Auch können verbaute Rohstoffe besser wiedergewonnen und weitergenutzt werden.

5 WAS KONKRET GESCHEHEN MUSS, UM ZIRKULÄRES BAUEN UND UMBAUEN ZU FÖRDERN

Die Politik kann und sollte den beginnenden Paradigmenwechsel hin zur Zirkularität im Bau- und Gebäudebereich unterstützen. Um eine Vielzahl kleinerer und größerer Veränderungen

anzustoßen, ist eine Bandbreite an Instrumenten notwendig, die die verschiedenen Akteure anspricht. Der SRU hat hierfür fünf Ansatzpunkte identifiziert (s. Abb. 2):

Digitalisieren – Standards schaffen: Standardisierte Informationen über Produkte und Gebäude, die den Akteuren unkompliziert zur Verfügung stehen, sind die Basis für zirkuläres Bauen. Digitale Anwendungen erleichtern den Informationsfluss im Bauablauf und ermöglichen es, Bauprodukte nachzuverfolgen sowie eine Logistik für den Handel mit gebrauchten Bauprodukten aufzubauen. Dringend erforderlich sind europäische Standards für digitale Dokumentationsstrukturen für Gebäude und niederschwellige Umsetzungshilfen, wie beispielsweise eine frei zugängliche Software für Gebäuderessourcenpässe. Die Dokumentation am Ende einer Baumaßnahme muss angereizt und zumindest für öffentliche Neubauvorhaben verpflichtend werden. Der Bund sollte digitale Datenbanken, Plattformen und die Entwicklung digitaler Tools mit kompatiblen Schnittstellen für kreislaufgerechte Baumaßnahmen, gerade auch für den Gebäudebestand, weiterhin intensiv unterstützen.

Qualifizieren – Wissen vermitteln: Das Wissen und die Fertigkeit zum kreislaufgerechten Planen und Bauen sollte sich als Standardkompetenz der nachhaltigen Entwicklung in der gesamten Wertschöpfungskette im Bau- und Gebäudebereich etablieren. Hierzu müssen Inhalte zu ressourcenschonenden und kreislaufgerechten Bauweisen flächendeckend in Lehrpläne für handwerkliche Ausbildungen und baufachliche Studiengänge integriert werden. Weiterbildungsangebote für die Praxis sollten gefördert werden und alle Akteure in planender, ausführender und beratender Funktion ansprechen. In der Verwaltung sollte der Bund eine breit angelegte Qualifizierungsoffensive initiieren, um öffentliche Entscheidungsträger für die Beurteilung kreislaufgerechter Bauweisen besser und abteilungsübergreifend zu schulen.

Fördern – Anreize setzen: Der Bund sollte den Bestandserhalt stärken und Förderprogramme für Umbaumaßnahmen auch an Kriterien der Kreislaufwirtschaft ausrichten. Bei energetischer, altersgerechter oder serieller Sanierung bzw. Modernisierung sollten Zirkularitätsanforderungen als Voraussetzung der Förderung ergänzt oder besonders honoriert werden. Der Einsatz kreislaufgerechter Bauprodukte könnte preislich angereizt werden, zum Beispiel mit einer Primärbaustoffsteuer oder auch gezielten Mehrwertsteuersenkungen für Sekundärbauprodukte. Auch eine wirksamere CO_2-Bepreisung von Bauprodukten kann sekundäre oder kreislaufgerechte Bauprodukte im Vergleich zu emissionsintensiveren Primärbauprodukten attraktiver machen. Dies sollte durch den Ausbau von Aufbereitungsinfrastrukturen und Baustoff- sowie Bauteilbörsen begleitet werden. Die Finanzierung ließe sich zum Beispiel durch grüne Pfandbriefe (Green Bonds) für zirkuläre Baumaßnahmen sowie bei öffentlichen Haushalten durch Abschreibungen, die Restwerte von Gebäuden berücksichtigen, erleichtern.

Kreisläufe schließen – rechtlich steuern: Bauprodukte sollten kreislaufgerecht eingesetzt werden und im Anschluss an ihre erste Nutzungsphase in den Kreislauf zurückkehren. Um die Sekundär- und Primärbauprodukte gleichzustellen, ist es notwendig, die Normierung von Anforderungen an Sekundärbauprodukte auf europäischer und deutscher Ebene voranzubringen. Zugleich sollte ihr Einsatz im privaten Baurecht vereinfacht werden. Der SRU empfiehlt, die erweiterte Herstellerverantwortung künftig auch national auf Bauprodukte auszuweiten, um unter anderem Anreize für ein umweltfreundliches Produktdesign zu schaffen. Mögliche Elemente sind Kriterien zur Kreislaufgerechtigkeit, transparent ausgewiesene Gebühren und kollektive Rücknahmesysteme. Für den Gebäudeabbruch sollten Pflichten zur Schadstoffbegehung und Rückbauplanung eingeführt werden, um die Qualität von Sekundärbaustoffen und ihre Verfügbarkeit zu verbessern. Neue Regelungen zum Ende der Abfalleigenschaft für Sekundärbaustoffe sind notwendig, um den hochwertigen Einsatz von Sekundärbaustoffen im Hoch- und Tiefbau zu ermöglichen.

Leitbild leben – öffentliche Hand als treibende Kraft: Bund, Länder und Kommunen können bei der Vergabe von Bauleistungen Maßstäbe setzen, die auch als Blaupause für private

Bauvorhaben dienen. Die Pflicht zur umweltfreundlichen Beschaffung schließt auch Kreislaufgerechtigkeit ein. Ausschreibungen der öffentlichen Hand sollten dementsprechend kreislaufgerechte und sekundäre Baustoffe aktiv nachfragen und bei bauphysikalischer und bautechnischer Gleichwertigkeit bevorzugen. Auch Lebenszyklusanalysen, Rückbauplanung und die digitale Dokumentation der Baumaßnahmen gehören in die Planungsanforderungen. Bei der Vergabeentscheidung sollte die öffentliche Hand auch die Klimawirkung der Angebote berücksichtigen. Hierfür könnten zum Beispiel möglichst niedrige Klimafolgekosten ein Zuschlagskriterium darstellen. Nach dem Vorbild einiger europäischer Staaten wie Frankreich, Dänemark oder den Niederlanden sollte Deutschland die Anforderungen der EU-Gebäuderichtlinie (EU) 2024/1275 frühzeitig und proaktiv umsetzen, zum Beispiel in Form eines CO_2-Grenzwerts für das Treibhausgaspotenzial pro Quadratmeter (kg CO_2-Äquivalente pro m² Nutzfläche im Neubau).

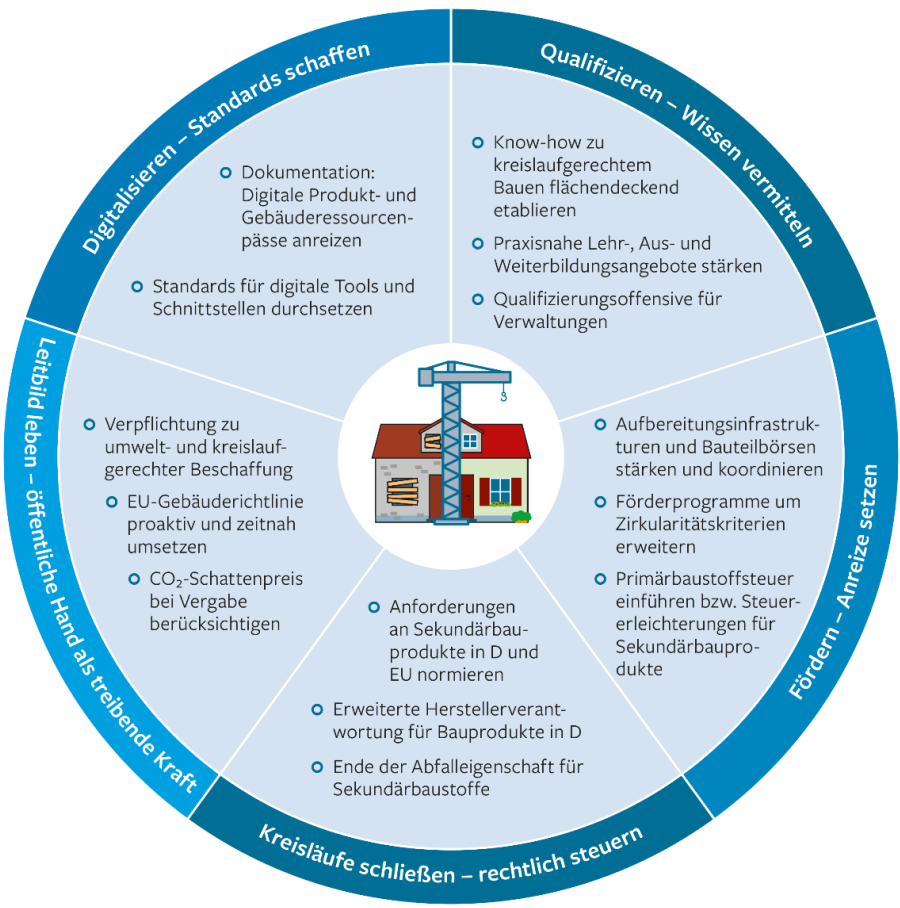


Abb. 2: Empfehlungen für mehr Kreislaufgerechtigkeit im Bau- und Gebäudebereich (SRU, 2026)

LITERATURVERZEICHNIS

SRU 2026. Sachverständigenrat für Umweltfragen. *Zirkulär bauen: Bestand erhalten, Kreisläufe schließen. Stellungnahme.* Berlin: SRU. Von https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2024_2028/2026_04_Zirkulaer_bauen_Download.pdf abgerufen

From Mineral Signals to automated Rock Classification: Circular Use of excavated Materials using multimodal Raman Spectroscopy

Martin J. Findl[1], Sai P.R. Gottam[2], Daniel Schneider[3], Daniel E. Sandu[4], Elmar Rueckert[2], Robert Galler[3], Roland Pomberger[1] & Klaus P. Sedlazeck[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] Technical University of Leoben, Chair of Cyber-Physical-Systems, Leoben, Austria
[3)] Technical University of Leoben, Chair of Subsurface Engineering, Leoben, Austria
[4)] AiDEXA GmbH, Graz, Austria

ABSTRACT: Austria generates around 38 million tonnes of excavated material annually, a considerable share of which is still landfilled despite its utilization potential. Automated material identification is a key prerequisite for increasing the use of excavated materials within a circular economy. This paper presents the methodological framework of a Raman-based approach developed within the NNATT project for automated mineral and rock identification. The method combines complementary spectral similarity measures with a multi-stage threshold optimization and a statistical estimation of the minimum number of Raman measurements required for reliable rock confirmation. In addition, a multimodal Raman approach is introduced that jointly evaluates one-dimensional spectra and two-dimensional Raman image data acquired at the same measurement point. Further, a preliminary benchmarking of several machine and deep learning architectures on laboratory Raman data indicates that both spectral and spatial representations, and in particular their multimodal combination, are suitable to this classification task. The proposed methodology and data-driven models provide a robust foundation for automated sensor-based classification of tunnel spoil and excavated soil materials under conveyor belt conditions.

1 INTRODUCTION

Excavated material from civil engineering and tunnelling projects represents by far the largest waste stream in Austria. In the reference year 2023, excavated material accounted for around 57 % of Austria's total waste volume of 38 million tonnes (BAWP 2023). Of these roughly 35 million tonnes of uncontaminated excavated soil material, around 62 % is currently landfilled, even though a considerable proportion of it would in principle be suitable for material utilization (Bundes-Abfallwirtschaftsplan, 2023).

Legally, a material only ceases to be classified as waste once the requirements in the Austrian Waste Management Act (Abfallwirtschaftsgesetz, 2002) and the (Abfallrahmenrichtlinie, 2008) are met. A comparatively low contribution under the Contaminated Sites Remediation Act (Altlastensanierungsgesetz, 2024) further favors landfilling over more elaborate processing. This results in a structural conflict between resource utilization and disposal obligations.

Against this background, the NNATT project (Sustainable Use of Excavated Materials from Civil and Tunnel Engineering) develops an automated classification framework for excavated materials by combining Near Infrared spectroscopy (NIR) and Raman hyperspectral imaging with laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). The resulting sensor data are stored in a dedicated database and used to train and validate machine and deep learning-based classification models. The present paper focuses on the Raman spectroscopic sub-area of this project and presents the methodological approach for conveyor-belt-based mineral and rock identification and classification. Raman spectroscopy is well suited for this purpose, as it provides a characteristic molecular fingerprint of a material (Carey et al., 2015; Haskin et al., 1997), while high-speed Raman

imaging enables the short integration measurement time required for on-line and in-line process monitoring (Li et al., 2023).

2 METHODOLOGICAL APPROACH

The automated classification of excavated material based on Raman spectroscopy is challenged by the heterogeneous mineralogical composition of rocks and by variations in measurement conditions such as surface roughness or conveyor belt operation.

2.1 Similarity measures

The proposed methodology therefore evaluates the similarity between measured Raman data and reference data under varying conditions. Based on this similarity assessment, Raman measurements are assigned to predefined rock types, while individual mineral phases are identified through comparison with the RRUFF reference library and experimentally acquired Raman data. The study focuses on three rock types relevant for tunnelling and civil engineering: granite, sandstone and limestone. To ensure reliable discrimination between rock types, the reference database was extended with experimentally acquired Raman reference spectra of additional rock types and mineralogically similar materials. The experimental framework investigates different conveyor belt loading scenarios, acquisition conditions under static (conveyor belt at rest) and dynamic (conveyor belt in motion) conditions, and Raman data representations (1D versus 2D Raman data), each acquired at 30 frames per second scanning. Fig. 1 shows example 1D and 2D Raman data.

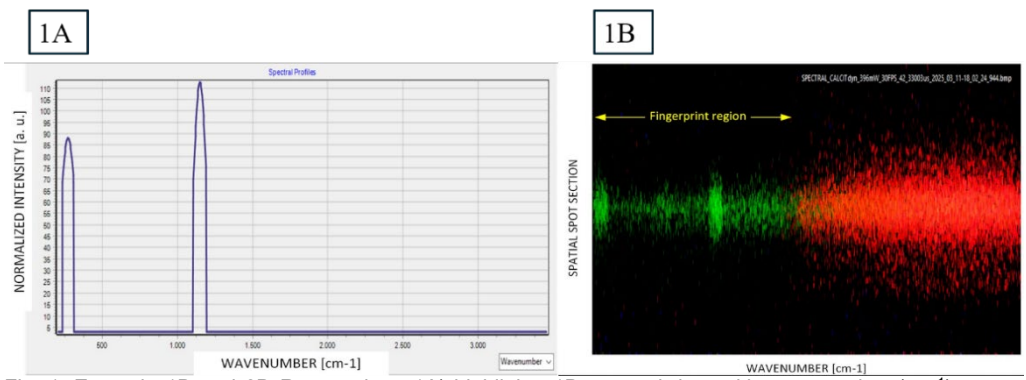


Fig. 1: Example 1D and 2D Raman data. 1A) highlights 1D spectral data with wavenumber (cm^{-1}) versus normalized intensity (a.u.) and 1B) shows 2D spectral data with wavenumber (cm^{-1}) versus spatial spot section. The green colored area is defined as fingerprint region and the red colored area falls into the silent and high-wavenumber region.

Besides conventional one-dimensional Raman spectra, two-dimensional Raman image data and a multimodal combination of both representations are evaluated to assess their suitability for automated classification. Identification is performed by comparing measured Raman data with material-specific Raman reference data using multiple complementary similarity measures (Tab. 1). Material-specific decision thresholds are determined based on statistical performance criteria. Furthermore, the methodology estimates the number of Raman measurements required for reliable rock assignment under conveyor belt conditions.

Tab. 1: Provides an overview of the similarity measurements conducted under two conveyor belt sample loading configurations: line arrangement, where samples were placed sequentially in a single line on the conveyor belt, and full loading, where the conveyor belt was completely covered with samples, preventing the sensor from capturing the conveyor belt background. Data acquisition was performed under both static (conveyor belt at rest) and dynamic (conveyor belt in motion at 0.04, 0.10, and 0.14 m s^{-1}) conveyor belt conditions. Each condition was acquired at 30 frames per second scanning.

Data type	**Belt loading group**	**Acquisition mode scenarios reference vs. real data**	**Rock types**
1D spectra	Line arrangement / full loading	Static-static, static-dynamic, dynamic-dynamic	Granite, sandstone, limestone
2D image data	Line arrangement / full loading	Static-static, static-dynamic, dynamic-dynamic	Granite
1D and 2D data	Line arrangement / full loading	Static-static, static-dynamic, dynamic-dynamic	Granite

2.2 Machine and Deep learning models

To complement the methodological framework, a preliminary benchmarking study was carried out on Raman data acquired under controlled laboratory conditions, in order to assess how different machine and deep learning models and data representations perform and to inform the selection of a suitable architecture for later deployment under real word excavation conditions (Wang et al., 2020). Three data representations were compared - 1D spectral profiles, 2D Raman image data, and their multimodal combination - on both pure mineral phases and heterogeneous rock samples.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Similarity Measures and Threshold Optimization

The similarity-based decision scheme was additionally evaluated for individual similarity measures - with Pearson correlation, Dynamic Time Warping (DTW) and cosine similarity - and their weighted combination, including material-specific thresholds optimized per experimental run using established quality metrics. The corresponding quantitative evaluation is currently being carried out. Detailed results - covering the per-measure performance of Pearson correlation, DTW and cosine similarity, the number of measurements required per rock piece, and the comparison between the multimodal and single-modality approaches is in progress.

3.2 Benchmarking of Model Architectures

Machine and deep learning methods have shown strong potential for automating Raman spectral analysis (Cai et al., 2022; Carey et al., 2015). Five architectures were evaluated: a Random Forest baseline Classifier, a multilayer perceptron (MLP), a 1D convolutional neural network (1D-CNN), a ResNet-18 image classifier (He et al., 2016) operating on the 2D representation, and a multimodal late-fusion model combining the 1D branches with 1D-CNN or MLP and the 2D data with a deep convolutional neural network. All models were trained on the mineral data set; the image-based and multimodal models were additionally evaluated on the rock data set. Tab. 2 summarizes the architectures and their qualitative performance.

Tab. 2: Overview of the benchmarked model architectures and data representations.

Model architecture	Data input	Complexity	Accuracy mineral (%)	Accuracy rock (%)
Random Forest Classifier (baseline)	1D profile	Low (ensemble)	99.96	-
MLP	1D profile	Medium	99.10	-
1D-CNN	1D profile	Low	80.92	-
ResNet-18	2D image	High (deep CNN)	>99.9	99.77
Multimodal fusion	1D + 2D (hybrid)	High	99.85	99.98

On the pure mineral phases, the spectral fingerprints proved highly discriminative: the Random Forest baseline Classifier, the MLP and the ResNet-18 classifier all reached near-perfect accuracy, whereas the simple 1D-CNN underperformed due to its limited capacity. On the more challenging rock data, the image-based and multimodal models remained robust by exploiting texture and mineral associations in addition to the spectral signal. The overall high accuracy levels could be partly a consequence of the controlled laboratory conditions and high signal quality.

4 SUMMARY AND OUTLOOK

This work presents a methodological framework for the automated identification of minerals and rocks from Raman data under conveyor belt conditions across 1D spectral, 2D image and multimodal data representations. The approach combines complementary similarity measures with material-specific thresholds and bootstrap analysis to determine the measurements required for reliable classification. Furthermore, several machine and deep learning models were benchmarked to evaluate their suitability. In the long term, the method could enable on-line and/or in-line characterization of excavated materials and, combined with NIR spectroscopy and LIBS, support multimodal material classification for a resource-efficient circular economy in civil and tunnel engineering.

REFERENCES

Abfallrahmenrichtlinie - Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (2008).

Abfallwirtschaftsgesetz (2002).

Altlastensanierungsgesetz (2024). https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010583

Bundes-Abfallwirtschaftsplan (2023).

Cai, Y., Xu, D., & Shi, H. (2022). Rapid identification of ore minerals using multi-scale dilated convolutional attention network associated with portable Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *267*, 120607. https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120607

Carey, C., Boucher, T., Mahadevan, S., Bartholomew, P., & Dyar, M. D. (2015). Machine learning tools for mineral recognition and classification from Raman spectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*, *46*(10), 894–903. https://doi.org/10.1002/jrs.4757

Haskin, L. A., Wang, A., Rockow, K. M., Jolliff, B. L., Korotev, R. L., & Viskupic, K. M. (1997). Raman spectroscopy for mineral identification and quantification for in situ planetary surface analysis: A point count method. *Journal of Geophysical Research: Planets*, *102*(E8), 19293–19306. https://doi.org/10.1029/97JE01694

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep Residual Learning for Image Recognition. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 770–778. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90

Li, R., Li, A., Su, Y., Qiu, L., & Zhao, W. (2023). Fast in-situ imaging method using non-axial scanning confocal Raman microscope. *Optics and Lasers in Engineering*, *167*, 107604. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107604

Wang, Y., Liang, B., Ding, M., & Li, J. (2020). Dual-branch dense residual network for hyperspectral imagery classification. *International Journal of Remote Sensing*, *41*(7), 2581–2602. https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1693078

Analyse der Wiener Bioabfallwirtschaft unter Berücksichtigung der soziologischen, rechtlichen, ökonomischen und technischen Faktoren

Wojciech Rogalski[1]
[1)] Universität für Bodenkultur, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Dieser Beitrag zeigt, wie die getrennte Sammlung von Bioabfällen unter dicht besiedelten städtischen Bedingungen effektiv gestaltet und optimiert werden kann. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass die Reinheit der getrennt gesammelten Bioabfälle ein entscheidender Faktor für das spätere Recycling ist. Basierend auf langjährigen empirischen Daten der Stadt Wien wurden realistische Potenziale der getrennten Sammlung hochwertiger Bioabfälle quantifiziert. Dies deutet auf eine maximal erreichbare Sammelrate von ca. 24 kg/E*a unter dicht besiedelten städtischen Bedingungen hin. Die präsentierten Ergebnisse und Schlussfolgerungen dieses Beitrags basieren auf über 35 Jahren Berufserfahrung in der kommunalen Abfallwirtschaft in Wien und werden durch die Ergebnisse zahlreicher Studien unter der Leitung des Autors dieses Artikels untermauert. Die Daten aus den durchgeführten Studien wurden miteinander verknüpft, durch demografische und sozioökonomische Informationen sowie durch eigene Erkenntnisse ergänzt. Die Analyse legt besonderen Wert auf die Identifizierung wiederkehrender Fehler und suboptimaler Entscheidungsmuster im urbanen Bioabfallmanagement. Durch die systematische Untersuchung solcher Mängel liefert der Artikel übertragbare Erkenntnisse, die die frühzeitige Risikoerkennung und -vermeidung in anderen Städten unterstützen. Es werden Methoden vorgestellt, die in Wien praktisch erprobt wurden und sich anschließend für die erfolgreiche Einführung und langfristige Fortführung eines modernen Bioabfallmanagementsystems in großen Metropolregionen mit mehr als 500.000 Einwohnern anwenden lassen.

1 EINFÜHRUNG

Bioabfälle machen einen erheblichen Anteil des Siedlungsabfalls aus und stellen eine wertvolle Ressource für die Kompostierung und Biogasproduktion dar (mit bzw. ohne Kompostierung des Gärrestes). Laut Abfallanalyse Wien 2022/2023 machen Bioabfälle fast 40 % des Siedlungsabfalls aus (City of Vienna MA 48, 2026). Weltweit erzeugen insbesondere Entwicklungsländer mehr als 50 Prozent Bioabfall. In der Europäischen Union stellt Bioabfall mit einem Anteil von 34 % einen dominanten Bestandteil des kommunalen Abfalls dar (Jan Slavik, Martin Dolejs et al, 2021). Laut Eurostat produzierte jede/r europäische BürgerIn im Jahr 2016 durchschnittlich 480 kg/E*a Siedlungsabfall, wovon 46 % recycelt oder kompostiert wurden, während ein Viertel auf Deponien landete. (Marta Rossi, Alessandra Papetti et al, 2022). Bioabfälle machen etwa 40 % der in der EU anfallenden kommunalen Festabfälle aus.(D. Bernard-Beltran, 2014).

Die EU-Abfallgesetzgebung sieht keine expliziten Quoten für die getrennte Sammlung von Bioabfällen vor. Solche Quoten sind jedoch implizit erforderlich, um die verbindlichen Ziele für das kommunale Abfallrecycling von 60 % bis 2030 und 65 % bis 2035 zu erreichen. (EU Legislation, 2018). Diese Ziele können nicht erreicht werden, ohne den Anteil an Bioabfällen im Restmüll erheblich zu reduzieren. Gleichzeitig stellt die EU-Gesetzgebung strenge Anforderungen an die materielle Verwertung von Bioabfällen (EU Legislation, 2008). Bei der anaeroben Vergärung gilt Bioabfall nur dann als stofflich verwertet (recycelt), wenn der entstehende Gärrest anschließend kompostiert wird (EU Legislation GREEN PAPER, 2008).

In der Praxis wird diese Anforderung häufig aufgrund unzureichender Gärrestqualität, die primär durch die Qualität der getrennt gesammelten Bioabfälle (insbesondere Küchenabfälle und Speisereste) bestimmt wird, nicht erfüllt. Dies führt zu einem strukturellen Widerspruch: Seit dem 31. Dezember 2023 müssen Bioabfälle ungeachtet der Qualität getrennt gesammelt werden

(Richtlinie 2008/98/EG, Artikel 22) (EU Legislation, 2018) während nur qualitativ hochwertiger Bioabfall die Einhaltung der EU-Verwertungsdefinitionen ermöglicht.

Als Voraussetzung für eine optimierte Bioabfallverwertung wurden wichtige Determinanten für den Erfolg der Sammlung identifiziert, darunter sozioökonomischer Status, Bevölkerungsstruktur, Verhaltensmuster, rechtliche Rahmenbedingungen, Qualitätsaspekte, Gebäudetyp und Haushaltszusammensetzung. Die vorliegende Arbeit untersucht den Einfluss der genannten Faktoren auf Abfallmengen und auf die Beteiligungsquoten an getrennten Sammelsystemen. Zusammenfassend hebt die Arbeit operative, verhaltensbezogene und logistische Herausforderungen hervor, die zur Optimierung der Bioabfallverwertung angegangen werden müssen.

Dieser Artikel identifiziert zudem eine regulatorische Inkonsistenz als zentrales systemisches Hindernis und untersucht den Bedarf an gezielten EU-Rechtsanpassungen, um ein effektives und realistisches Bioabfallmanagement in großen Ballungsräumen zu ermöglichen.
Die Stadt Wien dient hier als Beispiel.

2 BACKGROUND

Städtische Bioabfälle machen einen bedeutenden Anteil des .kommunalen Abfalls aus und stellen eine wertvolle Ressource dar für die Kompostierung dar.

2.1 Der Beginn des Bioabfallmanagements in Wien

Ausgehend von der Erkenntnis, dass nur die getrennte Sammlung von Bioabfällen die Herstellung von schadstoffarmem Kompost ermöglicht, wurden 1986 die ersten Pilotprojekte zur getrennten Sammlung gestartet.(WU-Wien, 1988). Anfang der 1990er Jahre begann die Umstellung der kommunalen Wiener Landwirtschaft auf ökologischen Landbau gemäß der EU-Verordnung. (EU Legislation, 1991). Diese Umstellung war nur möglich, weil stets ausreichend hochwertiger Kompost aus getrennt gesammelten Bioabfällen zur Verfügung stand. Dies ist ein gutes Beispiel für die erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen kommunaler Abfallwirtschaft und urbaner Landwirtschaft innerhalb einer Stadt.

2.2 Der aktuelle Stand des Bioabfallmanagements in Wien

Aktuell (Stand Ende 2025) gibt es in Wien 92.917 Bioabfallbehälter (Biotonnen). Davon befinden sich 91.385 auf Privatgrundstücken (vorwiegend in dünn besiedelten Gebieten), während 1.532 Behälter an öffentlich zugänglichen Altstoffsammelstellen aufgestellt sind. Insgesamt werden rd. 100.000 t/a Bioabfall getrennt gesammelt, davon etwa 64.500 t/a über Bioabfallbehälter und rund 11.700 t/a über 12 kommunale Wertstoffsammelplätze (in Wien „Mistplätze“ genannt).
Die restlichen rd. 23.800 t/a stammen aus Gartenbaubetrieben.

2.3 Überblick über die Entwicklung der organischen Abfallmengen in Wien seit 1986

Die durchschnittliche Menge an organischen Abfällen, die in Wien seit 1994 (Vollziehung der flächendeckenden Bioabfallsammlung) im Bioabfallbehälter gesammelt wurde, beträgt etwa 70.000 t/a (Volk, 2026) mit einer Standardabweichung von etwa 4.000 t/a oder rd. 6%.
Etwa 80 % (nach Masse) des Inhalts von Bioabfallbehältern bestehen aus Gartenabfällen und Grünabfällen aus dem Haushalt. Die restlichen Bestandteile sind: Gemüse, Obst rd. 9 %; Fleisch, Fisch, Knochen: rd. 0,3 %; unverpackte Lebensmittel rd. 5,8 %; verpackte Lebensmittel: rd. 1,6 %; Verunreinigungen und Sonstiges: rd. 3,8 %.(TB Hauer, Pulswerk. FHA Analytik, 2016).
Die Zusammensetzung der Wiener Bioabfälle bleibt seit Jahren konstant.

3 GRUNDSÄTZE EINES ERFOLGREICHEN STÄDTISCHEN BIOABFALLMANAGEMENTS

Aus den praktischen Erfahrungen der Stadt Wien lassen sich folgende Leitprinzipien (Grundsätze) ableiten. Daraus wurden Empfehlungen abgeleitet, die für die Einführung oder Weiterentwicklung eines erfolgreichen Bioabfallmanagementsystems hilfreich sein könnten.
Diese Leitprinzipien sind:

3.3 Die getrennte Sammlung von Bioabfällen mit anschließender biologischer Behandlung hat einen geringeren „ökologischen Fußabdruck“, als die Verbrennung von gemischten Abfällen.

Die getrennte Sammlung und Verwertung von Bioabfällen führt zu geringeren Treibhausgasemissionen als die Sammlung von Bioabfällen zusammen mit Restmüll und anschließende Verbrennung. (V. Uusitalo, L. Abrari et al, 2023). Die Verbrennung von Bioabfällen (weder allein noch als Teil des Hausmülls) ist aufgrund ihres hohen Wassergehalts (über 60 %) und ihres niedrigen Heizwerts (2-6 MJ/kg) (TB Hauer, 2019) nicht sinnvoll.
Daher sollten nur solche organischen Abfallstoffe verbrannt werden, deren schlechte Qualität eine Materialverwertung (Kompostierung oder Biogasproduktion) gänzlich ausschließt.

3.4 “Vegane“ Biotonne

Insbesondere im Hinblick auf die Vermeidung von Geruchsemissionen wird empfohlen, auf die Miterfassung von Fleischabfällen zu verzichten. Gleichzeitig sollte eine vegetarische Ernährung stärker gefördert werden. Neben den ethischen und klimabezogenen Vorteilen bedeutet eine vegetarische Ernährung auch weniger Fleischabfall, was auch aus Sicht der Abfallwirtschaft von Vorteil ist.

3.5 Hochwertige Bioabfälle – Kompost, minderwertige Bioabfälle – Biogas

Hochwertige, getrennt gesammelte Bioabfälle sollten unbedingt kompostiert werden. Vor der Kompostierung kann eine anaerobe Vergärung erfolgen. Die getrennt gesammelten, minderwertigen Bioabfälle eignen sich jedenfalls noch zur Biogaserzeugung. Bei schlechter Qualität des Gärrests ist seine Verbrennung notwendig, auch wenn der niedrige Heizwert für eine autarke Verbrennung nicht ausreicht.
Die europäische Gesetzgebung empfiehlt allerdings eine andere Vorgehensweise.

3.6 Von Anfang an sollen realistische Ansätze verfolgt werden

Die Bioabfall-Sammelleistung in Wien liegt bei ca. 24 kg/E*a (TB Hauer, 2002) bzw. bei ca. 27 kg/E*a (TB Hauer, 1994). Dies gilt auch für andere Großstädte (Berlin: 34 kg/E*a, Köln: 40 kg/E*a, Dresden: 46 kg/E*a Hamburg: 39 kg/E*a, Hannover: 22 kg/E*a, München: 31 kg/E*a) (pers. Interviews des Autors, 2026). Die erreichbaren Mengen sollten von Anfang an realistisch bleiben. Priorität sollte die getrennte Sammlung möglichst vieler hochwertiger Bioabfälle haben und nicht generell die Sammlung möglichst vieler Abfälle ohne Berücksichtigung der Qualität.

3.7 “Low-hanging fruits”

Die Einführung der getrennten Sammlung von Bioabfällen sollte in Gebieten beginnen, in denen große Mengen hochwertigen Materials kostengünstig gesammelt werden können. Dies ermöglicht eine maximale Verwertung bei minimalem Aufwand und dient auch für kontinuierliche Erweiterung der getrennten Sammlung.

Daher sollte die getrennte Sammlung von Bioabfällen in weniger dicht besiedelten Gebieten („Grünabfall“) beginnen. Im Falle eines Ausbaus sollte der Fokus zunächst auf großen Komplexen (in Wien: z.B. „Gemeindebau“) liegen, die noch keine flächendeckende Sammlung haben. Öffentlich zugängliche Bioabfallbehälter sollten möglichst vermieden werden.

3.8 Aktive Information

Es ist wichtig, Unterschiede zwischen Bevölkerungsgruppen wie Generation, Geschlecht, Bildung und Einkommen zu berücksichtigen. Einkommensaspekte können auch für Gruppen von MigrantInnen angewendet werden. Personen mit einer positiven Einstellung zur allgemeinen Abfalltrennung wenden mit größerer Wahrscheinlichkeit auch die Trennung von Bioabfällen an. (E. Celestino, J. M. Palma-Oliviera et al, 2025). Die BürgerInnen müssen die Gründe und Vorteile der getrennten Sammlung von Bioabfällen verstehen können. Gleichzeitig spielt der Einsatz sozialer Kontrollmechanismen eine wichtige Rolle. Die Pro-Kopf-Sammelmenge sinkt umso stärker, je höher der Anteil ausländischer EinwohnerInnen (über 20 %) ist. (TB Hauer, 1994), (TB Hauer, 1997), Dies ist bis zu einem gewissen Grad verständlich, da diese Bevölkerungsgruppe oft mit vielen existenziellen Problemen zu kämpfen hat und „Recycling“ nicht zu den vordergründigen Aspekten gehört. Die negative Haltung der lokalen Bevölkerung führt häufig zusätzlich zur allgemeinen Ablehnung. Es wurde aber auch festgestellt (Christoph Reinprecht, Eva Rossbacher, 2011), dass ausländische StaatsbürgerInnen durchaus dazu bewegt werden können, ihren Müll getrennt zu sammeln, beispielsweise durch die Betonung der Recyclingfähigkeit, Sensibilisierungsmaßnahmen, die Bereitstellung von Broschüren in den jeweiligen Landessprachen (z. B. in Beratungsstellen), die Förderung der Mülltrennung als zentrales Thema in Vereinen und religiösen Einrichtungen (Moscheen), die Ansprache des Themas in Parks durch Beratungsdienste, die Einladung zu offenen Sprechstunden etc. Dies erforderte natürlich größere Anstrengungen.

3.9 Die Effizienz der getrennten Sammlung von Bioabfällen hängt vom Alter der BürgerInnen, vom Alter des Gebäudes, von der Haushaltsgröße und von der Anzahl der Wohnungen ab.

Je jünger die BewohnerInnen, desto höher die Bioabfallmenge, aber desto geringer die Sammelquote. Je älter die Bevölkerung, desto weniger Bioabfall, aber desto höher die Bereitschaft, ihn getrennt zu sammeln. Je älter das Gebäude, desto geringer die Sammelquote.
Je kleiner die Haushaltsgröße und je weniger Wohnungen im Gebäude (Abb. 1), desto besser die Sammelquote. Die Sammelquote sinkt mit der Wohnqualität.

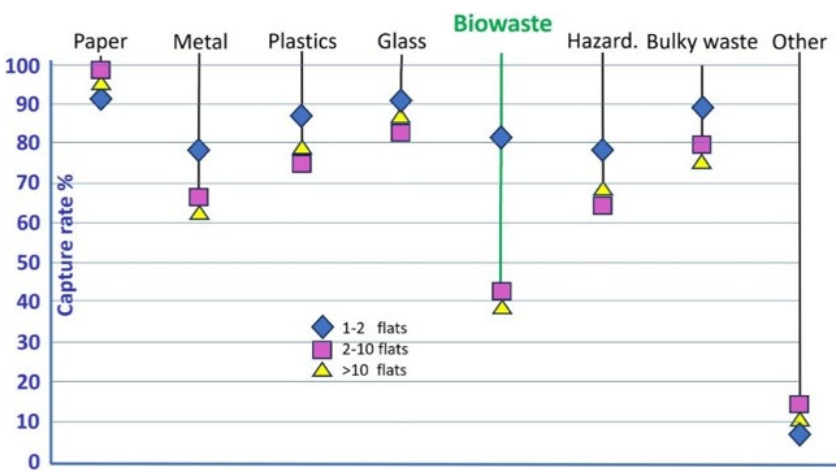


Abb. 1: Zusammenhang zwischen der Anzahl der Wohnungen pro Gebäude und der Erfassungsquote von Recyclingmaterialien (Christoph Reinprecht, Eva Rossbacher, 2011)

3.10 Die getrennte Sammlung von Bioabfällen sollte nicht kostenlos sein.

Die Anwendung des „Pay-as-you-throw"-Verfahrens (PAYT) trägt zur Reduzierung des Abfallaufkommens und zur Steigerung von Menge und Qualität der getrennten Abfallsammlung bei. Kommunen, die PAYT eingeführt haben, weisen eine höhere Quote getrennter Abfallsammlung auf als andere, der Unterschied liegt bei ca.10 % (Giulia Romano, Lucio Masserini et al, 2023).

Das folgende neue Konzept zur sachgerechten Behandlung und Gebührenerhebung (Abb. 2) sieht die Unterteilung der Sammelbehälter in drei Kategorien vor: „Gartenabfallbehälter" (oder „Gartentonnen"), „Küchenabfallbehälter" (oder „Küchentonnen") und „Bioabfallbehälter" (oder „Biotonnen"). Sammelbehälter auf Grundstücken mit eindeutiger Adresszuordnung in Grüngebieten werden zu „Gartentonnen", jene auf innerstädtischen Grundstücken ebenfalls mit eindeutiger Adresszuordnung werden sie zu „Küchentonnen", Sammelbehälter ohne spezifische Adresszuordnung (z. B. auf einer Altstoffsammelinsel) würden als „Biotonnen" bezeichnet. Die „Gartentonne" soll primär für Garten- und Grünabfälle vorgesehen sein, die Einbringung von Küchenabfällen soll jedoch weiterhin zulässig bleiben. Die „Küchentonne" soll primär für (pflanzliche) Küchenabfälle vorgesehen sein, Gartenabfällen wären aber erlaubt. Die öffentlich zugänglichen „Biotonnen" wären für die Einbringung aller pflanzlichen Bioabfälle vorgesehen.

Dieses neue Konzept würde auch die Einführung eines gebührenpflichtigen Modells für Sammelbehälter mit einer bestimmten Adresse ermöglichen. Die Summe der Gebühren für Restmüll und Bioabfall soll jedenfalls niedriger sein, als die Restmüllgebühr ohne Biobehälter.

Die allgemeinen „Biotonnen" an öffentlich zugänglichen Standorten würden selbstverständlich weiterhin kostenlos zur Verfügung gestellt. Solange jedoch getrennt gesammelter Bioabfall zur Kompostierung bestimmt ist, dürfen Sammelbehälter nicht an öffentlich zugänglichen Orten aufgestellt werden, da der anonyme Zugang zu Sammelbehältern Missbrauch begünstigt („Anonymität ist der Feind der Qualität").

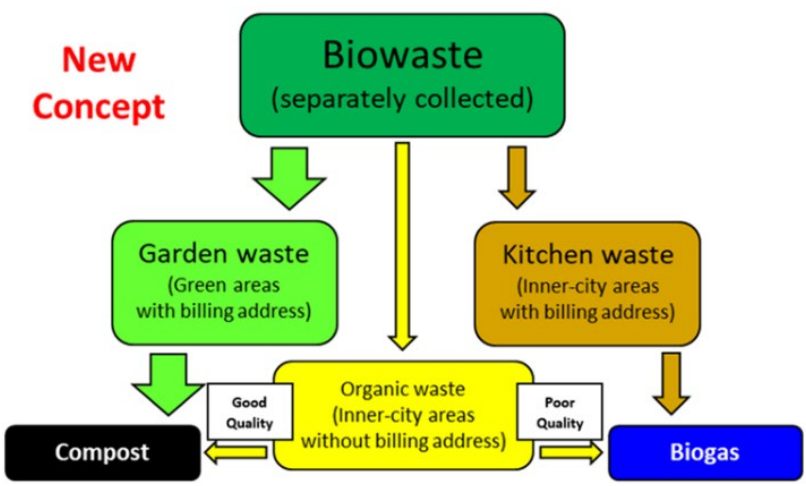


Abb. 2: Neues Konzept für die Bewirtschaftung von Bioabfällen in Wien (TB Hauer, 2002)

3.11 EU-Gesetzgebung, Optimierungsvorschläge

Trotz der EU-weiten Verpflichtung zur getrennten Sammlung von Bioabfällen (Richtlinie 2008/98/EG, Artikel 22) (EU Legislation, 2018) sind europäische Großstädte mit grundlegend anderen Rahmenbedingungen für die getrennte Sammlung von Bioabfällen konfrontiert, als dünn besiedelte oder ländliche Regionen. Hohe Bevölkerungsdichte, begrenzter Lagerraum,

heterogene sozioökonomische Strukturen und Anonymität erfordern differenzierte Sammelstrategien. Solche Umsetzungsansätze für große Ballungsräume fehlen derzeit im EU-Recht.

Darüber hinaus ist die Sicherstellung einer gleichbleibend hohen Qualität der getrennt gesammelten Bioabfälle oft nicht Aufgabe der öffentlichen Hand, während die Herstellung von hochwertigem Kompost sehr oft in deren Verantwortung liegt. Dies gilt insbesondere für Lebensmittelabfälle aus Unternehmen. Diese Abfälle müssen unabhängig von ihrer Qualität gemäß den „tierische Nebenprodukte-Verordnungen“ Nr. 1069/2009 und Nr. 142/2011, 25 (EU Legislation 1069 animal by-products, 2009) (EU Legislation 142 animal by-products, 2011) getrennt gesammelt werden. Die Stadtverwaltung hat daher oft keinen Einfluss auf die Qualität des Komposts, der aus dem Gärrest nach der Vergärung von Küchenabfällen großer Betriebe (wie Krankenhäusern) gewonnen wird. Daher sollte die Biogasproduktion bereits dann als Recycling anerkannt werden, wenn der Gärrest nach der Vergärung aufgrund seiner schlechten Qualität (z. B. hoher Anteil an Verunreinigungen oder Schwermetallen) verbrannt werden muss.

Des Weiteren wäre es logisch, unter der Annahme, dass Siedlungsabfälle zu etwa 40 % aus organischen Abfällen bestehen, die tatsächliche Recyclingquote von Siedlungsabfällen in Großstädten in welchen eine den EU-Vorgaben entsprechende Restmüllverbrennung gut etabliert ist, ebenfalls auf etwa 40 % anstatt 60 % bzw. 65 % zu begrenzen.

Dieser Artikel versteht sich daher auch als Beitrag zur Diskussion über die Weiterentwicklung der EU-Gesetzgebung im Bereich Bioabfall.

LITERATURVERZEICHNIS

Christoph Reinprecht, Eva Rossbacher. (2011). *Soziologie der Mülltrennung.* Wien.

City of Vienna MA 48. (2026). *Wien, Ergebnisse der Abfallanalysen 1993 bis 2022.*

D. Bernard-Beltran, A. S. (2014). *Incorporation of the selective collection of biowaste.*

E. Celestino, J. M. Palma-Oliviera et al. (2025). *Biowaste in Portugal psychosocial and operational factors.* Portugal: Journal of Clean Production.

EU Legislation 1069 animal by-products. (2009). REGULATION (EC) No 1069/2009.

EU Legislation 142 animal by-products. (2011). REGULATION(EU) No 142/2011.

EU Legislation. (1991). (EEC) 2092/91, organic farming.

EU Legislation. (2008). Directive 2008/98/EC, Article 4, waste hierarchy.

EU Legislation. (2018). (Directive 2008/98/EC/(EU) 2018/851).

EU Legislation GREEN PAPER. (2008). EU COM(2008) 811 final/3/3.1.

Giulia Romano, Lucio Masserini et al. (2023). *Pay-as-you-throw tariff.* Italy: Journal of Environmental Management.

Jan Slavik, Martin Dolejs et al. (2021). *Geographic information system (GIS) in the separate collection.* Czech Republic: Waste Management.

Marta Rossi, Alessandra Papetti et al. (2022). *Different waste collection methods.* Italy: Journal of Clean Production.

Mustermann, M. (MusterJAHR). *MusterTITEL* (Bd. MusterBAND). MusterORT, MusterLAND: MusterVERLEGER.

TB Hauer. (1994). *Versuchssammlung Biotonne Kernzone Margareten, 1994.*

TB Hauer. (1997). *Biotonne Wien 8. und 16. Bezirk Befragung.*

TB Hauer. (2002). *Biotonne-Sammlung in Wien Materialdefinitionfür Küchen- und Gartentonne, 2002.*

TB Hauer. (2002). *Sammlung biogener Abfälle aus privaten Haushalten für eine Vergärungsanlage.*

TB Hauer. (2019). *Restmüllanalyse Wien 2019.*

TB Hauer, Pulswerk. FHA Analytik. (2016). *Wiener Altstoff- und Restmüllanalyse.*

V. Uusitalo, L. Abrari et al. (2023). *Climate Impacts of Source-Separated Biowaste.* Finland: Waste Management.

Volk, U. (2026). *City of Vienna MA 48 Annual Reports.*

WU-Wien. (1988). *Modelversuch Biotonne 1986-1988.*

Lebensmittelabfallvermeidung in der Schulverpflegung

Gudrun Obersteiner[1], Katharina Hofer[1], Sandra Luck[1], Reinhold Ottner[1] & Elisabeth Schmied[1]
[1)] Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Lebensmittelverschwendung ist zentral für die Nachhaltigkeit von Ernährungssystemen; Schulmensen haben dabei eine Schlüsselrolle. Im Interreg-Projekt foodCIRCUS wurden in Wien und Niederösterreich an Schulen Sortieranalysen während der Essensausgabe durchgeführt (Februar–Juni 2025), um Mengen, Zusammensetzung und Entstehungsorte von Abfällen zu erfassen. Erhoben wurden 23 Einrichtungen mit verschiedenen Verpflegungsformen (Cook & Chill, Cook & Hold, Cook & Serve) und Ausgabesystemen. Die durchschnittliche Verlustquote betrug 44 %. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass insbesondere die Ausgabereste (24 %) bzw. die angelieferten Mengen einen zentralen Ansatzpunkt für künftige Maßnahmen zur Reduktion von Lebensmittelverlusten darstellen.

1 EINLEITUNG

Lebensmittelverschwendung ist ein vielschichtiges Phänomen, das durch individuelle, kollektive und systemische Verhaltensmuster beeinflusst wird. Sie betrifft verschiedene gesellschaftliche Kontexte und stellt somit ein zentrales Element der Nachhaltigkeit von Ernährungssystemen dar. In diesem Zusammenhang kommt Schulmensen und -kantinen eine Schlüsselrolle zu, da sie maßgeblich Einfluss auf Essgewohnheiten und Ernährungsentscheidungen ausüben (Schanes et al. 2018).

Lebensmittelabfälle sind in Großbritannien laut WRAP (Cordingley et al. 2011) für bis zur Hälfte der gesamten Abfälle einer Schule verantwortlich. Andere Erhebungen zeigen, dass bis zu einem Viertel des servierten Essens in Schulen als Abfall endet (Eriksson 2017). Auch in Österreich ließen ausführliche Gespräche mit Lehrer*innen, Eltern und Schüler*innen im Zuge von Unterrichtseinheiten zum Thema Lebensmittelabfallvermeidung vermuten, dass in vielen Schulen erhebliche Mengen an Lebensmittelabfällen bei der Speiseausgabe entstehen. Lebensmittelabfälle in Schulen sind aus vielen Gründen ein wesentliches Thema. Nicht nur, dass die Umweltauswirkungen, die für Anbau, Transport, Lagerung und Zubereitung der Lebensmittel aufgewendet wurden, umsonst sind, auch das für die Ernährung der Kinder aufgewendete Geld kommt nicht dem vorgesehenen Zweck zugute. Die Kinder erhalten nicht die vorgesehenen Nährstoffe und im Zusammenhang mit dem Thema Abfallvermeidung kann es durch die falsche bzw. nicht vorhandene Vorbildwirkung zu fatalen Folgen in der Zukunft kommen.

Genauere Zahlen zum tatsächlichen Aufkommen an Lebensmittelabfällen in Bildungseinrichtungen in Österreich fehlten bisher und dementsprechend sind auch Maßnahmen zur Umsetzung von Abfallvermeidungsinterventionen noch nicht ausreichend bekannt. Ziel des vorliegenden Projektes war es daher in einem ersten Schritt das Lebensmittelabfallaufkommen in Schulen und Kindergärten zu erheben und in einem zweiten Schritt Maßnahmen zur Lebensmittelabfallvermeidung zu entwickeln und zu testen.

2 METHODE

Im Rahmen des Interreg Central Europe kofinanzierten Projektes foodCIRCUS konzentriert sich die Umsetzung auf die beiden österreichischen Regionen Wien und Niederösterreich, um sowohl urbane als auch ländliche Gegebenheiten berücksichtigen zu können. Gerade in Wien ist die Situation im Bereich der Schulverpflegung besonders spezifisch; daher werden zusätzlich Schulen in Niederösterreich in die Pilotaktivitäten einbezogen, um verallgemeinerbare und übertragbare Ergebnisse zu erzielen.

An allen betrachteten Schulen wurden an zwei mit den Bildungseinrichtungen abgestimmten Terminen Sortieranalysen durchgeführt. Ziel dieser Erhebungen war es, quantitative und qualitative Daten über das Aufkommen, die Zusammensetzung sowie die Entstehungsorte von Lebensmittelabfällen zu erfassen und systematisch auszuwerten. Im Rahmen der Sortieranalysen, die während der Essensausgabe stattfanden, wurden die anfallenden Lebensmittelabfälle hinsichtlich ihrer Zusammensetzung differenziert und mengenmäßig erfasst.

Der Fokus der Analysen lag auf den Verlusten, die direkt in den Schulen anfallen. Verluste, die bereits im Vorfeld bei der Zubereitung der Speisen anfallen (Zubereitungs- oder Lagerverluste) wurden nicht berücksichtigt. Die anfallenden Lebensmittelabfälle wurden laufend während des normalen Betriebes getrennt voneinander gesammelt und unmittelbar händisch nach bestimmten Kriterien sortiert und direkt vor Ort verwogen. Die Lebensmittelabfälle wurden einerseits nach dem Ort der Entstehung in die Bereiche „nicht ausgegebene Speisen“, „Buffetreste“ und „Tellerreste“ unterschieden, andererseits wurden die Speisen nach Produktgruppen (u.a. Salat, Suppen, Gemüse & Obst, Fleisch/Fisch) unterteilt.

3 ERGEBNISSE

Im Rahmen der Ersterhebungen wurden Lebensmittelabfälle in Schulen und Kindergärten in Wien (48 %) und Niederösterreich (52 %) im Zeitraum von Februar bis Juni 2025 untersucht. Dabei standen sowohl die Verpflegungsform als auch die Art des Caterings im Fokus. Insgesamt wurden 23 Einrichtungen erfasst, die durch unterschiedliche Anbieter beliefert werden. 11 Einrichtungen wurden von großen Caterern im Rahmen des „Cook & Chill“ Systems versorgt, neun Einrichtungen nutzten lokale kleinere Caterer („Cook & Hold“) und drei weitere Einrichtungen betrieben eine eigene Küche nach dem Prinzip „Cook & Serve“. Die Ausgabesysteme variieren in den Einrichtungen von Buffetsystemen mit oder ohne Unterstützung, Ausgabe, Cafeteria-Line und Tischgemeinschaften.

Insgesamt wurden in den 23 Bildungseinrichtungen 6.187 Portionen angeliefert. Das entspricht 3.204 kg Lebensmittel. Davon sind 1.444 kg an Lebensmittelabfällen angefallen und wurden im Detail analysiert. Es konnte demnach eine durchschnittliche Verlustquote von 44 % nachgewiesen werden. Das Verhältnis zwischen der Menge der Lebensmittelabfälle und der an die Schulen gelieferten Lebensmittel (= Verlustquote) lag zwischen 27 und 59 % (siehe Abbildung 1). In Wien liegt der Wert mit 45 % geringfügig über Niederösterreich mit 42 %. Betrachtet man die Einrichtungen, so zeigen Kindergärten mit 45 % und Volksschulen mit 44 % ein vergleichbares Niveau der Lebensmittelverluste.

Die Ausgabereste (blau), gemessen an der angelieferten Speisemenge, liegen zwischen 0 und 46 % und weisen einen Mittelwert von 24 % auf. Die Tellerreste (dunkelgrau) bewegen sich in einer Spanne von 5 bis 12 % und betragen im Durchschnitt 9 %. Angelieferte Lebensmittel, die ungeöffnet im Küchenbereich verblieben sind und entsorgt wurden (hellgrau), variieren zwischen 0 und 25 % bei einem Mittelwert von rund 7 %. Schließlich wurden zwischen 0 und 21 % der angelieferten Lebensmittel für eine spätere Verarbeitung aufbewahrt (grün); dies entspricht im Durchschnitt etwa 3 %.

Die Abbildung 2 liefert einen Überblick über die Lebensmittelverluste gegliedert nach Gang je Einrichtung. Dabei werden die Verluste nach den Menükomponenten – Hauptspeise (blau), Suppe (orange), Salat (grün) und Dessert (dunkelblau) – im Detail aufgeschlüsselt. Insgesamt zeigt sich, dass die Hauptspeise mit durchschnittlich 28 % in nahezu allen Einrichtungen den größten Anteil an den Gesamtverlusten ausmacht, gefolgt von Suppe (10 %), Salat (4 %) und Dessert (3 %). In der Einrichtung „VS_109“ wurde an beiden Erhebungstagen keine Suppe angeboten, weshalb die Suppen-Verlustquote bei 0 % liegt.

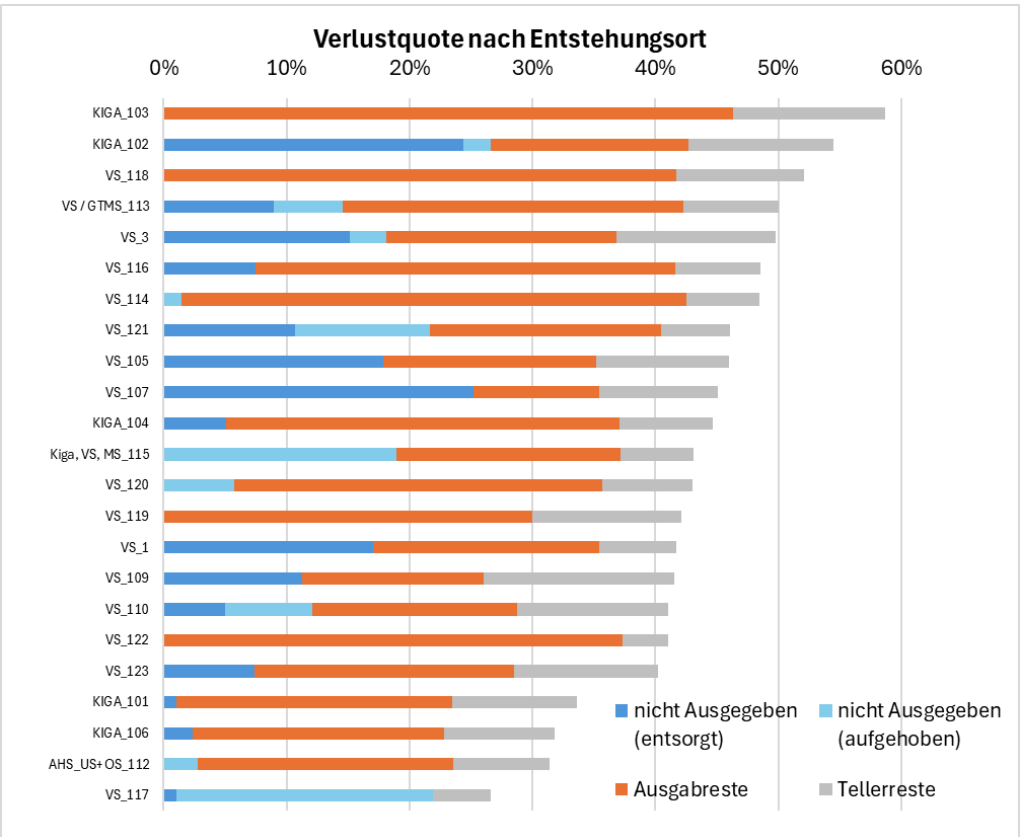


Abb. 1: Verlustquote nach Entstehungsort in Prozent

Gemessen an den jeweils angelieferten Mengen je Gang wurden besonders hohe Verlustraten bei Suppen und Salaten festgestellt (siehe Abbildung 3). Bei den Suppen wurde im Mittel über alle Einrichtungstypen eine Verlustquote von 48 % identifiziert. Die Bandbreite der Verlustquoten von klaren und gebundenen Suppen (inkl. Einlage) reicht von knapp 15 bis 82 %. An den Analysetagen reichte das Angebot von Zucchini- und Karfiol-Cremesuppe bis hin zu Gemüsebouillon mit Nudeleinlage. Die Verlustquote für gebundene Suppen liegt mit 61 % deutlich über der Verlustquote für klare Suppen (42 %). Es ist zu beachten, dass bei der Darstellung der Verlustquoten die Daten jeweils nach der Gesamthöhe der Verluste sortiert wurden. Daher kann die Rangfolge bei der gesonderten Analyse einzelner Speisegänge von der Reihenfolge der Gesamtdarstellung abweichen.

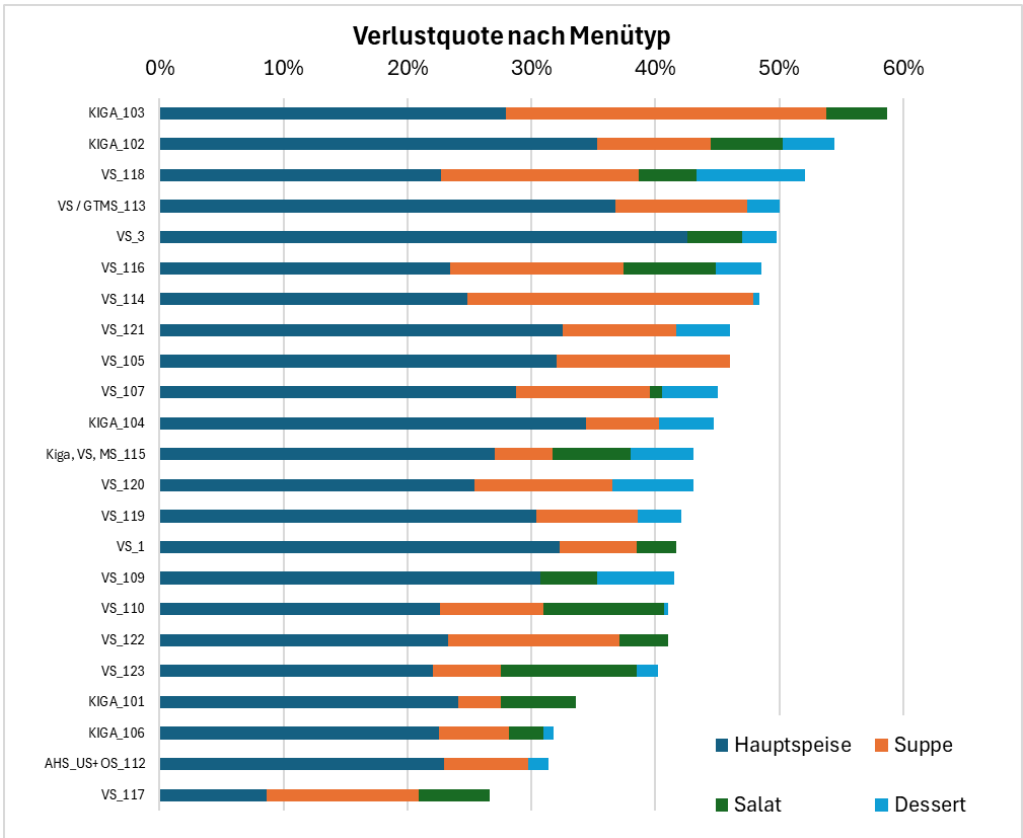


Abb. 2: Verlustquote nach Gang (Hauptspeise, Suppe, Salat, Dessert) in Prozent

Noch höher ist die mittlere Verlustquote mit 63 % bei Salaten. Die Bandbreite variiert von 24 bis 86 % in den untersuchten Bildungseinrichtungen. Am Speiseplan stand u. a. Chinakohl-, Eisbergsalat, Rahm-Gurkensalat, Gärtner-Mix-Salat mit Joghurtdressing sowie roter Rübensalat.

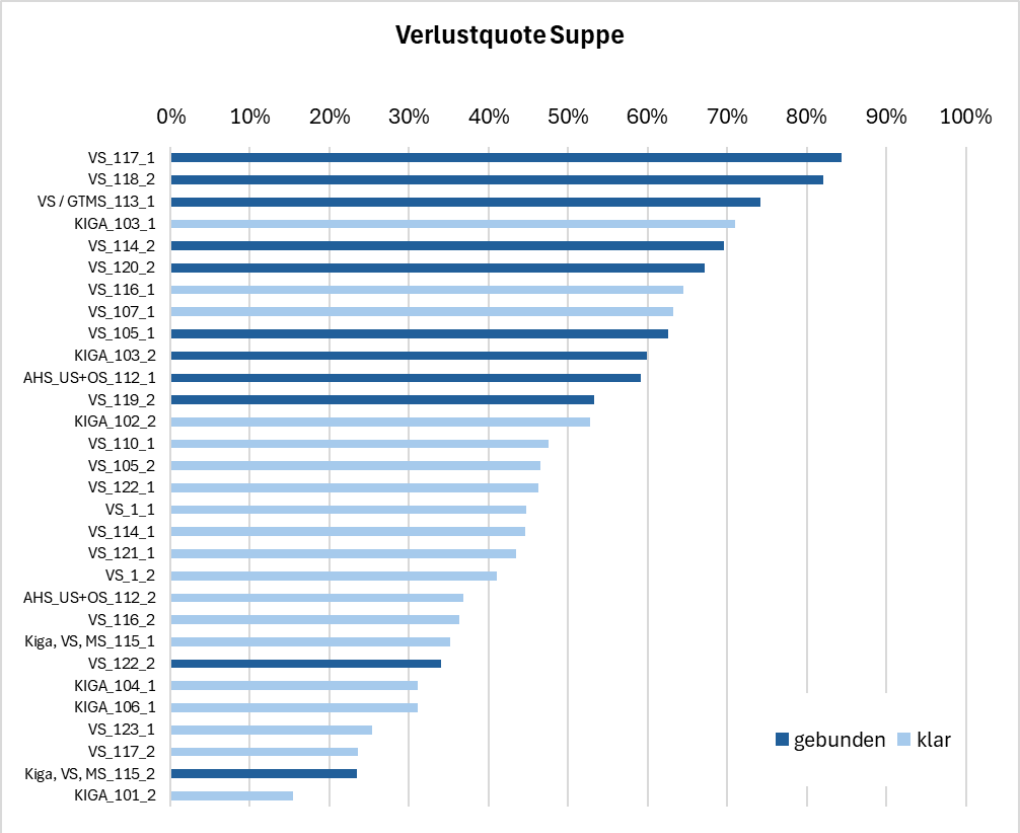


Abb. 3: Verlustquoten von Suppe (klar und gebunden, inkl. Einlage) in Prozent, dargestellt sind die einzelnen Sortiertage (2 pro Einrichtung)

Neben Kriterien wie angelieferter Menge und Geschmack des Essens, welche sich auf die Lebensmittelabfallmengen auswirken können, wurde auch die Möglichkeit analysiert, inwiefern abwesende Kinder ein Grund für hohe Abfallmengen sein können (Abbildung 4). Zusätzlich wird die prozentuale Abweichung zwischen Soll- und Ist-Werten angegeben. Zunächst ist erkennbar, dass die Zahl der anwesenden Kinder in fast allen Einrichtungen unter den geplanten Werten liegt. Im Durchschnitt fehlten am Tag der Sortierung 10 % der Kinder, die eigentlich am Essen hätten teilnehmen sollen. Im Extremfall fehlten bei einem Kindergarten 28 % und bei einer Volksschule 20 % der Kinder.

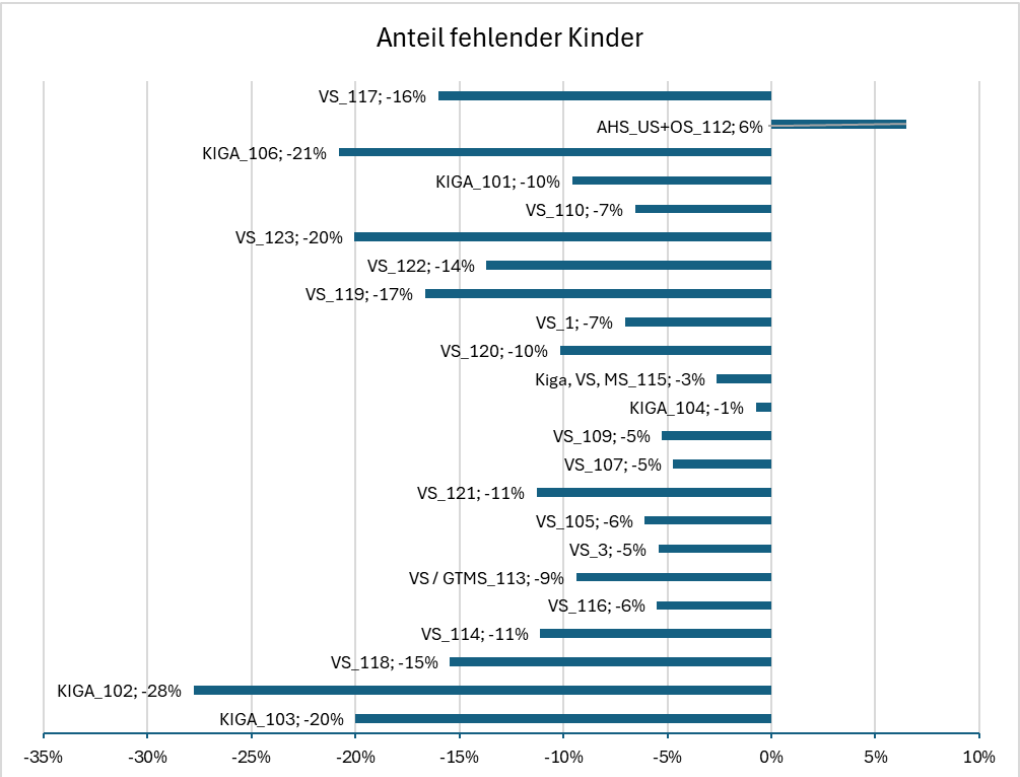


Abb. 4: Durchschnittliche Anzahl der geplanten und anwesenden Kinder pro Erhebungstag (Mittelwert)

Die Analyse der Rahmenbedingungen für das Mittagessen zeigt deutliche Unterschiede zwischen Wien und Niederösterreich. In Wien wurden die Mahlzeiten hauptsächlich von großen Caterern geliefert, während in Niederösterreich überwiegend kleine Caterer bzw. Gasthäuser zum Einsatz kamen. Dies spiegelte sich auch in der Schulgröße und Anzahl der Kinder wider: Wiener Schulen sind tendenziell größer, während die Schulen in Niederösterreich meist kleineren Schülerzahlen entsprechen. Außerdem waren die Essenszeiten in Wien kurz und teilweise stressig, in Niederösterreich reichten die Zeitslots von 30 bis über 60 Minuten.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Durch die Ersterhebungen in den 23 österreichischen Bildungseinrichtungen konnte eine durchschnittliche Verlustquote von 44 % festgestellt werden. Die Verlustquote, also das Verhältnis zwischen der Menge der Lebensmittelabfälle und den an die Einrichtungen gelieferten Lebensmitteln, variierte dabei zwischen 27 % und 59 %. Im Schnitt über alle Schultypen wurden 544 g Lebensmittel pro Kind angeliefert, allerdings nur 310 g pro Kind konsumiert. Das bedeutet 244 g wurden pro Kind entsorgt. Weiters verdeutlichen die Ergebnisse, dass insbesondere die Ausgabereste (24 %) einen zentralen Ansatzpunkt für künftige Maßnahmen zur Reduktion von Lebensmittelverlusten darstellen, während Tellerreste (9 %) und Nicht Ausgegebenes (7 % bzw. 3 %) vergleichsweise geringere, aber dennoch relevante Optimierungspotenziale bieten. Insgesamt zeigt sich, dass die Hauptspeise mit durchschnittlich 28 % in nahezu allen Einrichtungen den größten Anteil an den Gesamtverlusten ausmacht, gefolgt von Suppe (10 %), Salat (4 %) und Dessert (3 %). Gemessen an den jeweils angelieferten Mengen je Gang wurden besonders hohe Verlustraten bei Suppen (48 %) und Salaten (63 %) festgestellt. Die Verlustquote für gebundene Suppen liegt mit 61 % deutlich über der Verlustquote für klare Suppen (42 %). Folglich essen Kinder im Durchschnitt lieber klare als gebundene Suppen. Außerdem ist erkennbar, dass die Zahl der anwesenden Kinder in fast allen Einrichtungen unter den geplanten Werten liegt. In circa der Hälfte der Einrichtungen fehlten an den Erhebungstagen 10 % oder mehr der für das Essen angemeldeten Kinder.

In der zweiten Projektphase werden auf Basis der erhobenen Daten zielgerichtete Maßnahmen zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen entwickelt und implementiert. Diese werden gemeinsam mit den Schulen und relevanten Stakeholdern erarbeitet, um eine praxisnahe und nachhaltige Umsetzung sicherzustellen.

LITERATURVERZEICHNIS

Cordingley, F., Reeve, F., Stephenson, J., 2011. Food waste in schools. Report prepared by WRAP (waste & resources action programme), banbury. Available at: http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Household_food_and_drink_waste_in_the_UK_-_report.pdf. Last access: 17/09/2018.

Eriksson, M., Osowski, C.P., Malefors, C., Bjorkman, J., Eriksson, E., 2017. Quantification of food waste in public catering services e a case study from a Swedish municipality.Waste Manag. 61, 415e422. Available at: http://sciencedirect.com/ science/article/pii/S0956053X17300351.

Schanes, K., Dobernig, K., Gözet, B., 2018. Food waste matters - A systematic review of household food waste practices and their policy implications. Journal of Cleaner Production, 182, 978-991, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.030.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Dr. Gudrun Obersteiner
gudrun.obersteiner@boku.ac.at
Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft
https://boku.ac.at/lawi/abfk

Neue technische und psychologische Methoden bei der Abfallsammlung und ihre Wirkung auf die Trennung

Martin Wellacher
Ingenieurbüro Wellacher e.U., Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Intelligente Methoden bei der Abfallsammlung von Einzelbehältern sollen helfen, Probleme im Zuge der Abfalltrennung zu beseitigen. Zuerst muss eine Prüfung (0/1 oder Notenbewertungen) bzw. Messung (skalierbare Messwerte) erfolgen. Aus dieser geht hervor, wie der Inhalt eines Behälters beschaffen ist. Auf dieser Grundlage lassen sich nun genau dort Maßnahmen ergreifen, wo der Inhalt nicht den Anforderungen der Abfalltrennung entsprochen hat. Aktuell sind digitale Methoden der Oberflächenbewertung in aller Munde. Damit können automatisiert Bilder gemacht und Gegenstände detektiert werden. Es wird die Vorstellung erzeugt, hier würden mit Hilfe der KI digitale Analysen gemacht werden, die alleine schon ausreichen, um den Abfallerzeuger zu einer besseren Trennung zu bewegen. Bekannte und erfolgreiche Methoden zur Verbesserung der Abfalltrennung sind Behältergestaltung (Funktionalität, Farbe), Gebührenmodelle oder das zur Verfügung stehende Sammelvolumen (Stichwort: Abholfrequenzen). Zu prüfende neue Methoden wären z.B. digitale Oberflächenbetrachtungen, neue Arten von Sammelbehältern oder eine erweiterte Behälterreinigung. Veränderungen des Verhaltens bei der Abfalltrennung als Ziel von alten und neuen Methoden müssen eine Prüfung auf ihre Wirksamkeit bestehen. Findet keine Prüfung statt, bleibt die Wirkung unklar. Um hier eine Änderung des Verhaltens auszulösen, bedarf es einer klugen Kommunikation der Kommune und Kommunalverwaltungen an die Bürger, denn die Ausgangssituation des privaten Abfallerzeugers ist, dass sein Abfallbehälter bisher immer abgeholt wurde. Schließlich ist für eine nachhaltige Wirkung die Kosteneffizienz für die Gemeinde entscheidend.

1 EINLEITUNG

Abfalltrennung ist ein Schlüsselfaktor in der Abfallwirtschaft und damit eine Kernaufgabe dieser. Getrennt gesammelten Abfällen stehen mehr und hochwertigere Entsorgungswege offen als gemischt gesammelten. Rezyklatquoten für getrennt gesammelte Abfälle können weit über 90 % erreichen, jene für gemischte Abfälle liegen meist unter 10 %. Kreislaufwirtschaft funktioniert nur mit Abfalltrennung und je besser die Trennung funktioniert, desto mehr Sekundärrohstoffe werden im Kreis geführt. Passiert die Abfalltrennung vor der Sammlung, verursacht das weniger Aufwand als im Zuge der nachfolgenden Behandlung. Anders ausgedrückt: Wenige Behandlungsanlagen machen nicht wett, was viele Bürger und Bürgerinnen könn(t)en. Hier wird deutlich, dass der Mensch als Abfalltrenner das effizienteste und kostengünstigste Trennaggregat innerhalb der Entsorgungskette darstellt. Typische Probleme durch schlechte Abfalltrennung sind Brandereignisse auf Abfallbehandlungsanlagen durch falsch entsorgte Lithium-Ionen-Akkus, Kunststoffemissionen im Zuge der Kompostausbringung durch Fehlwürfe im Bioabfall oder geringe Recyclingquoten durch zu viele Wertstoffe und somit Fehlwürfe im Restabfall.

Im Bereich der kommunalen Abfälle ist es Aufgabe der **Gemeinden**, zur Trennung zu informieren, aufzufordern und diese einzufordern. Auch die privaten Systeme der verpflichteten Herstellerverantwortung informieren zur Trennung, tun dies aber nur für die von ihnen verantwortete Fraktionen. Daher, und weil Gemeinden für die Daseinsvorsorge verantwortlich sind, kommt ihnen im Bereich der Abfalltrennung die zentrale Rolle zu. Das Verbesserungspotential liegt deutlich mehr in der Hand der Gemeinden als in der der Systeme der Herstellerverantwortung.

Neue technische Methoden der Prüfung bzw. Messung der Abfalltrennung nutzen Oberflächenbetrachtungen im Sinne eines Rosinenbrot-Effektes: Wenn auf der Oberfläche „Rosinen" sichtbar sind, ist bei einer homogenen Mischung davon auszugehen, dass auch im gesamten Brot „Rosinen" enthalten sind. Die Oberfläche ist ein Abbild des darunterliegenden Materials. Voraussetzungen dafür sind die Homogenität der Mischung (vice versa: kein entmischtes Material) und der freie Blick auf die zu bestimmende Fraktion (keine Verpackung in undurchsichtige Sammelsäcke).

Eine oft angewendete Prüfung, die auf einer Oberflächenbetrachtung beruht, ist die Deckel-Öffnen-Methode, bei welcher von einem Blick auf die Oberfläche eines Behälterinhaltes auf die Zusammensetzung des gesamten Behälterinhalts geschlossen wird (BGK, 2023; Wellacher et al., 2024). Üblich passiert das bei der Prüfung von Biotonneninhalten auf Störstoffe. Darauf aufbauend werden Produkte angeboten, die diese Methode digital mit Bilderkennung und automatisierter Dokumentation durchführen (Holler, 2026). Das kann vom Sammelfahrzeug aus vor oder während der Schüttung durchgeführt werden.

Neue psychologische Methoden zur Verbesserung der Abfalltrennung beruhen vornehmlich auf Vorteilen für den Nutzer, z.B. eine gratis Verteilung von Papiersäcken vor die Wohnungstüren in Mehrparteienwohnhäusern (Wellacher et al., 2024). Ziel ist es, zur Vorsammlung von biogenen Abfällen in der Küche Kunststoffsäcke (gleich, ob angeblich abbaubar oder nicht abbaubar) durch Papiersäcke zu ersetzen und so den Störstoffgehalt in der Biotonne zu reduzieren. Ebenso neu ist eine erweiterte Biotonnenreinigung inklusive der Behälterdeckelinnenseite oder ein Fußpedal, um den Deckel nicht händisch öffnen zu müssen. Ziel dieser Methoden ist es, das Haupthindernis für die Verwendung der Biotonne - den Ekel - zu reduzieren. Ekel und Geruch sind die größten Hemmnisse zur Verwendung der Biotonne (Ohde, 2025).

Für die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Verbesserung der Abfalltrennung ist die **Wohnstruktur** von Bedeutung. Hierbei werden Einfamilienhäuser (EFH), Mehrparteienwohnhäuser (MPW) und Großwohnanlagen (GWA) unterschieden (INFA, 2025). Ergebnisse zur Wirksamkeit von Maßnahmen können nicht 1:1 von einer Struktur auf eine andere übertragen werden. Ein Beispiel hierfür ist die Maßnahme des Nicht-Entleerens der Biotonne mit dem Hinweis auf enthaltene Störstoffe. Im EFH *kann* diese Maßnahme zu einer Veränderung im Trennverhalten führen (z.B. Bocksnick, 2026), im MPW tut sie das *meist* nicht.

Ziel dieses Beitrages ist die Abgrenzung von (1) Methoden zur *Prüfung* bzw. *Messung* der Abfalltrennung von (2) Methoden *zur Verbesserung* der Abfalltrennung. Beides wird auf der Ebene von Sammelbehältern bzw. Liegenschaften diskutiert.

2 METHODEN

Es gibt Methoden zur Prüfung bzw. Messung der Abfalltrennung. Hier wird festgestellt, ob die Abfalltrennung funktioniert und wie gut sie funktioniert. Diese Methoden dürfen nicht verwechselt werden mit Methoden zur Verbesserung der Abfalltrennung an sich.

2.1 Methoden zur Prüfung bzw. Messung der Abfalltrennung

Prüfungen bzw. Messungen der Abfalltrennung dienen in erste Linie zur Datenerhebung und Dokumentation. Während *Prüfungen* 0/1-Ergebnisse oder Ergebnisse nach Noten liefern, können durch *Messungen* skalierbare Daten generiert werden. Folgende Methoden sind bekannt (neue Methoden sind gekennzeichnet):

- Prüfmethoden:
  - Deckel-Öffnen durch „Müllsherrifs“ und Bewertung der Behälteroberfläche gegebenenfalls mit Nachweisfoto (Berheide, 2024),
  - digitale Fotografie mit Bilderkennung der Oberfläche der Abfälle inklusive Aufnahmen während der Schüttung (NEU),
  - Transmissionsröntgenaufnahme des Behälterinhaltes und visuelle oder digitale Bilderkennung (NEU) und
  - Umfragen zur Abfalltrennung, in welchen sich der Abfallerzeuger selbst bewertet (Bauer, 2025).
- Messmethoden:
  - manuelle Sortieranalysen des Behälterinhaltes und
  - indirekte Messungen, die durch eine Kalibration mit manuellen Sortieranalysen statistisch abgesichert wurden, z.B. Zählmethoden der Oberfläche der Abfälle (Adam et al., 2024) (NEU), oder Wirbelstrommessungen des Behälterinhaltes (Helfmeier, 2024).

Umfragen zur Abfalltrennung werden mit der Versprechung angeboten, die Trennmoral über eine anschließende lokal den Umfrageergebnissen angepasste Kommunikation zu verbessern. Die Kommunikationsinhalte beruhen auf Selbstbewertungen der Abfallerzeuger. Deren Wahrheitsgehalt ist aus psychologischen Gründen als gering anzusehen. Somit ist auch ihre Verwendung als Kommunikationsinhalt zur Verbesserung des Trennverhaltens zweifelhaft wirksam. Zudem fehlen Prüfergebnisse zur Wirksamkeit dieses Vorgehens.

2.2 Methoden zur Verbesserung der Abfalltrennung

Methoden, die der Verbesserung der Abfalltrennung dienen, haben das Ziel eine Verhaltensänderung beim Abfallerzeuger zu bewirken. Gezielte Verhaltensänderungen werden durch Kommunikation bewirkt, somit ist jede Methode mit dem Ziel einer Verhaltensänderung auch eine Kommunikationsmethode. Psychologische und soziale Aspekte sind dabei relevant. Bekannte Methoden zur Verbesserung der Abfalltrennung sind (neue Methoden sind gekennzeichnet):

- Persönliche Abfallberatung, gegebenenfalls mit dem Verteilen von Vorsammelhilfen, z.B. Kübel, Säcke aus Papier; u.a. durch Verteilung vor den Wohnungstüren in MPW,
- postalische Anschreiben,
- Informationen über verschiedene Medien, z.B. die Gemeindezeitung,
- Anbieten von Applikationen für das persönliche Smartphone – uni- oder bidirektional,
- Behälterdesign im Allgemeinen, d.h. die Funktionalität des Behälters im Allgemeinen oder zusätzliche Eigenschaften, wie die Oberflächenbeschaffenheit (Farbe, Beklebung), ein Fußpedal zum Deckelöffnen (NEU) etc.,
- Aufkleber oder Anhänger für den Behälter oder andere Wege der Kommunikation, z.B. das Zurücklassen von Störstoffen auf dem Deckel (Reisenhofer, 2015),
- Biofilterdeckel als Behälterdeckel zur Geruchsreduktion in geschlossenen Räumen (nicht neu, aber wenig bekannt),
- Reinigung der Behälter als Service, um den Ekelfaktor zu reduzieren – v.a. für die Biotonne, wobei die Deckelinnenseite mitgereinigt wird (NEU),
- auffällige Bilder beim Abfallsammelplatz bzw. dem Behälterraum, z.B. ein großes Augenpaar oder Naturbilder (NEU),
- Sammelmethoden (Hol- oder Bringsammlung) und
- Gebührenmodelle.

Diese Methoden führen nicht per se zu einer Verbesserung der Abfalltrennung. Die Feststellung der Verbesserung muss durch eine Prüfung bzw. Messung belegt werden. Das wurde bisher nur vereinzelt durchgeführt. Daraus resultieren wirksame Methoden und unwirksame (Wellacher et al., 2024, INFA, 2025, Bocksnick, 2026).

Andere Maßnahmen am Behälter, wie z.B. Adressenangaben oder RFID-Chips am Behälter (zur visuellen oder automatisierten Zuordnung des Behälters zur Liegenschaft) oder ein Füllstandssensor am Behälter, helfen bei der Organisation der Abfallsammlung, führen aber nicht zu einer Verbesserung der Abfalltrennung.

2.3 Diskussion von digitalen Methoden mit KI und Bilderkennung

Aktuell sind **digitale Methoden der Oberflächenbewertung** in aller Munde (digitale Fotografie mit Bilderkennung und automatisierter Dokumentation). Eine stetig steigende Zahl von Anbietern und Produkten erscheint am abfallwirtschaftlichen Markt. Damit können automatisiert Bilder gemacht und Gegenstände detektiert werden. Die Anbieter werben damit, dass mit Hilfe der KI digitale *Analysen* gemacht werden, die alleine schon ausreichen, die Abfalltrennung zu verbessern (Helfmeier, 2024; Holler, 2026).

Nun handelt es sich um *Prüfungen*, keinesfalls um *Messungen*. Es werden nur detektierte Gegenstände ausgewiesen. Wieweit das Ergebnis dieser Prüfungen einer visuellen Prüfung entspricht, konnte von einzelnen am Markt angebotenen Produkten nur grob bestätigt werden (INFA, 2023). Eigene Untersuchungen des Autors zeigen einen Detektionsgrad von 20-50 % verglichen mit der visuellen Wahrnehmung.

Keinesfalls kann damit eine bessere Abfalltrennung erzielt werden. Dazu sind wirksame Maßnahmen nötig. Schon die Ankündigung beim Abfallerzeuger, sein Behälterinhalt würde nun automatisch mit Hilfe der KI geprüft werden, wäre eine solche Maßnahme. Dass diese kurzfristig im EFH-Bereich zu Verbesserungen führt, ist möglich. Ohne weitere Maßnahme verbessert das die Abfalltrennung aber nicht nachhaltig. Der Effekt kling innerhalb kurzer Zeit ab. Eine weitere Maßnahme wäre das Stehenlassen der Tonne ohne sie zu entleeren und die Aufforderung zur Bestellung einer kostenpflichtigen Sonderentleerung.

Für diese Produkte stellt sich die Frage, wieso bei jeder Leerung gemessen werden sollte. Die Änderung des Abfalltrennverhaltens einer Person ist ohne Intervention nicht zu erwarten. Eine Prüfung in Intervallen von 6-12 Monaten sollte ausreichend sein, um schlecht-trennende von gut-trennenden Liegenschaften zu differenzieren. Würde jedoch bei jeder Leerung gemessen, entstünden jedenfalls hohe Kosten und Datenmengen.

Es wird angeregt, die Vorteile dieser Produkte gegenüber ihren Kosten zu erwägen. Die analoge „Deckel-Öffnen-Methode“ könnte effizienter sein (Riegler et al., 2024).

3 SCHLUSSFOLGERUNG

Intelligente Methoden bei der Abfallsammlung von Einzelbehältern sollen helfen, **Probleme im Zuge der Abfalltrennung** zu beseitigen. Solche Probleme sind Brandereignisse auf Abfallbehandlungsanlagen durch falsch entsorgte Lithium-Ionen-Akkus, Kunststoffemissionen im Zuge der Kompostausbringung durch Fehlwürfe im Bioabfall oder geringe Recyclingquoten durch zu viele Wertstoffe im Restabfall.

Zuerst muss eine **Prüfung (0/1 oder Notenbewertungen) bzw. Messung (skalierbare Messwerte)** erfolgen. Aus dieser geht hervor, wie der Inhalt eines Behälters beschaffen ist. Darauf aufbauend können nun gezielt dort Maßnahmen ergriffen werden, wo der Inhalt nicht den Vorgaben entsprochen hat. Zur Prüfung bieten sich Methoden an, die z.B. auf der Bewertung der Oberflächenbeschaffenheit beruhen und entsprechende Nachweise generieren. Zur Messung bieten sich indirekte Messmethoden an, die durch eine Kalibration mit manuellen Sortieranalysen statistisch abgesichert wurden, z.B. Zählmethoden der Oberfläche.

Aktuell werden **digitale Methoden der Oberflächenbewertung** viel diskutiert. Damit können automatisiert Bilder gemacht und Gegenstände detektiert werden. Es wird die Vorstellung erzeugt, hier würden mit Hilfe der KI digitale *Analysen* durchgeführt werden, die für sich schon ausreichen, um den Abfallerzeuger zu einer besseren Trennung zu bewegen. Nun handelt es sich um *Prüfungen*, aber keinesfalls *Messungen,* und der Nachweis der Richtigkeit des Prüfergebnisses ist bei den am Markt angebotenen Produkten ausständig. Außerdem kann nur alleine mit der Prüfung durch KI-gestützte Systeme keine bessere Abfalltrennung erzielt werden. Dazu sind wirksame Maßnahmen nötig. Die Kosteneffizienz dieser Produkte ist zu abzuwägen.

Bekannte und erfolgreiche **Methoden zur Verbesserung der Abfalltrennung** sind Behältergestaltung (Funktionalität, Farbe), Gebührenmodelle oder das zur Verfügung stehende Sammelvolumen (Stichwort: Abholfrequenzen). Zu prüfende neue Methoden wären z.B. neue Funktionalitäten von Sammelbehältern (Fußpedal zum Deckelöffnen), eine erweiterte Behälterreinigung oder auffällige Bilder an Abfallsammelplätzen. Veränderungen des Verhaltens bei der Abfalltrennung als Ziel von alten und neuen Methoden müssen eine Prüfung auf ihre Wirksamkeit bestehen. Findet keine Prüfung statt, bleibt die Wirkung unklar.

Um hier eine Änderung des Verhaltens auszulösen, bedarf es einer **klugen Kommunikation** der Gemeinde an die Bürger, denn die Ausgangssituation des privaten Abfallerzeugers ist, dass sein Abfallbehälter bisher immer abgeholt wurde. Damit fehlt die wesentliche Motivation zu einer Verhaltensänderung. Die Kommunikation sollte im ersten Schritt Aufmerksamkeit erregen, um im Weiteren eine Verhaltensveränderungen zu bewirken.

Schließlich ist für eine nachhaltige Wirkung die Kosteneffizienz für die Gemeinde entscheidend, ob eine nachgewiesen wirksame Methode in einem Sammelgebiet dauerhaft angewendet wird oder nicht. Ein Grund für fehlendes Interesse von Gemeinden an einer Verbesserung der Abfalltrennung liegt in der Wirtschaftlichkeit einer solchen Ausweitung. Die Kosten werden von den Erlösen für mehr Rezyklate meist nicht aufgewogen. Der Markt wirkt einer Verbesserung bei der Abfalltrennung entgegen – eine im Umweltschutz nicht unbekannte Tatsache.

LITERATURVERZEICHNIS

Adam, J., Wellacher, M., Azizi, F., Loidl, A., Zöscher, A., Poschacher, F., Pomberger, R., Tischberger-Aldrian, A. (2024). *Determination and improvement oft he quality of separately collected bio-waste from housholds*. Waste management & Research, Vol. 42(9) 842-854: DOI: 10.1177/0734242X241259895

Bauer, S.K. (2025). *Trennverhalten verstehen: Ein Leitfaden für die Kreislaufwirtschaft*. Präsentation beim Online-Seminar Akademie Dr. Obladen am 19.02.2025. Berlin, Deutschland: L-Q-M Marktforschung GmbH

Berheide, W. (2024). *Einsatz von Scouts im Landkreis Ludwigsburg*. Präsentation am Humustag der Bundesgütegemeinschaft Kompost in Augsburg am 07.11.2024. Ludwigsburg, Deutschland: AVL Ludwigsburg

BGK – Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (2023). *Biotonnenkontrolle - Untersuchung*. Köln-Gremberghoven, Deutschland: Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.

Bocksnick, S. (2026). *Erfahrungen mit Biotonnenkontrollen im Landkreis Bergstraße*. Vortrag am 37. Kasseler Abfallforum 14.-16.4.2026, Tagungsband S. 119-128. Lampertheim-Hüttenfeld, Deutschland: Zweckverband Abfallwirtschaft Kreis Bergstraße

Helfmeier, U. (2024). *DeepScan und SmartScan zur Fremdstofferkennung in der Biosammlung*. Präsentation. Mainz, Deutschland: Scantec GmbH

Holler, A. (2025). *c-detect – KI-basiertes Störstoffdetektionssystem*. Vortrag am 36. Kasseler Abfallforum 8.-10.4.2024, Tagungsband S. 167-177. Bielefeld, Deutschland: c-trace GmbH

INFA – Institut für Abfall, Abwasser und Infrastruktur-Management GmbH (2023). *Untersuchungen der Eignung und Effizienz technischer Systeme zur Fremdstofferkennung bei der Sammlung von Bioabfällen*. Ahlen, Deutschland: LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg

INFA – Institut für Abfall, Abwasser und Infrastruktur-Management GmbH (2025). *Maßnahmen zur Erhöhung von Menge und Sortenreinheit getrennt gesammelter Bioabfälle – Leitfaden*. Ahlen, Deutschland: Umweltbundesamt

Ohde, J. (2025). *„…ich habe (gar) keinen Bioabfall…" – Ergebnisse einer repräsentativen gesamtdeutschen Befragung zum Thema Abfalltrennung.* Vortrag beim Biomasseforum Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH in Bad Hersfeld am 25.11.2025. Delmenhorst, Deutschland: Abfallwirtschaft Delmenhorst GmbH

Reisenhofer, R. (2015). *Bioabfallsammlung im ländlichen Bereich, landwirtschaftliche Kompostierung.* St. Ulrich am Waasen, Österreich: ARGE Kompost & Biogas

Riegler, C., Wellacher, M., Adam, J. (2024). *Vergleich von Detektionssystemen für Störstoffe bei der Sammlung von biogenen Abfällen – Teilprojekt von PlasticFreeCompost.* Graz, Österreich: Ingenieurbüro Wellacher e.U. und Montanuniversität Leoben

Wellacher, M., Adam, J., Poschacher, F. Loidl, A., Zöscher, A., Kunter, A., Weingrill, G., Kreindl, G. (2024). *Kunststoffe und Kunststoffabreicherung im Prozess der biologischen Behandlung.* Vortrag am 35. Kasseler Abfallforum 9.-11.4.2024, Tagungsband S. 235-246. Graz, Österreich: Ingenieurbüro Wellacher e.U.

KONTAKT

Dr. Martin Wellacher
martin.wellacher@ibwellacher.at
+43 664 1900064
Ingenieurbüro Wellacher e.U.
www.ibwellacher.at

EU Biochar LIFE „Siebüberläufe als Kohlenstoffspeicher im Kompostzyklus”

Daniela Meitner[1], Gerald Dunst[2], Thorsten Groeneveld[3] & Patrick Stumm[4]
[1)] Next Generation Elements GmbH, R&D, Feldkirchen an der Donau, Austria
[2)] Sonnenerde GmbH, GF, Riedlingsdorf, Austria
[3)] CarStorCon Technologies GmbH, GF, Marienfeld, Germany
[4)] Pastu Green SRL, GF, Brüssel, Belgium

KURZFASSUNG: Das Biochar LIFE Projekt demonstriert die skalierbare Produktion pflanzenbasierter Biokohle aus holzigen Siebüberläufen mittels eines modularen PyroDry-Systems, das Trocknung und Pyrolyse in den Kompostierungszyklus integriert. In Bezug auf die Kreislauffähigkeit bei der Kompostierung stellen die Siebüberläufe die größte Herausforderung dar. In Österreich muss dieses Material aktuell noch verbrannt werden. Somit schließt das LIFE Projekt die letzte Lücke im Kreislauf der Kompostierung. Weitere Ziele sind die langzeitstabile Kohlenstoffbindung, Ressourcenschonung und Entwicklung marktfähiger Biokohle-Produkte. Zwischen Projektmonat 1 und 15 wurde eine weitere PyroDry – Linie, neben dem bereits bestehenden Demonstrator errichtet, in das bestehende System integriert, sowie die stoffliche Nutzung von Abfallströmen und Produktanwendungen (z. B. als Zementzusatzstoff) erfolgreich nachgewiesen.

1 EINLEITUNG

Die zunehmende Notwendigkeit nachhaltiger Abfallbewirtschaftung und effektiver CO_2-Bindung erfordert technische Lösungen zur skalierbaren Produktion stabiler Kohlenstoffspeicher aus organischen Reststoffen. Biokohle (engl. biochar), hergestellt durch thermochemische Pyrolyse, bietet hohes Potenzial für langfristige Kohlenstoffsequestrierung sowie zur Verbesserung von Boden- und Baustoffeigenschaften. Breiter Markteintritt ist jedoch durch fehlende kosteneffiziente, betriebssichere Produktionskonzepte unter Realbedingungen begrenzt. Das vorliegende Projekt untersucht die Skalierbarkeit der Pyrolyse bzw. die Verwendung von hochwertiger Biokohle in diversen Produkten (Zementzusatzstoff, Erdenprodukte).

2 ZIELSETZUNG DES LIFE PROJEKTES

Die Zielsetzung des LIFE Projektes umfasst folgende Punkte:

- Demonstration eines kreislauforientierten, skalierbaren Produktionspfads für hochqualitative Biokohle (EBC Agro) aus organischen Abfällen.
- Entwicklung und Erprobung hochwertiger Endprodukte (Bodenverbesserer, biokohleverstärkter Beton/Asphalt).
- Erstellung einer Reproduzierbarkeit für Kompostierungsanlagen in Europa.
- Beitrag zu EU-Klimaneutralitätszielen durch dauerhafte Kohlenstoffbindung und nachhaltige Abfallwirtschaft.

3 TECHNISCHE UMSETZUNG

Die Umsetzung erfolgte auf der Kompostierungsanlage der Firma Sonnenerde GmbH in Riedlingsdorf im Burgenland, Österreich. Hierfür kam es bereits im Jahr 2023 zum Bau eines PyroDry Demonstrators um den „Proof of Concept“ zu zeigen. Die modulare Einheit der Firma Next Generation Elements GmbH (kurz: NGE) ermöglichte dieses Vorgehen.

Das PyroDry System umfasst eine Klärschlammtrocknungseinheit der Firma Jumbo Smart Dry (DE) und einer Pyrolyse der NGE, dem T:CRACKER®. Während der Pyrolyse kommt es zur Produktion von Überschusswärme, die im PyroDry Konzept direkt für die energieintensive Klärschlammtrocknung genutzt wird. Das Inputmaterial für die Pyrolyse stellen in diesem Projekt die Siebüberläufe aus der Kompostierung dar, welche nicht mit dem Klärschlamm in Kontakt geraten. Durch die Erfahrungen aus dem Proof of Concept im Jahr 2023 kam es im LIFE Projekt zur Erweiterung von zwei Trocknungseinheiten, jedoch aber nur zur Erweiterung von einer Pyrolyseeinheit. Die über zwei Pyrolysen produzierte Überschussenergie ist ausreichend um drei Klärschlammtrockner zu betreiben.

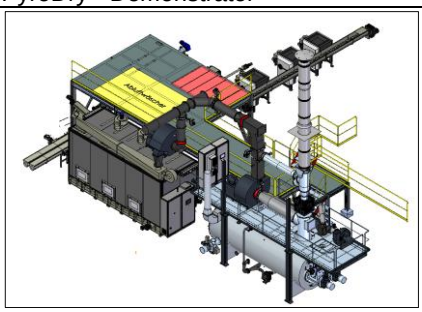
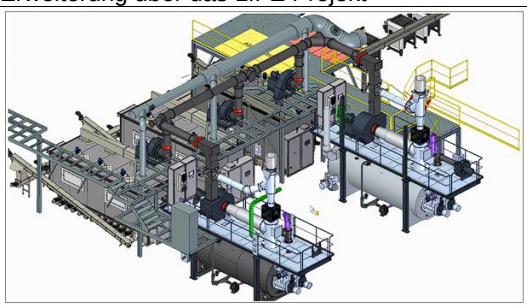
PyroDry - Demonstrator	Erweiterung über das LIFE Projekt
	

Abb. 1: Erweiterung des PyroDry Demonstrators im Zuge des LIFE Projektes

Als Inputmaterial dienen für die Pyrolyse, wie bereits beschrieben, Siebüberläufe, die eine Mischung aus holziger Biomasse und ca. 5% Kunststoffanteil darstellen. Den Einsatzstrom für die Trockner stellt kommunaler Klärschlamm dar, der von 25% auf 90% Trockensubstanz (TS) energieneutral getrocknet wird. In Zahlen bedeutet das, dass bei einer Laufzeit von >8.000 h im Jahr, ca. ~1 MW Überschusswärme durch die beiden Pyrolyseeinheiten produziert und für die Klärschlammtrocknung verwendet wird. Jährlich fallen 5.320 t an Sieüberläufen an, die über die Pyrolyse zu ≥1.200 t/a hochqualitativer, PAK freier Biokohle verarbeitet werden. Diese Biokohle wurde bereits von der Carbon Standard International (CSI) mit dem Sigel EBC Agro zertifiziert.
Das LIFE Projekt wird in das bereits bestehende Nutzungskonzept integriert, welche folgenden Schritte umfasst (vgl. Abb. 2):

Materialtrocknung – Pyrolyse – Klärschlammtrocknung – Abwärmenutzung für Trocknung – Saurer Wäscher – Biofilter

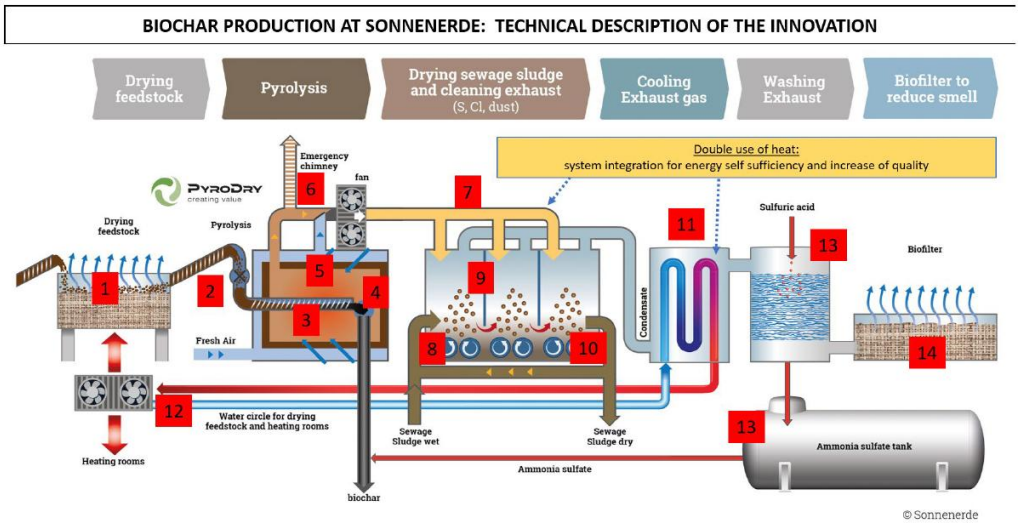


Abb. 2: Gesamtprozess

3.1 Umgesetzte Projektziele

In den ersten 15 Monate erfolgt die Integration einer weiteren PyroDry Linie am Standort Riedlingsdorf. Das vormals verbrannte Material kann nun als Ausgangsmaterial für die Biokohleherstellung eingesetzt werden. Somit entfallen die Entsorgungskosten für die Siebüberläufe. Der Grund für die Verbrennung der Siebüberläufe ist der Kunststoffanteil im Inputmaterial. Durch den Hochtemperaturprozess kommt es zur vollständigen Umsetzung und energetischen Verwertung der Kunststofffracht.

Da das Ausgangsmaterial einen hohen Mineralstoffgehalt aufweist, ist die Auswahl der richtigen Technologie für die erfolgreiche Umsetzung des Projektes essenziell. Der T:CRACKER hat gezeigt, dass auch dieses Material konstant ohne technische Herausforderungen verarbeitet werden konnte. Nebenbei erzielt der hohe Mineralstoffanteil in der Biokohle positive Eigenschaften für Boden- und Baustoffanwendungen.

Mit einer Produktionskapazität von 1.200 t/a an Biokohle konnte das Projektziel klar erfüllt werden. Dies bedeutet, dass neben einer hochqualitativen Biokohle auch jährlich 2.500 t CO_2 über das Konzept fest in der Biokohle gespeichert werden.

In der verbleiben Projektlaufzeit kommt es zur Herstellung eines CO_2 reduzierten Zementzuschlagstoffes und dessen Genehmigung. Im Weiteren wird das Konzept der Pyrolyse von Siebüberläufen europaweit vorgestellt.

PyroDry by NGE	Produzierte Biochar
	

Abb. 3: Blick in die Produktionshalle und die hergestellte Biokohle

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Das Biochar LIFE-Projekt hat in einer realen Betriebsumgebung die technisch-wirtschaftliche Machbarkeit eines modularen PyroDry-Systems zur Erzeugung hochwertiger Biokohle aus Siebüberläufen aus der Kompostierung demonstriert. Das Prinzip „WASTE TO VALUE“ wurde erfolgreich umgesetzt: Ein bislang als Abfall klassifiziertes Material wurde durch eine technische Lösung in ein verwertbares Produkt überführt. Das Konzept vereint dauerhafte Kohlenstoffbindung, Ressourceneffizienz und zusätzliche Erlösquellen (Biokohle, CO_2-Zertifikate) und stellt damit eine vielversprechende, skalierbare Option für nachhaltiges Abfallmanagement und Klimaschutz in Europa dar.

5 DANKSAGUNG

Das Projekt wurde im Rahmen des LIFE-Programms (Programme for the Environment and Climate Action) gefördert (Input Patrick – wie muss ich dies formulieren).

Co-funded by the European Union

KONTAKT

DI Dr. Daniela Meitner
Daniela.meitner@nge.at
+43 664 621 1053
R&D
Next Generation Elements GmbH
www.nge.at

Plastic-Free-Compost: Eine kreislauforientierte Betrachtung zur Verbesserung der Kompostqualität

Josef Adam[1], Martin Wellacher[2], Gernot Kreindl[3], Andreas Kunter[4], Alexandra Loidl[5], Franz Poschacher[6], Georg Weingrill[7] & Andreas Zöscher[8]

[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] Ingenieurbüro Wellacher e.U., Graz, Österreich
[3)] Komptech GmbH, Österreich
[4)] Abfallwirtschaftsverband Leoben, Österreich
[5)] Holding Graz - Kommunale Dienstleistungen GmbH, Österreich
[6)] Poschacher Kompost GmbH, Österreich
[7)] Binder+Co AG, Österreich
[8)] Abfallwirtschaftsverband Mürzverband, Österreich

KURZFASSUNG: Um zukünftig die Produktion von qualitätsgesichertem Kompost sicherzustellen, setzte das Projekt Plastic-Free-Compost an den unterschiedlichen Phasen des Kompostierungskreislaufs an. Hintergrund ist die steigende Störstoffproblematik, insbesondere von Kunststoffen, im Kompost. Für Kompostproduzenten ist es maschinell kaum möglich, aus Bioabfällen mit einem Störstoffgehalt von mehr als 3 m% an der Feuchtmasse (FM) einen qualitätsgesicherten Kompost herzustellen. Rechtlich ist zukünftig ein Grenzwert von 2 m% an Störstoffen für biogene Abfälle vor der Kompostierung zu erwarten. Die im Projekt erforschten Themen waren die Erfassung und Verbesserung der Sammelqualität getrennt gesammelter biogener Abfälle aus Mehrparteienwohnhäusern, die Entwicklung einer Schnellmessmethode zur Störstoffbestimmung, eine optimale Voraufbereitung von stark verunreinigten biogenen Abfällen, die Eignung der sensorgestützten Sortierung für die Vor- und Nachaufbereitung sowie die Kunststofftransformation im Zuge des Kompostierprozesses.

1 EINLEITUNG

Biogene Abfälle aus der Haushaltssammlung sind die Basis für Kompost und somit eine wichtige Säule einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft. Die produzierte Kompostmenge der EU 27 beträgt 17,6 Millionen Tonnen pro Jahr (European Compost Network ECN e.V., 2022). In Österreich standen 2020 insgesamt 404 Kompostanlagen mit einer Behandlungskapazität von 1,68 Millionen Tonnen zur Verfügung. Die hergestellte Kompostmenge betrug mindestens 477.100 Tonnen (BMK, 2023). Der Eintrag von Störstoffen durch Fehlwürfe bei der Sammlung gefährdet die Verwertung biogener Abfälle zu Kompost als Dünger und Bodenverbesserer.

Dabei machen Kunststoffe den dominierenden Anteil aus und sind somit weit bedeutender als Störstoffe aus Glas oder Metall. Analysen aus der Steiermark zeigen einen Kunststoffanteil von 53% gemessen an den Gesamtstörstoffen in biogenem Abfall. Unter Einbeziehung von Verbundstoffen beträgt der Anteil 86%. Unter den Kunststoffen bilden Säcke mit 74% den Hauptanteil (Adam et al., 2024). Bei Bioabfallanalysen aus Oberösterreich betrug der Anteil von Kunststoffen 48 % mit einem Anteil an Säcken von 69% (Kaineder et al., 2021).

Für Kompostproduzenten ist es maschinell kaum möglich, aus Bioabfällen mit einem Störstoffgehalt von mehr als 3% an der Feuchtmasse (FM) einen qualitätsgesicherten Kompost herzustellen, der die geltenden Grenzwerte unterschreitet bzw. optisch frei von Fremdstoffen ist. Zudem schreibt die Novelle der Kompostverordnung in Österreich nach aktuellem Stand zukünftig einen Grenzwert an Störstoffen bei übernommenen biogenen Abfällen vor der Kompostierung von max. 2% vor.

Um die zukünftige Produktion von qualitätsgesichertem Kompost sicherstellen zu können, setzte das Projekt Plastic-Free-Compost an den unterschiedlichen Phasen des Kompostierungs-kreislaufes an. Dieser Kreislauf umfasst die Bürger:innen, die Sammlung, die Vorbehandlung, die Kompostierung, die Nachbehandlung und den fertigen Qualitätskompost (siehe Abbildung 1).



Abb.1: Konsortium Plastic-Free-Compost

Im Projektkonsortium kooperierten folgende acht Partner aus Wissenschaft, Öffentlichkeit und Industrie:

- Montanuniversität Leoben - Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (Konsortialführer)
- Ingenieurbüro Wellacher e.U.
- Abfallwirtschaftsverband Leoben
- Abfallwirtschaftsverband Mürzverband
- Holding Graz - Kommunale Dienstleistungen GmbH
- Binder+Co AG
- Komptech GmbH
- Poschacher Kompost GmbH

Das Projekt wurde von der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert.

Die Schwerpunkte der einzelnen Partner entlang des Kreislaufes waren dabei unterschiedlich. Die Abfallwirtschaftsverbände Mürzverband und Leoben legten den Fokus u.a. auf Maßnahmen für eine verbesserte Sammlung in Gemeinden mit Mehrparteienwohnhäusern, welche eine überhöhter Störstoffbelastung aufweisen. Für die Holding Graz war neben der Sammlung die Vorbereitung von hoher Relevanz. Für den Kompostanlagenbetrieb Poschacher Kompost GmbH aus Kraubath waren hier neben der Qualität des Kompostes die Nachaufbereitung sowie die Kunststofftransformation während des Kompostierungsprozesses ein Thema. Für die Binder+Co AG

bildete der Einsatz der sensorgestützten Sortierung vor und nach der Kompostierung ein Forschungsgebiet. Für die Komptech GmbH war es von großer Bedeutung, genau über die Leistungsfähigkeit einzelner Maschinen sowie deren Kombinationen Bescheid zu wissen. Basierend auf belastbarem Datenmaterial können Auslegungen mit größerer Sicherheit getroffen werden und Produkte gezielt an die Erfordernisse des Marktes angepasst werden.

2 METHODIK UND DURCHFÜHRUNG

Die Ergebnisse in den einzelnen Bereichen entlang des Kompostierungskreislaufes wurden wie folgt gewonnen:

2.1 Sammlung

Die Sammlung biogener Abfälle direkt am Entstehungsort ist der erste Prozessschritt, in welchem Einfluss auf die Qualität genommen werden kann. In den drei steirischen Gemeinden Leoben, Mürzzuschlag und Graz sind Maßnahmen der Verhaltensbeeinflussung gesetzt worden. Diese bestanden daraus, den Bürgerinnen und Bürgern eine einfache und umweltfreundlichere Alternative zur Vorsammlung zu bieten. Daher wurden Papiersäcke, und vereinzelt Kleinbehälter als Vorsammelhilfe, ausgeteilt. In Graz wurden zusätzlich 1900 Gutscheine für weitere 10 Säcke verteilt. Es gab zudem Informationen für die Bürger zur Vermeidung von Störstoffen in der Biotonne. Die Untersuchungen fanden ausschließlich auf Sammeltouren mit Mehrparteienwohnhäusern statt. Die Bereitstellung der Papiersäcke und dem Informationsmaterial passierte auf drei unterschiedliche Weisen, um abschätzen zu können, welche Maßnahme am besten funktioniert.

Um die Wirkung der Maßnahmen zu kontrollierten, wurde eine Schnellmessmethode auf Fahrzeugebene zur Beurteilung herangezogen und jeder mit einer Maßnahme versehenen Sammeltour eine vergleichbare Sammeltour ohne Maßnahme gegenübergestellt.

2.2 Vorbehandlung

Anhand von Großversuchen wurden Zerkleinerungsaggregate, Siebmaschinen und optische Sortiergeräte in verschiedenen Kombinationen miteinander verglichen. Als Inputmaterial diente frisch gesammelter Bioabfall aus Haushalten der Stadt Graz. Abhängig von der Herkunft variieren der Störstoffgehalt zwischen 1,32% und 6,24% mit Gehalte an Kunststoffen zwischen 1,02% und 5,31%. Neben den Massenbilanzen wurden die Abscheidegrade verschiedener Störstoffe ermittelt. Besonderes Augenmerk wurde naturgemäß auf Kunststoffe gelegt. Die Probenahme der einzelnen Teilströme erfolgte nach ÖNORM S 2123-3 (Austrian Standards, 2003). Die Störstoffanalyse erfolgte mittels händischer Sortierung. Zudem erfolgte der Vergleich einzelner Zerkleinerungsaggregate hinsichtlich der Sacköffnungsrate.

2.3 Nachbehandlung

Im Zuge von Technikumsversuchen wurde die Implementierungsmöglichkeit von optischen Sortierverfahren in die Kompostnachaufbereitung untersucht. Dabei wurde mit Kunststoffen verunreinigtem Kompost im Korngrößenbereich 8-25 mm Versuche mit VIS- und/oder NIR-Detektion durchgeführt. Untersucht wurden die Parameter der Wiederholbarkeit, der Sensorik, der Störstoffkonzentration, der Störstoffart, des Durchsatzes sowie der Feuchte und die Auswirkung der Variation dieser Parameter auf das Sortierergebnis.

2.4 Kunststofftransformation

Zur Untersuchung der Desintegration von herkömmlichen Kunststoffen wurde in Großversuchen einem vorgereinigten biogenen Haushaltsabfall eine definierte Menge an bestimmten Kunststoffprodukten beigemengt und einer zehnwöchigen Rotte unter Berücksichtigung verschiedener Kompostwendemaschinen unterzogen. Das Kompostmaterial wurde mechanisch mittels Zerkleinerung und zweistufiger Siebung sowie fallweise durch manuelle Klaubung vorgereinigt. Als Kunststoffprodukte für die Dotierung der biogenen Haushaltsabfälle wurden Säcke aus Light-Density-Polyethylen (LDPE) und Blumentöpfe aus Polypropylen (PP) ausgewählt, da diese Produktarten erfahrungsgemäß typische Störstoffe in den getrennt gesammelten biogenen Abfällen aus Haushalten darstellen. Das dotierte Ausgangsmaterial wurde in zwei gleichwertige Chargen mit je ca. 34 t geteilt und zu zwei Mieten aufgesetzt, die mit verschiedenen Verfahren umgesetzt wurden. In wöchentlichen Intervallen erfolgte die Probenahme je einer Kunststoffart für später durchgeführte Zugversuche.

3 ERGEBNISSE

Folgende neue Ergebnisse und Erkenntnisse wurden in den einzelnen Bereichen im Zuge des Projektes Plastic-Free-Compost gewonnen:

3.1 Sammlung

Nach Setzen der Maßnahme und den in den entsprechenden Städten wurden folgende Beobachtungen gemacht:

Leoben: Der der Störstoffgehalt sank innerhalb von drei Wochen von 4,2% auf 2,6%, was einer Reduktion von 39% entspricht.
Die Auswertung der verwendeten Vorsammelhilfen ergab, dass der Anteil der verwendeten Papiersäcke an allen verwendeten Vorsammelhilfen (Papier und Kunststoff) von 0% auf 26% anstieg. Es gab zudem einen Rückgang der nicht abbaubaren Kunststoffsäcke.

Mürzzuschlag: Über den Zeitraum eines ganzen Jahres konnte festgestellt werden, dass sich der Störstoffgehalt laufend reduzierte. So begann der Versuch bei einem Störstoffgehalt von 4,5%, und reduzierte sich nach einem Monat auf 2,4%, nach sechs Monaten auf 2,0% und nach einem Jahr fanden sich nur mehr 1,5% Störstoffe in der Sammeltour. Somit konnte der Störstoffgehalt um 67% gesenkt werden. Im Hinblick auf die Vorsammelhilfen hat sich der Anteil der Papiersäcke von zuerst 5% auf 86% innerhalb eines Jahres erhöht.

Graz: Es kam zu keiner Reduktion des Störstoffgehalts. Eher ließ sich eine Zunahme von Störstoffen feststellen. Interessanter sind hier die Vorsammelhilfen: Das Angebot der Abholung von weiteren 10 Säcken wurde kaum genutzt, so sind nur 250 der 1900 Gutscheine eingelöst worden. Es ist ersichtlich, dass nach drei Wochen durchaus mehr Papiersäcke verwendet wurden. Der Anteil, der nicht abbaubaren Kunststoffsäcke, ist zurückgegangen, wohingegen der Anteil der gezählten Säcke aus abbaubaren Kunststoffen zugenommen hat.
Das Verteilen der Säcke direkt vor die Wohnungstüren der Mehrparteienhaushalte in regelmäßigen Abständen war die effektivste Methode. Diese bringt jedoch auch einige Herausforderungen mit sich, wie z.B. die Logistik der flächendeckenden Verteilung sowie die Finanzierung der Säcke und des Arbeitsaufwands.

Leitfaden:
Aus den Erkenntnissen und Erfahrungen der gesetzten Maßnahmen wurde ein Leitfaden für Gemeinden zur Verbesserung der Bioabfallqualität gemäß der geplanten Kompostverordnung erstellt. Inhalt ist der Zweck, die Beschreibung der Methode, der zeitliche Ablauf sowie Aufwand und Finanzierung. Es wird vorgeschlagen, die Finanzierung zukünftig über Kostenersätze für schlecht trennende Liegenschaften zu sichern.

3.2 Vorbehandlung

Im Zuge der Versuche ist es gelungen, eine Verfahrenskonfiguration zu finden, die ein Inputprodukt für die Kompostierung mit einem Störstoffgehalt < 2% erzeugt. Das Verfahren beinhaltet Sacköffnen sowie Siebstufen bei 110 bzw. 50 mm.

Der Vergleich der Sacköffnungsrate (Sacköffnungsgrad = Anteil der geöffneten Vorsammelhilfen an allen Vorsammelhilfen nach Durchlaufen der Maschine) ergab für den Einwellenzerkleinerer Terminator mit F-Zerkleinerung einen Wert von 90% und für den Zweiwellenzerkleinerer Crambo 80%. Die Sacköffnungsrate des Terminator xtron betrug 100%.

Es wurde festgestellt, dass 50-80% der Kunststoffe mittels Zerkleinerung und Siebung bei 110 mm ins Überkorn abgeschieden werden können, wobei ein Gutmaterialverlust von 10-15% zu verzeichnen ist. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse ist es durch eine entsprechende Vorbehandlung möglich, aus stark belasteten biogenen Abfallströmen einen Qualitätskompost unter Einhaltung des gesetzlichen Rahmens herzustellen.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen dienen als Basis für die Voraufbereitungsanlage der Holding Graz.

3.3 Einsatz der sensorgestützten Sortierung

Die Eignung der sensorgestützten Sortierung bei der Vor- und Nachaufbereitung wurde nachgewiesen.

Bei der Voraufbereitung besteht die Möglichkeit, jenes Material aus stark verschmutzten Touren einer zweiten Siebstufe zuzuführen. Das Überkorn der ersten Siebstufe (50|120 mm) weist vor der Sortierung einen Störstoffgehalt zwischen 1% und 4% auf. Um diese Fraktion zusätzlich in die Kompostierung zu bringen, kann eine sensorgestützte Sortierung sinnvoll sein. In den entsprechenden Versuchen mittels NIR zeigte sich ein mittlerer Abscheidegrad für Störstoffe in die Fraktion Eject von ca. 40%.

Bei der Nachaufbereitung eignen sich bezüglich der Sensorik VIS sowie die Kombination von VIS und NIR besser für die Kunststoffausschleusung als NIR. Bei den Versuchen bewegte sich der Wirkungsgrad der VIS/NIR- und der VIS-Sortierung im gleichen Bereich zwischen 40% und 50%.

Weiters wurden wichtige weitere Erkenntnisse bezüglich Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Variation des Durchsatzes, Einfluss der Feuchte und Wirkungsgrade bei weichen und harten Kunststoffen gewonnen.

3.4 Kunststofftransformation

Aus den durchgeführten Großversuchen zur Untersuchung der Desintegration von Kunststoffen zeigt sich, dass die Objektvervielfachung der eingesetzten Kunststoffe mit der Höhe der mechanischen Belastung während der Wendung bzw. Umsetzung des Kompostmaterials steigt. So wurden bei den Kunststoffsäcken aus LDPE bei der Umsetzung mittels Verfahren A fast 12-mal so viele Objekte gefunden als mit Verfahren B. Beim Produkt Blumentöpfe aus PP zeigt sich im Vergleich nur eine Verdoppelung der Objektanzahl bei Verfahren A. Die höhere Relevanz von Kunststofffolien gegenüber Hartkunststoffen hinsichtlich der Störstoffthematik im Kompostprodukt konnte nachgewiesen werden.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Entlang des Kompostierungskreislaufes wurden für die einzelnen Themen neue Ergebnisse aus wissenschaftlicher und praktischer Sicht gewonnen. **Sammlung:** Die durchgeführten Maßnahmen bewirken einen kontinuierlichen Rückgang des Störstoffgehaltes bei gesammelten biogenen Abfällen bis zu 67%. **Störstoffmessung:** Die entwickelte Schnellmessmethode reduziert den personellen und zeitlichen Aufwand um rund 80-90% gegenüber der manuellen Sortierung. **Vorbehandlung**: Die erforschte Verfahrenskonfiguration erzeugt ein Inputprodukt für die Kompostierung von < 2% und dient als Basis einer Voraufbereitungsanlage der Holding Graz. **Sensorgestützte Sortierung:** Die Eignung der sensorgestützten Sortierung bei der Vor- und Nachaufbereitung wurde nachgewiesen. **Kunststofftransformation:** Ergebnisse über das Zersetzungs- und Vervielfachungsverhalten verschiedener Kunststoffarten mit unterschiedlichen Umsetzungsverfahren bei der Kompostierung wurden gewonnen.

LITERATURVERZEICHNIS

Adam, J., Wellacher, M., Azizi, F., Loidl, A., Z., A., P., F., Pomberger, R., Tischberger-Aldrian, A. (2024). Determination and improvement of the quality of separately collected bio-waste from households, Leoben.

Austrian Standards (2003). ÖNORM S 2123-3: Probenahmepläne für Abfälle – Teil 3: Probenahme von festen Abfällen aus Stoffströmen. Austrian Standards International, Wien.

BMK (2023). Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023, Teil 1. Wien.

European Compost Network ECN e.V. (2022). ECN-report-2022. Bochum, Deutschland.

Kaineder, S., Wohlmuth, R., Beigl, P. (2021). Störstoffanteile in der Biotonne - Präsentation Ergebnisse der Bioabfallanalyse.

KONTAKT

DI (FH) Josef Adam, Meng.
Josef.adam@unileoben.ac.at
0664/111 21 58
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben
https://www.unileoben.ac.at/avaw/

Vererdungsanlagen in Österreich

Antonia Bernhardt[1], Christian Neubauer[1], Maria Tesar[1] & Vincent Wörndl[1]
[1)] Umweltbundesamt, Abfallwirtschaft & Vermeidung, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Vererdungsanlagen stellen einen spezialisierten Bereich der österreichischen Abfall- und Kreislaufwirtschaft dar und dienen der Herstellung kulturfähiger Erden aus mineralischen und organischen Abfällen. Die Studie „Vererdungsanlagen in Österreich“ untersuchte die rechtliche Einordnung, die technische Ausgestaltung und die Verbreitung von Vererdungsanlagen in Österreich. Auf Basis von Daten des Elektronischen Datenmanagements (EDM), insbesondere des Zentralen Anlagenregisters (ZAReg) und der elektronischen Abfallbilanz (eBilanz), sowie einer Validierung mit den Bundesländern wurden fünf Vererdungsanlagen im engeren Sinne identifiziert.
Es zeigte sich, dass der Begriff Vererdungsanlage in der Praxis uneinheitlich verwendet wird und von anderen Anlagentypen wie Erdenwerken, Klärschlammvererdungsanlagen sowie Sieb- und Mischanlagen abzugrenzen ist. Vor-Ort-Erhebungen belegen eine große technische Heterogenität und zeigen, dass biologische Vererdungsprozesse mit Ton-Humus-Komplexbildung nur in wenigen Fällen stattfinden. Trotz ihrer geringen Anzahl leisten Vererdungsanlagen einen wichtigen Beitrag zur Verwertung geeigneter Abfälle in Österreich, beispielsweise zur Herstellung von Deponieoberflächenabdeckungen und für Rekultivierungsmaßnahmen im Sinne der Kreislaufwirtschaft.

1 EINLEITUNG

Im Jahr 2022 fielen in Österreich rund 43,8 Millionen Tonnen Aushubmaterial an (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, 2024, S. 225), das zugleich mengenmäßig den bedeutendsten Ausgangsstoff für die Herstellung kulturfähiger Erden darstellt. Vor dem Hintergrund der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie und der angestrebten Schonung natürlicher Ressourcen spielen Vererdungsanlagen eine wichtige Rolle bei der Verwertung mineralischer und organischer Abfälle sowie der Kreislaufführung im Bau- und Deponiebereich. Vererdungsanlagen dienen der Herstellung kulturfähiger Erden, die natürliche Bodenfunktionen übernehmen können. Hierzu werden definierte Mischungen aus Abfällen und anderen Materialien biologischen und/oder mechanischen Behandlungsprozessen unterzogen, wodurch ein bodenähnliches, mineralisch-organisches Oberbodenmaterial entsteht (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, 2023).
Ziel der vorliegenden Studie war es, den Status quo von Vererdungsanlagen in Österreich zu erfassen und ihre rechtliche, technische sowie fachliche Einordnung zu untersuchen. Im Mittelpunkt standen die Analyse der geltenden Rahmenbedingungen, die Identifikation und Abgrenzung von Vererdungsanlagen gegenüber anderen Anlagentypen zur Erdenherstellung, die Bewertung der tatsächlichen Herstellung kulturfähiger Erden sowie die Beschreibung der eingesetzten Verfahren und relevanten Anlagenstrukturen.
Der rechtliche und normative Rahmen für den Betrieb von Vererdungsanlagen wird maßgeblich bestimmt durch den Bundes-Abfallwirtschaftsplan mit dem Behandlungsgrundsatz „Erden aus Abfällen“, die ÖNORMEN S 2122 Teile 1 bis 4 – Erden aus Abfällen und S 2210 – Komposterden und Kompostsubstrate sowie die Kompostverordnung, die Deponieverordnung und weitere einschlägige bundes- und landesrechtliche Bestimmungen. Das Zusammenwirken dieser Vorgaben prägt sowohl die technische Ausgestaltung als auch die fachliche Einordnung von Vererdungsanlagen.

2 METHODIK

Die Identifikation von Vererdungsanlagen in Österreich erfolgte anhand eines mehrstufigen Ansatzes auf Basis von ZAReg-Daten und eBilanz-Meldungen des Referenzjahres 2024 aus dem EDM. Ausgehend von relevanten Anlagentypen und Schlüsselnummern wurden potenzielle Anlagen ermittelt und durch Plausibilitätsprüfungen, Online-Recherchen sowie die Analyse von Input- und Outputströmen fachlich evaluiert. Auf diese Weise entstand eine vorläufige Arbeitsliste von Anlagen mit Relevanz für die Herstellung kulturfähiger Erden.
In einem zweiten Schritt wurde diese Liste gemeinsam mit den zuständigen Fachexpert:innen der Bundesländer überprüft und ergänzt, um regionale Besonderheiten und die tatsächliche betriebliche Praxis zu berücksichtigen. Abschließend wurden die fünf identifizierten Anlagen vor Ort besichtigt und anhand standardisierter Anlagenberichte hinsichtlich der eingesetzten Materialien, technischen Verfahren und erzeugten Outputmaterialien analysiert.

3 BEGRIFFLICHE ABGRENZUNG UND ANLAGENTYPEN

Die begriffliche Abgrenzung von Vererdungsanlagen basiert auf dem Behandlungsgrundsatz „Erden aus Abfällen“ des Bundes-Abfallwirtschaftsplans. In der Praxis wird der Begriff Vererdungsanlagen jedoch uneinheitlich verwendet und teilweise auch für technisch andersartige Anlagen eingesetzt. Eine klare Definition ist daher erforderlich, um vergleichbare Anlagen zu identifizieren und von anderen Verfahren zur Erdenherstellung abzugrenzen.
Zur systematischen Einordnung wurde die übergeordnete Kategorie „Anlagen zur Herstellung von Erden unter Einsatz von Abfällen“ eingeführt. Diese umfasst neben Vererdungsanlagen auch Erdenwerke zur Herstellung von Komposterden und Kompostsubstraten, Klärschlammvererdungsanlagen sowie Sieb- und Mischanlagen für Aushubmaterialien. Die Zusammenfassung dieser Anlagentypen ermöglicht eine konsistente Abgrenzung von Vererdungsanlagen.
Als Vererdungsanlagen im Sinne dieser Studie gelten ausschließlich Anlagen, bei denen die Herstellung kulturfähiger Erden (SN 31472 - 31475) einen wesentlichen Bestandteil des Behandlungsprozesses darstellt. Des Weiteren erfolgt die Zuordnung anhand einer Kombination verfahrenstechnischer Merkmale und regulatorischer Einordnungen.
Kulturfähige Erden können aus regulatorischer Sicht entweder über den Behandlungsgrundsatz 4.6 „Kompost“ („Weg A“, gemäß ÖNORM S 2210) oder über den Behandlungsgrundsatz 4.8 „Erden aus Abfällen“ („Weg B“, gemäß ÖNORM S 2122) hergestellt werden. In der Praxis wird überwiegend Weg B angewendet. Der Fokus der vorliegenden Studie und der dargestellten Analysen lag auf „Weg B“. Siehe hierzu Abbildung 1.

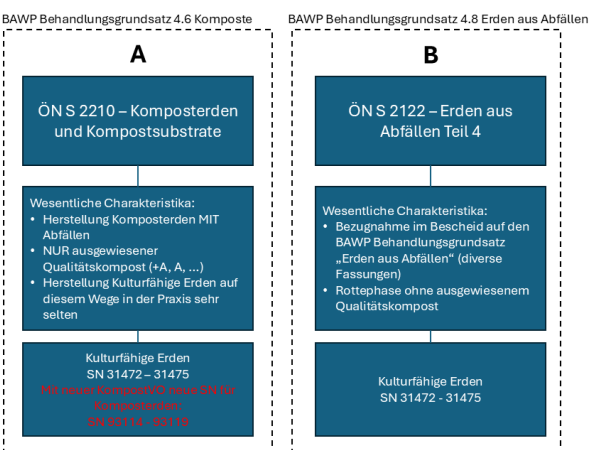


Abb. 1: Regulatorische Wege bei der Herstellung kulturfähiger Erden (© Umweltbundesamt)

4 VOR-ORT BESICHTIGUNGEN VON VERERDUNGSANLAGEN



Abb. 2: Vererdungsanlage der SBV Steinbruch & Baurestmassenverwertung GmbH in Sankt Veit im Pongau (© Umweltbundesamt).

Die fünf in Österreich identifizierten Vererdungsanlagen wurden besichtigt und in standardisierten Anlagenberichten beschrieben.
Die identifizierten Vererdungsanlagen unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer technischen Ausführung, den angewendeten Prozessen (z. B. Rottephase oder Ton-Humus-Komplexbildungsphase) als auch hinsichtlich der Einsatzbereiche.
Während in der Vergangenheit angewendete Verfahren, wie etwa das ursprünglich am Standort Langes Feld in Wien eingesetzte „Husz-Verfahren“ (Umweltbundesamt, 2001), noch mehrstufige biologische Prozessführungen mit langen Verfahrensdauern von teilweise über einem Jahr umfassten, erfolgt die Herstellung kulturfähiger Erden heute vielfach in deutlich vereinfachter Form. Die Prozessdauer wurde dem Verwendungszweck angepasst und teils aus betriebsorganisatorischen Gründen wesentlich reduziert. In der Praxis reicht die Bandbreite mittlerweile von rein mechanischen Aufbereitungs- und Mischvorgängen bis hin zu Verfahren mit sowohl biologischen Rottephasen als auch Ton-Humus-Komplexbildungsphasen.

Tab. 1: Im Zuge der Vor-Ort-Besichtigungen untersuchte Vererdungsanlagen.

Betreiber	**Anlagenstand-ort**	**Output Schlüsselnum-mer**	**Durchschnittl. Input [t pro Jahr]**	**Durchschnittl. Output [t pro Jahr]**
Altlastensanierung und Abraumdepo-nie Langes Feld GmbH	1210 Wien	SN 31475	21.200 t	20.000 t
Altlastensanierung und Abraumdepo-nie Langes Feld GmbH	2401 Fisch-amend-Dorf	SN 31475	7.000 t	6.000 t
Energie AG Oberösterreich Umwelt Service GmbH	4113 Unterhart	SN 31472 - 31475	12.000 t	11.000 t
SBV Steinbruch & Baurestmassen-verwertung GmbH	5621 Sankt Veit im Pongau	SN 31472 - 31475	30.000 – 35.000 t	-[1]
Christian Ehrens-berger GmbH	5451 Imlau	SN 31472 - 31475	60.000 t	-[1]

[1)] Keine Angabe seitens des Betriebes.

5 SCHLUSSFOLGERUNG

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden in Österreich fünf Vererdungsanlagen identifiziert. Diese stellen trotz ihrer geringen Anzahl im Zusammenhang mit Deponieoberflächenabdeckungen sowie der Verwertung geeigneter mineralischer und organischer Abfälle eine bedeutende spezifische Nische der Abfallwirtschaft dar.
Es bestehen derzeit erhebliche Unterschiede in der praktischen Ausgestaltung der Verfahren sowie Unschärfen in der begrifflichen und regulatorischen Zuordnung der Anlagen. Die in der Studie beschriebene Definition von Vererdungsanlagen sowie die Abgrenzung von Vererdungsanlagen zu anderen Anlagen, welche ebenfalls Erden unter Einsatz von Abfällen herstellen, schaffen eine wesentliche Grundlage für die Einordnung der Anlagen.
Darüber hinaus zeigt die Studie, dass der Behandlungsgrundsatz 4.8 „Erden aus Abfällen“ des BAWP 2023 in der Praxis grundsätzlich angewendet wird, insbesondere im Hinblick auf definierte Input- und Outputmaterialien. Gleichzeitig wurde festgestellt, dass in diesem Zusammenhang die ÖNORM S 2122 Teile 1 bis 4 in der betrieblichen Praxis nur von geringer Bedeutung ist. Die im Behandlungsgrundsatz 4.8 geforderten Elemente der Qualitätssicherung gemäß ÖNORM S 2122 Teil 4 (Österreichisches Normungsinstitut, 2013) werden jedoch in ihren wesentlichen Grundzügen auch in der Praxis umgesetzt.

LITERATURVERZEICHNIS

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität. (2023). Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023 Teil 1. Wien.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität. (2024). Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Wien.

Österreichisches Normungsinstitut. (2013). Erden aus Abfällen (ÖNORM S 2122 1 - 4). Österreichisches Normungsinstitut.

Umweltbundesamt. (2001). Positionspapier zur Vererdung von Abfällen aus abfallwirtschaftlicher Sicht. Wien.

KONTAKT

Vincent Wörndl MArch, MAS
vincent.woerndl@umweltbundesamt.at
Tel: +43 664 6206849
Team Abfallwirtschaft & Vermeidung
Umweltbundesamt GmbH
https://www.umweltbundesamt.at

Zwischen Nährstoffrückgewinnung und Schadstoffrisiken: Bioabfall und Klärschlamm im Fokus

Anke Bockreis[1] & Lívia Hökl[1]
[1]Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Umwelttechnik, Innsbruck, Österreich

KURZFASSUNG: Durch Komposte aus Klärschlamm sowie aus getrennt gesammelten Bioabfällen gelangen PFAS (Per- und Polyfluorierte Alkylverbindungen) und andere Schadstoffe in Böden. Es besteht das Risiko einer langfristen Anreicherung, insbesondere da für PFAS und Mikroplastik noch keine verbindlichen Grenzwerte gelten. Da herkömmliche Verfahren diese Schadstoffe nur unzureichend entfernen, sind innovative Behandlungsverfahren, strenge Vorgaben und Maßnahmen zur Vermeidung von Schadstoffeinträgen an der Quelle erforderlich, um eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft sicherzustellen.

1 EINLEITUNG

Im Spannungsfeld zwischen zunehmender Ressourcennutzung und -rückgewinnung und dem notwendigen Schutz vor Schadstoffeinträgen steht die Abfall- und Kreislaufwirtschaft vor wachsenden Herausforderungen. Einerseits sollen Abfälle möglichst hochwertig verwertet und Stoffkreisläufe geschlossen werden, andererseits erfordert der Umgang mit persistenten, potenziell gesundheits- und umweltgefährdenden Substanzen eine sichere Rückhaltung und Zerstörung. Insbesondere persistente organische Schadstoffe (POPs), die langlebig, bioakkumulierend und gesundheitsschädlich sind, stellen hierbei eine zentrale Problematik dar. Internationale Vorgaben wie das Stockholmer Übereinkommen verlangen deshalb deren sichere Zerstörung und dauerhafte Immobilisierung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2019). Zu dieser Stoffgruppe zählen auch PFAS (Per- und Polyfluorierte Alkylverbindungen), die wegen der stabilen C-F-Bindung wasser- und fettabweisend sowie thermisch und chemisch sehr beständig sind (Buck et al., 2011), aber gerade auch aufgrund dieser Eigenschaften in einer Vielzahl von Industrie- und Konsumprodukten (Textilien, Kosmetika, Lebensmittelverpackungen, Feuerlöschschäume, etc.) eingesetzt werden (Clara et al., 2008). Entsprechend häufen sich PFAS in der Umwelt an, verbleiben dort über Jahrzehnte und können atmosphärisch über weite Strecken transportiert werden, wodurch auch entfernte Ökosysteme belastet werden (Evich et al., 2022). Emissionen entstehen dabei entlang des gesamten Lebenszyklus – von Herstellung und Verarbeitung über Nutzung bis zur Entsorgung. Zunehmend gelangen PFAS in Abfallströme, einschließlich organischer Fraktionen wie Bioabfall, und werden so zu einem relevanten Eintragspfad in Verwertungssysteme – mit neuen Herausforderungen für eine schadstofffreie Kreislaufwirtschaft. Ebenso rückt die Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm als Nebenprodukt der mehrstufigen Abwasserreinigung angesichts steigender Umwelt- und Ressourcenschutzanforderungen verstärkt in den Fokus. Dank seines Gehalts an organischer Substanz, Nährstoffen und Spurenelementen besitzt er grundsätzlich ein großes Potenzial für die stoffliche Nutzung im Sinne der Kreislaufwirtschaft. Gleichzeitig bergen enthaltene Schadstoffe, wie beispielsweise PFAS oder Mikroplastik große Risiken, sodass die bestehende Entsorgungssituation in Österreich sorgfältig bewertet werden muss.

2 AKTUELLER STAND ZU PFAS IN AUSGEWÄHLTEN ABFALLSTRÖMEN

Die breite Nutzung von PFAS in Industrie- und Konsumgütern führt zwangsläufig zu deren Eintrag in alle Abfallströme. Die Behandlung PFAS-haltiger Abfälle ist technisch anspruchsvoll: Die hohe chemische Stabilität und Vielfalt der Verbindungen begrenzen die Wirksamkeit konventioneller Verfahren (Tavasoli et al., 2021; Meegoda et al., 2022). Als zuverlässige Zerstörung gilt derzeit die thermische Behandlung (Gehrmann et al., 2024). Verfahren wie Aktivkohleadsorption oder Ionenaustausch ermöglichen zwar eine effektive Abtrennung aus wässrigen Phasen, verlagern die Belastung jedoch auf feste Rückstände, die wiederum einer sicheren (thermischen) Behandlung zuzuführen sind, um eine Umweltfreisetzung zu vermeiden (O'Connor et al., 2022). PFAS gelangen über Deponien (Sickerwasser), Abwasser und Klärschlamm ebenso in die Umwelt wie über Komposte aus der getrennten Sammlung, wobei die Konzentrationen stark herkunftsbedingt variieren und insbesondere in industriell geprägten Strömen erhöht sind (O'Connor et al., 2022). Klärschlamm stellt dabei eine Senke v.a. für langkettige PFAS dar, wird jedoch im Zuge der landwirtschaftlichen Verwertung selbst wieder zu einer sekundären Eintragsquelle (DeSilva et al., 2021; Saliu et al., 2024). Neben Wasser- und Schlammwegen tragen auch weitere Materialströme wesentlich zur PFAS-Belastung bei, darunter Papier, Kunststoffe und Textilien. Relevante Konzentrationen finden sich vor allem in beschichteten Materialien wie fett- und wasserabweisenden Papieren sowie funktional ausgerüsteten Textilien, die sowohl in Primär- als auch in Recyclingströmen auftreten können.

Über verschiedene Wege gelangen PFAS in organische Abfallfraktionen wie Bioabfälle. Eine wichtige Eintragsquelle sind sowohl Lebensmittel, die durch Umweltkontamination sowie durch den Kontakt mit PFAS-haltigen Verpackungen belastet werden, als auch die entsprechenden Lebensmittelkontaktmaterialien selbst, die häufig höhere Konzentrationen aufweisen als die Lebensmittel selbst. Fluorbeschichtete Koch- und Backutensilien können indirekt zum Eintrag beitragen. Zusätzlich tragen Garten- und Grünabfälle zur Belastung bei, bedingt durch PFAS-Aufnahme aus belasteten Böden, Bewässerungswasser und atmosphärischen Eintrag, wodurch Pflanzen PFAS aufnehmen und in ihrem Gewebe anreichern können. Einmal in den Bioabfall eingetragen, werden PFAS durch biologische Behandlungsprozesse kaum entfernt. Bei der Kompostierung erfolgt in der Regel kein Abbau; vielmehr kann es durch die Transformation von Vorläufersubstanzen teilweise zu einer Erhöhung der PFAS-Konzentrationen kommen (Butt et al., 2014; Lazcano et al., 2019; Timshina et al., 2024). Die Vergärung führt kaum zu einem biologischen Abbau (Deligiannis et al., 2024; Lakshminarasimman et al., 2021; Jiao et al., 2022). Daher verbleiben PFAS im behandelten Material und werden über Komposte in Böden, Pflanzen und Futtermittel eingebracht, was langfristig ökologische sowie gesundheitliche Risiken verursacht (Brändli et al., 2006; Gobelius et al., 2017; Sungur et al., 2020; DeSilva et al., 2021).

3 PFAS BELASTUNG IM ÖSTERREICHISCHEN BIOABFALL

Vor dem Hintergrund der Vielzahl potenzieller PFAS-Eintragspfade stellt sich die Frage, in welchen Abfallströmen belastbare quantitative Aussagen möglich sind und wo aufgrund heterogener Zusammensetzung und begrenzter Datenlage lediglich Abschätzungen vorgenommen werden können. Während für Klärschlamm bereits eine vergleichsweise umfangreiche Datenbasis aus regulatorischen Monitoringprogrammen vorliegt, sind Daten zu Bioabfällen deutlich eingeschränkter verfügbar. Im Folgenden wird daher zunächst der Bioabfall als datenlimitierter, jedoch potenziell relevanter Eintragspfad betrachtet. Da sowohl nationale als auch internationale Daten zu PFAS-Konzentrationen nur begrenzt vorliegen und aufgrund fehlender Normierung der Probenahme und Analytik nur eingeschränkt vergleichbar sind, wurde zur Abschätzung der PFAS-Frachten ein vereinfachter Ansatz gewählt. Hierfür wurden Daten zur Zusammensetzung des Bioabfalls aus einer oberösterreichischen Studie herangezogen (Amt der Oö. Landesregierung, 2021) und mit Literaturdaten zu PFAS-Konzentrationen einzelner Bioabfallfraktionen kombiniert. Auf dieser Grundlage wurden die PFAS-Frachten berechnet und entsprechend der

Bioabfallzusammensetzung zur Gesamtbelastung aggregiert. Die zugrunde liegende Bioabfallmenge stammt aus dem Statusbericht 2025 (BMLUK, 2025). Das Vorgehen ermöglicht eine erste Abschätzung der potenziellen PFAS-Belastung im österreichischen Bioabfall, berücksichtigt jedoch die bestehenden Unsicherheiten aufgrund der eingeschränkten Datenlage. Die genauere Berechnung samt Datengrundlage findet sich in Hökl und Bockreis (2026). Die Berechnungen ergeben eine geschätzte jährliche PFAS-Gesamtfracht von mindestens 40 kg im anfallenden Bioabfall. Dabei werden ausschließlich die Fraktionen Papier, Obst, Gemüse, Milchprodukte, Fleisch und Fisch sowie verpackte Lebensmittel berücksichtigt, die zusammen rund 24 % des Bioabfalls ausmachen. Für die verbleibenden 76 %, darunter unvermeidbare Lebensmittelabfälle, Gartenabfälle und Störstoffe, konnten aufgrund fehlender Konzentrationsdaten oder unzureichender Charakterisierung keine PFAS-Gehalte ermittelt werden. Da insbesondere Störstoffe potenzielle PFAS-Quellen darstellen, ist davon auszugehen, dass die tatsächliche PFAS-Gesamtbelastung des Bioabfalls über dem berechneten Mindestwert liegt (Hökl und Bockreis, 2026). Unter zusätzlichen Annahmen, wie dass nur 50 % der daraus hergestellten Produkte landwirtschaftlich genutzt werden, ergibt sich ein potenzieller jährlicher PFAS-Austrag von rund 20 kg (Hökl und Bockreis, 2026). Zum Vergleich werden in der Literatur PFAS-Konzentrationen im Kompost von 3,4 bis 102 µg kg^{-1} berichtet (Bändli et al., 2006; Sungur et al., 2020). Unter den gleichen Annahmen wie in der vorangegangenen Abschätzung ergibt sich daraus ein potenzieller PFAS-Eintrag von etwa 3 bis 97 kg pro Jahr. Der berechnete Wert von 20 kg liegt innerhalb dieser Bandbreite, jedoch im unteren Bereich, was auf eine tendenziell höhere tatsächliche Belastung hindeutet. Unabhängig von der absoluten Größenordnung sind PFAS aufgrund ihrer hohen Persistenz umweltrelevant, da sie sich in Böden anreichern und langfristig akkumulieren können. Bereits geringe Konzentrationen gelten als kritisch, weshalb im Sinne des Vorsorgeprinzips weitere Einträge möglichst zu vermeiden und die Verbreitung von PFAS zu begrenzen ist (Friesl-Hanl, 2022).

4 PFAS BELASTUNG IM KLÄRSCHLAMM

Im Gegensatz zu Bioabfall basiert die Datenlage für Klärschlamm auf einem deutlich höheren Grad an Standardisierung und Monitoringdichte. Klärschlamm stellt einen integrierten Schadstoffsammelstrom kommunaler Abwässer dar, wodurch Einträge aus diffusen Quellen zusammengeführt und analytisch vergleichsweise gut erfasst werden können. Dennoch bestehen auch hier Unsicherheiten, insbesondere hinsichtlich regionaler Unterschiede. Vor diesem Hintergrund wurden die Schadstofffrachten aus der landwirtschaftlichen Klärschlammausbringung zur Bewertung möglicher Umweltausbringungen und Bodenbelastungen abgeschätzt. Die Berechnung basiert auf veröffentlichten Konzentrationsdaten sowie aktuellen Angaben zum Klärschlammaufkommen in Österreich (Hökl et al., 2026). Die Methodik berücksichtigt jedoch ausschließlich mittlere Werte und bildet räumliche sowie zeitliche Variabilität nicht ab. Als Grundlage dient ein jährliches Klärschlammaufkommen von 197.300 t Trockenmasse, wovon 25 % landwirtschaftlich genutzt werden (Hökl et al., 2026). Die daraus resultierenden Frachten liegen bei PFAS nach Clara et al. bei 0,1 – 1,5 kg a^{-1} bzw. nach ÖWAV bei PFOS (Perfluoroctansulfonsäure) bei 1,1, - 1,5 kg a^{-1} und PFOA (Perfluoroctansäure) bei 0,03 – 0,3 kg a^{-1} (Clara et al., 2016; ÖWAV, 2018; Hökl et al., 2026). Zur Einordnung dieser Einträge ist zu berücksichtigen, dass Böden mit einem PFOA-PFOS-Gehalt von mehr als 2 µg kg^{-1} TM als vorbelastet gelten (Friesl-Hanl, 2022). Ergänzend zeigen Untersuchungen von Wood (2019), dass die PFOS-Exposition des Menschen infolge der Ausbringung von Klärschlammkompost auf landwirtschaftlichen Flächen potenziell zu einer Überschreitung des tolerierbaren wöchentlichen Aufnahmewertes (TWI; 4,4 ng/kg Körpergewicht pro Woche) führen kann.

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

PFAS sind aufgrund ihrer Persistenz, Bioakkumulation und Toxizität eine relevante Herausforderung für die Abfallwirtschaft. Sie treten in verschiedenen Bioabfallfraktionen auf, wobei für Österreich eine jährliche Gesamtbelastung von mindestens 40 kg abgeschätzt wird, jedoch mit hoher Unsicherheit aufgrund begrenzter Daten. Der Vergleich zwischen Bioabfall und Klärschlamm zeigt dabei deutlich unterschiedliche Datenqualitäten und Unsicherheitsniveaus. Während Bioabfall potenziell relevante, jedoch schwer quantifizierbare PFAS-Einträge aufweist, basiert die Bewertung von Klärschlamm auf einer deutlich robusteren Datenbasis. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, zukünftige Monitoring- und Forschungsstrategien insbesondere im Bereich der getrennt gesammelten Bioabfälle zu harmonisieren und methodisch zu standardisieren. Über diese methodische Einordnung hinaus stellt sich die Frage nach der umweltbezogenen Relevanz dieser Einträge im Kontext der Kreislaufwirtschaft. In der Kreislaufwirtschaft stellen PFAS ein Risiko dar, da sie über die Verwertung organischer Abfälle in Stoffkreisläufe gelangen und sich dort anreichern können. Gleichzeitig bietet die stoffliche Verwertung von getrennt gesammelten Bioabfällen wichtige ökologische Vorteile wie Klimaschutz, Ressourcenschonung, Humusaufbau und Förderung der Bodenfruchtbarkeit. Die Herausforderung besteht darin, diese Vorteile mit dem Schutz vor Schadstoffeinträgen zu vereinbaren. Aus diesem Spannungsfeld ergibt sich ein klarer Handlungsbedarf auf mehreren Ebenen. Zukünftig sind eine verbesserte Datengrundlage, optimierte Analytik sowie Strategien zur Minimierung von PFAS-Einträgen erforderlich. Besonders relevant ist die Reduktion von PFAS-Quellen, etwa durch den Ersatz PFAS-haltiger Verpackungen und Materialien sowie die Vermeidung von Fehlwürfen in die Biotonne durch klare Vorgaben und Aufklärung. Nur das Zusammenspiel von Produktregulierung, getrennter Sammlung und Kontrolle kann den Eintrag in den Bioabfall wirksam reduzieren und schadstoffarme Kreisläufe unterstützen. Während diese Maßnahmen primär auf Bioabfallströme abzielen, zeigt der Blick auf andere Behandlungs- und Entsorgungssysteme, dass unterschiedliche Abfallpfade auch unterschiedliche strukturelle Entwicklungen aufweisen. Klärschlamm stellt zugleich eine Ressource, eine Schadstoffsenke und eine potenzielle, sekundäre Schadstoffquelle dar. Vor dem Hintergrund zunehmender Risiken durch Schadstoffe, wie PFAS, aber auch Mikroplastik, ist eine unveränderte Fortführung der bisherigen stofflichen Verwertung jedoch nicht mehr vertretbar. Die ab 2033 verpflichtende thermische Behandlung sowie die Phosphorrückgewinnung stellen einen wichtigen Schritt in Richtung einer nachhaltigen Entsorgung dar, erfordern jedoch erhebliche Investitionen, technologische Entwicklungen und regulatorische Anpassungen. Insgesamt befindet sich die Klärschlammentsorgung in Österreich in einem Transformationsprozess. Künftige Strategien müssen darauf abzielen, Ressourcennutzung und Umweltschutz in Einklang zu bringen und nachhaltige, schadstoffarme Lösungen konsequent weiterzuentwickeln.

FÖRDERUNG

Das Dissertationsprojekt „Entwicklung einer maßgeschneiderten Messmethode zur Detektion und Validierung von PFAS in biogenen Abfallströmen“ (FFG Projektnummer FO999922979) wird in Kooperation mit der Innsbrucker Kommunalbetriebe AG (IKB) durchgeführt. Es wird durch das Land Tirol im Rahmen des Dissertationsprogramms für Tiroler Hochschulen gefördert und von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt und unterstützt.

LITERATURVERZEICHNIS

Amt der Oö. Landesregierung (2021) Information zur Online-Pressekonferenz mit Landesrat Stefan Kaineder, Bgm. Roland Wohlmutz, Mag. Dipl.-Ing. Peter Beigl am 19. Mai 2021 zum Thema Störstoffanteile in der Biotonne - Präsentation Ergebnisse der Bio-Abfallanalyse, Linz

Brändli RC, Bucheli TD, Kupper T (2006) Organic pollutants in source-separated compost

Buck RC, Franklin J, Berger U, Conder JM, Cousins IT, Voogt P de, Jensen AA, Kannan K, Mabury SA, van Leeuwen SPJ (2011) Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. Integrated environmental assessment and management 7:513–541. doi:10.1002/ieam.258

Butt CM, Muir DCG, Mabury SA (2014) Biotransformation pathways of fluorotelomer-based polyfluoroalkyl substances: a review. Environmental toxicology and chemistry 33:243–267. doi:10.1002/etc.2407

Clara M, Scheffknecht C, Scharf S, Weiss S, Gans O. (2008) Emissions of perfluorinated alkylated substances (PFAS) from point sources--identification of relevant branches. Water science and technology, a journal of the International Association on Water Pollution Research 58:59–66. doi:10.2166/wst.2008.641

Deligiannis M, Gkalipidou E, Gatidou G, Kostakis MG, Triantafyllos Gerokonstantis D, Arvaniti OS, Thomaidis NS, Vyrides I, Hale SE, Peter Arp H, Fountoulakis MS, Stasinakis AS (2024) Study on the fate of per- and polyfluoroalkyl substances during thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge and the role of granular activated carbon addition. Bioresource Technology 406:131013. doi:10.1016/j.biortech.2024.131013

DeSilva AO, Armitage JM, Bruton TA, Dassuncao C, Heiger-Bernays W, Hu XC, Kärrman A, Kelly B, Ng C, Robuck A, Sun M, Webster TF, Sunderland EM (2021) PFAS Exposure Pathways for Humans and Wildlife: A Synthesis of Current Knowledge and Key Gaps in Understanding. Environmental toxicology and chemistry 40:631–657. doi:10.1002/etc.4935

Evich MG, Davis MJB, McCord JP, Acrey B, Awkerman JA, Knappe DRU, Lindstrom AB, Speth TF, Tebes-Stevens C, Strynar MJ, Wang Z, Weber EJ, Henderson WM, Washington JW (2022) Per- and polyfluoroalkyl substances in the environment. Science 375:eabg9065. doi:10.1126/science.abg9065

Friesl-Hanl W (2022) Klärschlammkompost; "Circular Economy" im Abfallbereich - Evaluierung im Hinblick auf Klärschlammkompost

Gobelius L, Lewis J, Ahrens L (2017) Plant Uptake of Per- and Polyfluoroalkyl Substances at a Contaminated Fire Training Facility to Evaluate the Phytoremediation Potential of Various Plant Species. Environmental Science & Technology 51:12602–12610. doi:10.1021/acs.est.7b02926

Gehrmann H-J, Taylor P, Aleksandrov K, Bergdolt P, Bologa A, Blye D, Dalal P, Gunasekar P, Herremanns S, Kapoor D, Michell M, Nuredin V, Schlipf M, Stapf D (2024) Mineralization of fluoropolymers from combustion in a pilot plant under representative european municipal and hazardous waste combustor conditions. Chemosphere 365:143403. doi:10.1016/j.chemosphere.2024.143403

Hökl L & Bockreis A. (2026). Abschätzung von PFAS im Bioabfall in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 78:87-93. https://doi.org/10.1007/s00506-025-01185-1

Hökl L, Ebner C, Wehner M, Lichtmannegger T. & Bockreis, A. (2026). Klärschlammentsorgung in Österreich: Status quo, ökologische Risiken und zukünftige Strategien. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 78:94-102. https://doi.org/10.1007/s00506-025-01189-x

Jiao Y, Zou M, Yang X, Tsang YF, Chen H (2022) Perfluorooctanoic acid triggers oxidative stress in anaerobic digestion of sewage sludge. Journal of Hazardous Materials 424:127418. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.127418

Lakshminarasimman N, Gewurtz SB, Parker WJ, Smyth SA (2021) Removal and formation of perfluoroalkyl substances in Canadian sludge treatment systems - A mass balance approach. The Science of the total environment 754:142431. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142431

Lazcano KR, Perre C de, Mashtare ML, Lee LS (2019) Per- and polyfluoroalkyl substances in commercially available biosolid-based products: The effect of treatment processes. Water environment research, a research publication of the Water Environment Federation 91:1669–1677. doi:10.1002/wer.1174

ÖWAV (2018) ÖWAV-ExpertInnenpapier Kritische Ressource Phosphor. ÖWAV

Sungur Ş, Çevik B, Köroğlu M (2020) Determination of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) contents of compost amended soils and plants grown in these soils. International Journal of Environmental Analytical Chemistry 102:1926–1934. doi:10.1080/03067319.2020.1745200

Tavasoli E, Luek JL, Malley JP, Mouser PJ (2021) Distribution and fate of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment facilities. Environmental science: Processes & Impacts 23:903–913. doi:10.1039/d1em00032b

Timshina AS, Robey NM, Oldnettle A, Barron S, Mehdi Q, Cerlanek A, Townsend TG, Bowden JA (2024) Investigating the sources and fate of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in food waste compost. Waste Management 180:125–134. doi:10.1016/j.wasman.2024.03.026

Verordnung (EU) 2019/1021 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 über persistente organische Schadstoffe (Neufassung); POP-Verordnung (EU) 2019/1021
Wood (2019). Digestate and compost as fertilisers: Risk assessment and risk management options - Final Report. Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited.

KONTAKT

Lívia Hökl, BSc MSc
Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Umwelttechnik
livia.hoekl@uibk.ac.at

Ressourcen-Klassifikation UNFC als Bewertungsrahmen für Phosphorrückgewinnungsprojekte aus Klärschlamm

Soraya Heuss-Aßbichler[1], Ludwig Hermann[2] & Juan Antonio Munizaga-Plaza[1,3]
[1)] Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Ludwig-Maximilians-Universität München, Deutschland
[2)] Proman Consulting, Wien, Österreich
[3)] Institute of Environmental Sciences (CML), Universität Leiden, Niederlande

KURZFASSUNG: Phosphor ist ein Element, das als Nährstoff unverzichtbar und unersetzlich ist. 2014 wurde es von der EU als kritischer Rohstoff eingestuft. In Deutschland tritt 2029 und in Österreich 2032 die gesetzliche Verpflichtung in Kraft, Phosphor aus Klärschlamm zurückzugewinnen. Das stellt die Kläranlagenbetreiber vor eine Herausforderung, aus einer Vielzahl von Optionen die für ihren Standort an der besten geeigneten Technologie auszuwählen, wobei nur wenige davon unter industriellen Bedingungen getestet wurden. Diese Studie verwendet die ARA*4*UNFC-Methodik, einen strukturierten Ansatz auf der Basis der Rahmenklassifikation *United Nations Framework Classification for Resources* (UNFC), der im Rahmen des Horizon-Europe Vorhabens FutuRaM entwickelt wurde, um Projekte ganzheitlich zu bewerten und damit eine solide, transparente und vergleichbare Grundlage für Entscheidungsfindung zu schaffen. Exemplarisch wurden zwei Phosphorrückgewinnungsverfahren verglichen: R-Rhenania (thermochemisch, AshDec-basiert) und Phos4Life (nasschemisch, zur Phosphorsäureherstellung). Die UNFC-Klassifikation ergab für Rhenania E2 F2.1 G1 und für Phos4Life E3.3 F2.2 G2. Die Gegenüberstellung der Sachverhalte veranschaulicht die komplementären Stärken und Schwächen der beiden Projekte und demonstriert, dass neben der Technologie und regulativen Elementen auch die Beschaffenheit der Erzeugnisse, der Marktzugang und die koordinierte Versorgung auf regionaler Ebene entscheidende Faktoren sind.

1 EINLEITUNG

Seit 2014 gilt Phosphor in der EU als kritischer Rohstoff, da es sich um einen essenziellen Nährstoff handelt, für den es keinen Ersatz gibt. Rund 85 % des weltweit geförderten Phosphors werden in der Düngemittelindustrie verwendet, weitere Mengen kommen in der Chemie- und Lebensmittelindustrie zum Einsatz. Im Jahr 2024 verbrauchte die EU rund 2,1 Millionen Tonnen Phosphat (als P_2O_5), was etwa 4,5 % des weltweiten Verbrauchs entspricht (EUROSTAT, 2025); IFA 2025). Davon stammten lediglich 0,37 Millionen Tonnen aus dem Bergbau innerhalb der EU, und zwar ausschließlich aus magmatischen Phosphaterzen in Finnland. Laut Eurostat verbrauchte Deutschland im Jahr 2024 rund 159.294 Tonnen P_2O_5 in Form von Phosphatdüngern, wobei fast der gesamte Rohstoff importiert wurde. Diese Importabhängigkeit wirft langfristige Versorgungsprobleme auf und hat zwei strategische Reaktionen der EU und ihrer Mitgliedstaaten ausgelöst: den Ausbau der heimischen Primärproduktion und die Rückgewinnung von Phosphor aus Abfallströmen.

Klärschlamm spielt unter den anthropogenen Phosphorquellen eine Schlüsselrolle. In der EU fallen jährlich rund sieben Mio. Tonnen Klärschlamm an, mit einem durchschnittlichen Phosphatgehalt von 3,1 bis 11,1 % bezogen auf das Trockengewicht (Van Dijk et al., 2016; Chen et al., 2022). Das technische Rückgewinnungspotenzial aus dieser Quelle beläuft sich auf rund 0,34 Millionen Tonnen P_2O_5, was knapp 16.2 % des Phosphatbedarfs der EU entspricht. Aufgrund des hohen Gehalts an organischen und anorganischen Schadstoffen, darunter Schwermetalle, Arzneimittelrückstände, Mikroplastik und perfluorierte Verbindungen (PFAS), ist die landwirtschaftliche Verwendung von Klärschlamm in mehreren europäischen Ländern eingeschränkt oder verboten (Thomsen et al., 2017; EEA, 2025). Infolgedessen wird Klärschlamm zunehmend verbrannt, oft in Müllverbrennungs- oder Zementwerken, wodurch der darin enthaltene Phosphor verloren geht.

Mehrere europäische Länder, darunter Deutschland (ab 2029) und Österreich (ab 2032), schreiben die Rückgewinnung von Phosphor gesetzlich vor (BMU, 2017). Diese gesetzliche Verpflichtung trifft die Betreiber von Kläranlagen zu einem Zeitpunkt, zu dem zwar zahlreiche Rückgewinnungstechnologien entwickelt wurden, jedoch nur sehr wenige im industriellen Maßstab erprobt wurden (UBA, 2018; Montag et al., 2025). Die Auswahl der geeigneten Technologie für einen bestimmten Standort ist daher eine Entscheidung, die unter erheblicher Unsicherheit getroffen werden muss, was hohe Investitionskosten, eine langwierige Genehmigungs- und Bauphase sowie die unmittelbare Verpflichtung zur Einhaltung der Vorschriften mit sich bringt.
In diesem Beitrag wird der Frage nachgegangen, ob ein strukturierter Bewertungsansatz auf Grundlage der Rahmenklassifikation der Vereinten Nationen für Ressourcen (UNFC) Betreibern von Kläranlagen eine solide und transparente Entscheidungsgrundlage für die Betroffenen bieten kann. Der Ansatz wird anhand zweier Verfahren zur Phosphorrückgewinnung getestet. Dabei handelt es sich um R-Rhenania, ein thermochemisches Verfahren auf Basis von AshDec zur Düngemittelherstellung, sowie um Phos4Life, ein nasschemisches Extraktionsverfahren zur Gewinnung von Phosphorsäure aus Klärschlammasche.

2 RESSOURCENKLASSIFIKATION UNFC UND DIE SARA*4*UNFC-METHODIK

Die *United Nations Framework Classification for Resources* (UNFC) ist ein international anerkanntes Klassifikationssystem, das ursprünglich für Kohle im Vergleich zu mineralischen Rohstoffen entwickelt wurde und in den letzten Jahren u.a. auf Abfall als anthropogene Ressource erweitert wurde. Der UNFC bewertet die Reife eines Projekts anhand von drei Achsen: der E-Achse (ökologische, soziale und wirtschaftliche Nachhaltigkeit), der F-Achse (technische Machbarkeit) und der G-Achse (Zuverlässigkeit der erwarteten Produktionsmengen), mit einer Bewertungsskala von 1 bis 4. Hieraus ergibt sich die UNFC Klasse E·x F·y G·z des Projekts.
Um eine einheitliche und reproduzierbare Anwendung der UNFC auf Abfallströme als anthropogene Ressourcen zu gewährleisten, wurde im Rahmen des Horizon Europe-Projekts FutuRaM die strukturierte Methodik SARA*4*UNFC (*Structured Anthropogenic Resource Assessment for UNFC*) entwickelt (Heuss-Aßbichler, et al., submitted). Sie zeigt die Aufteilung der drei UNFC-Achsen in sechs thematische Kategorien, wobei die E-Achse in die vier Kategorien wirtschaftliche Tragfähigkeit, soziale Aspekte, ökologische Aspekte und rechtliche Rahmenbedingungen unterteilt wird. Jede Kategorie wird durch eine Reihe von Steuerungsfaktoren definiert, die wiederum durch messbare Indikatoren umgesetzt werden. Das macht die Bewertung transparent und vergleichbar: Somit kann transparent und nachvollziehbar, die Grundlage für die Einstufung vermittelt werden.

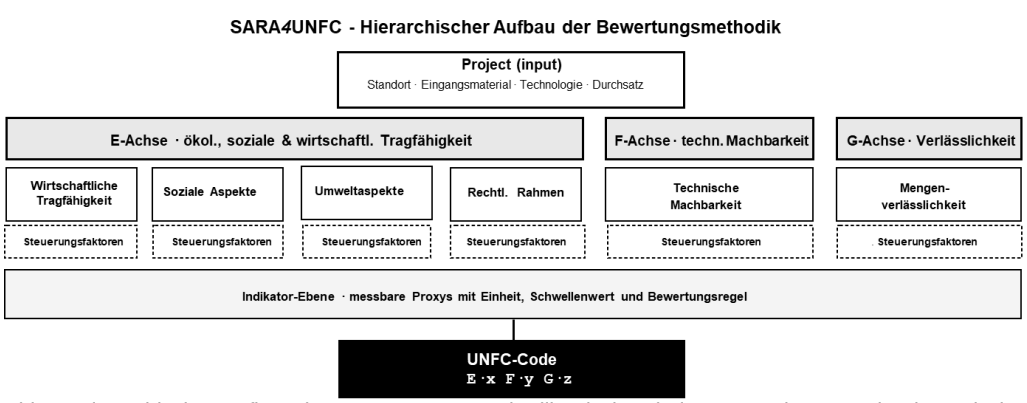


Abb. 1 Hierarchischer Aufbau der SARA4UNFC-Methodik mit den drei UNFC-Achsen, sechs thematische Kategorien, Steuerungsfaktoren, Indikatoren

Ein zentrales Strukturelement von SARA*4*UNFC ist das aus dem UNFC-Vokabular übernommene Begriff „*Context of Evaluation in the Realm of Discourse*" (ROD), um den Bewertungskontext eines Projekts zu definieren (UNECE, 2018). RODs widerspiegeln die Steuerungsfaktoren als Grundlage für Entscheidungen. Einzelne Faktoren können ausgeschlossen werden, sofern Gründe dafür angegeben werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass jede Bewertung hinsichtlich ihres Umfangs als auch ihrer Inhalte transparent ist. Dies trägt zur Vergleichbarkeit bei und gewährleistet ihre Überprüfbarkeit durch Behörden und Investoren. Die folgenden drei RODs bieten einen umfassenden Überblick über ein Projekt:

- Basic-ROD ist verbindlich; sie stellt die Steuerungsfaktoren für Genehmigungsverfahren als Mindestanforderungen zur Umsetzung eines Projekts;
- CE-ROD für die Kreislaufwirtschaft ist freiwillig und umfasst u.a. Faktoren wie Verwertungsquoten, Anforderungen für den Status Abfallende;
- SDG-ROD repräsentiert die Steuerungsfaktoren für Nachhaltigkeit und ist ebenfalls freiwillig: sie umfasst u.a. Aspekte wie Ressourceneffizienz, Umweltverträglichkeit über die gesetzlichen Mindestanforderungen hinaus und soziale Gerechtigkeit.

Um die Anwendung zu erleichtern, wurde diese Methodik im SARA*4*UNFC-Webtool implementiert, wodurch sichergestellt wird, dass die Bewertung über verschiedene Projekte und Bearbeitende hinweg reproduzierbar bleibt (Heuss-Aßbichler et al., 2015). Hierfür wurde eine siebenstufige Sequenz entwickelt, mit der Definition des Projekts und seine Systemgrenze, Auswahl der RODs, Erfassung der relevanten Steuerungsfaktoren und Indikatoren, Bewertung der einzelnen Faktoren, Kategorisierung der Steuerungsfaktoren, Zusammenfassung mit der UNFC-Klasse sowie eine strukturierte Berichtserstellung.

3 FALLBEISPIELE

SARA*4*UNFC-Methodik wurde beispielhaft auf zwei Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm angewandt: R-Rhenania, ein thermochemisches Verfahren, das auf den Ash-Dec-Prinzipien aufbaut, sowie Phos4Life, ein nasschemisches Extraktionsverfahren zur Herstellung von Phosphorsäure. Hierbei wurden die Steuerungsfaktoren für die Basis-ROD angewandt.

3.1 Verfahrenstechnische Eckdaten

R-Rhenania (AshDec-basiert): Bei dem R-Rhenania wird dem getrockneten Klärschlamm ein natriumhaltiger Zusatzstoff beigemischt. Bei der anschließenden Verbrennung bei etwa 900 °C reagiert der Zusatzstoff direkt mit dem im Klärschlamm vorhandenen Phosphor. Dadurch findet die thermochemische Synthese von Calcium-Natrium-Phosphaten ($CaNaPO_4$) statt. Der Vorteil dieses integrierten Ansatzes besteht darin, dass keine separate thermische Behandlung der Klärschlammasche erforderlich ist. Das gewonnene Calcium-Natrium-Phosphat ist pflanzenverfügbar und kann direkt als Dünger ausgebracht werden. Die Phosphorrückgewinnungsrate liegt somit bei über 95 %. Schwermetalle wie Cadmium und Quecksilber verflüchtigen sich teilweise bei den Prozesstemperaturen und werden in der nachgeschalteten Gasreinigungsstufe abgeschieden.
Phos4Life: verfolgt einen naßchemischen Ansatz. Die Klärschlammasche wird in saurer Lösung extrahiert; der gelöste Phosphor wird in mehrstufigen Reinigungsschritten von Schwermetallen und sonstigen Verunreinigungen abgetrennt. Endprodukt ist Phosphorsäure (H_3PO_4), ein hochreines, vielseitig einsetzbares Industrieprodukt mit etablierten Märkten in der Chemie-, Lebensmittel- und Düngemittelindustrie. Die Phosphor-Rückgewinnungsrate liegt typischerweise über 80 %. Die Rückstände können nach weiterer Behandlung ebenfalls auch vermarktet werden.
Tabelle 1 zeigt die verfahrenstechnischen Eckdaten mit Verfahrensprinzip, Reaktionsbedingungen, Energiequelle, Produkt und Eingangsmaterial.

Tab. 1: Verfahrenstechnischer Vergleich von R-Rhenania und Phos4Life.

Aspekte	R-Rhenania	Phos4Life
Verfahrensprinzip	Thermochemisch	nasschemisch (saure Extraktion)
Prozessführung	Additiv vor Klärschlammverbrennung; Synthese bei ~900 °C mit Eigenenergie	Säureextraktion mit mehrstufiger Reinigung, externe Energie
Eingangsmaterial	getrockneter Klärschlamm mit geringer Schwermetallbelastung	Klärschlammasche, auch aus belasteten Klärschlämmen
Hauptprodukt	Calcium-Natrium-Phosphat (Düngemittel)	Phosphorsäure (H_3PO_4)
P-Rückgewinnungsrate	> 95 %	> 80 %
Schadstoffbehandlung	Volatilisierung bei hohen Temperaturen	nasschemische Abtrennung

3.2 Gegenüberstellung der beiden Verfahren

Die direkte Gegenüberstellung der beiden Verfahren macht ihre komplementäre Profilbildung sichtbar. Tab. 2 dokumentiert die daraus abgeleitete UNFC-Kategorie pro Achse einschließlich der jeweils tragenden Steuerungsfaktoren und der resultierenden UNFC-Klasse.

Tab. 2 Auswahl von Steuerungsfaktoren für die Verfahren und ihre Kategorisierung, sowie die resultierende UNFC-Klasse

UNFC-Achse	R-Rhenania	Phos4Life
E-Achse	Moderates CAPEX, regionaler Düngemittelmarkt → E2	Hohes CAPEX, überregionaler Industrieproduktmarkt, Konkurrenz durch Herstellung von Phosphor-säure aus Primärrohstoffen → E3.3
F-Achse	Pilot in adaptierter Bestands-verbrennung; geringe Komplexität, klarer Skalierungspfad → F2.1	Pilot ohne Anbindung an Bestandsinfrastruktur; Säurelogistik und Skalierung offen → F2.2
G-Achse	Eingangsstrom charakterisiert, Ausbeute lässt dich stöchiometrisch bestimmen → G1	Eingangsstrom charakterisiert, mehrstufige Variabilität → G2
UNFC Klasse	E2 F2.1 G1	E3.3 F2.2 G2

Die UNFC-Klassifikation des Rhenania-Verfahrens ergab E2 F2.1 G1 (*potentially viable*). Der Prozess ist aus verfahrenstechnischer Sicht relativ einfach. Er ist jedoch auf Klärschlamm mit einer geringen Schwermetallbelastung beschränkt.
Die orientierende Untersuchung von Phos4Life mit SARA*4*UNFC ergab die UNFC-Klasse E3.3 F2.2 G2 (*non-viable*). Der wesentliche Vorteil gegenüber dem thermochemischen Ansatz: Phos4Life kann auch Klärschlammasche mit höherer Schadstoffbelastung verarbeiten, da die Schadstoffabtrennung im nasschemischen Schritt sehr effektiv ist. Die Anlagen sind daher größer und benötigen spezialisierte Infrastruktur einschließlich Säurelagerung, Säurerückgewinnung und Abwasserbehandlung. Die entsprechend höhere verfahrenstechnische Komplexität schlägt sich in höheren Investitions- und Betriebskosten nieder.
Welche der beiden Optionen für einen bestimmten Standort am besten geeignet ist, hängt jedoch nicht allein von den wesentlichen technischen und wirtschaftlichen Parametern ab. Zusammensetzung des Klärschlamms und Qualität des Produkts sind Aspekte, die berücksichtigt werden müssen.

4 DISKUSSION

Aufgrund der UNFC-Klassifikation würde R-Rhenania im Vergleich zu Pos4Life besser abschneiden. R-Rhenania profitiert von einer geringeren Prozesskomplexität, moderaten Investitionskosten und etablierten Verwertungswegen für Düngemittel. Eine ausschließliche Fokussierung auf die Faktoren für *Basic-ROD* ließe R-Rhenania als die bevorzugte Wahl erscheinen. Diese Lesart ist methodisch jedoch verkürzt. Vielmehr muss der Bewertungsrahmen für die Entscheidungsfindung von *Basic-ROD* hinsichtlich Kreislaufwirtschaft (*CE-ROD*) erweitert werden, um Faktoren wie Qualität und Marktfähigkeit des Produkts und damit Eignung der verwendeten Klärschlämme hinsichtlich des Schadstoffgehalts zu berücksichtigen. Phos4Life punktet hier durch Robustheit gegenüber verunreinigten Ausgangsmaterials und der Herstellung eines hochreinen Industrieprodukts mit überregionalem Marktanschluss; allerdings steht es im Wettbewerb mit günstigeren Produkten aus Primärrohstoffen.
Im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung unter *SDG-ROD* spielen weitere Aspekte eine Rolle: Energie- und Wasserbilanzen, Abfallmenge, regionale Wertschöpfung und Auswirkungen auf die Beschäftigung sowie öffentliche Akzeptanz. R-Rhenania profitiert hier vom erheblichen Energievorteil der integrierten Synthese bei der Klärschlammverbrennung. Phos4Life setzt eine vorgelagerte Klärschlammverbrennung voraus; eine integrierte Auslegung mit einer Müllverbrennungsanlage (MVA) oder anderen Verbrennungsinfrastrukturen kann die Energie- und Stoffbilanz im Gesamtsystem verbessern.
Eine umfassende Beurteilung erfordert daher eine vielschichtige Bewertung, die durch die drei RODs abgedeckt wird. Das bedeutet aber auch, dass einzelne Kläranlagenbetreiber diese Entscheidung nicht allein treffen können. Faktoren wie Qualität des Klärschlamms, Anlagengröße, Standortlogistik sowie regionaler Markt für Düngemittel oder Phosphorsäure unterscheiden sich von Ort zu Ort. Zudem liegt die Kapazität einzelner, kleinerer Kläranlagen oft unter der wirtschaftlich rentablen Mindestkapazität für eine eigene Verwertungsanlage. Bündelungslösungen, bei denen mehrere Klärwerke ihren Klärschlamm an eine zentralisierte Aufbereitungsanlage liefern, werden damit zur strategischen Notwendigkeit. Spiegelbildlich benötigen Technologieanbieter Standorte, an denen ihr Verfahren Bestandsinfrastruktur, Eingangsstrom und Marktanschluss findet. Dies erfordert eine Koordination, die über die Perspektive einzelner Projekte hinausgeht und eine regionale Bewertungsebene einbezieht, um Fragen zur Integration in die vorgelagerte Verbrennungsinfrastruktur, zur gemeinsamen Gestaltung von Energie- und Stoffströmen über mehrere Anlagen hinweg und zur regionalen Bündelung von Investitionsrisiken zu klären.

5 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

R-Rhenania und Phos4Life weisen komplementäre Profile auf: R-Rhenania mit integrierter Verfahrensführung an der Klärschlammverbrennung und niedrigeren Investitionshürden, Phos4Life mit Robustheit gegenüber belasteten Eingangsmaterialien und einem höherwertigen Industrieprodukt. Welche der beiden Optionen sich für einen Standort empfiehlt, hängt jedoch nicht nur von technischen und wirtschaftlichen Eckdaten ab. Die SARA*4*UNFC-Methodik liefert für beide Verfahren eine transparente und vergleichbare Entscheidungsgrundlage für Klärwerksbetreiber, Behörden und Investoren. Zugleich wird deutlich: die Erfüllung der Mindestanforderungen für eine Genehmigung (Basic-ROD) reichen für einen fundierten Standortvergleich nicht aus - die Erweiterung des Bewertungsrahmens CE-ROD (Kreislaufwirtschaft) sowie SDG-ROD (Nachhaltigkeit) ist erforderlich.
Diese Vorgehensweise eröffnet weitere Handlungsspielräume über die Betrachtung der Einzelanlagen hinaus: Die Einbindung in vorgelagerte Infrastrukturen wie Klärschlamm- oder Müllverbrennung oder Zementwerke erschließt Effizienz- und CO_2-Potentiale, die bei isolierter Betrachtung verborgen bleiben. Die integrierte Betrachtung der Energie- und Stoffströmen über mehrere Prozessstufen hinweg ermöglicht es, kleinere Kläranlagen zu tragfähigen Wertschöpfungsketten zu bündeln und über regional geteilte Investitionsrisiken die Realisierung anspruchsvoller Verfahren wie Phos4Life zu verbessern.

Um diesen Perspektivwechsel von der Projektebene auf die regionale und nationale Ebene zu erleichtern, hat das FutuRaM-Projekt den *Integrierten UNFC-MFA-Rahmen* entwickelt. Er verbindet die SARA*4*UNFC-Projektklassifikation mit Stoffstrom- und Energiebilanzen und führt die Fragen *welche Technologie an welchem Standort* und *welche Mengen wo verarbeitet, welche Versorgungslücken geschlossen werden*" zusammen. Die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm zeigt exemplarisch, wie wichtig ein solches (Meso-)Netzwerk auf mittlerer Ebene ist, um Akteure zusammenzuführen und Lösungen zu tragen, die nationalen Anforderungen und lokalen Bedürfnisse in Einklang bringen.

LITERATURVERZEICHNIS

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2017). Klärschlammverordnung (AbfKlärV). Bundesanzeiger.

EEA (2025). PFAS Contamination and Soil Remediation (Signal). European Environmental Agency. Available online at: https://www.eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards/indicators/pfas-contamination-and-soil-remediation-signal.

EUROSTAT (2025). Consumption of inorganic fertilisers. Available online at:
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/AEI_FM_USEFERT/default/table?lang=en.

Heuss-Aßbichler, S. et al. (2025) Reports of the case studies for 2RM availability assessment in alignment with the UNFC. https://doi.org/10.5281/zenodo.17945111.

IFA (2025). Public Summary Short-Term Fertiliser Outlook 2024 – 2025. International Fertiliser Association. February, 2025. Available online at: https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2025/02/2024_ifa_short_term_outlook_report.pdf.

Montag, D. et al. (2025). Evaluierung verfügbarer Kapazitäten thermischer Klärschlammbehandlung sowie zur Phosphorrückgewinnung; Umweltamt.

Thomsen, A.B. et al. (2017). Changes in composition and phosphorus fertiliser quality imposed by pyrolysis, thermal gasification, and incineration on municipal sewage sludge. Journal of Environmental Management, Volume 198, Pages 308-318.

UBA (Umweltbundesamt) (2018). Sewage sludge utilisation in Germany - pathways and recovery routes.

UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) (2018). Concepts and Terminology for Environmental and Social Considerations. Supplementary document to UNFC, prepared by the Expert Group on Resource Management (EGRM), Genf.

Van Dijk, K. C. et al. (2016). Phosphorus flows and balances of the European Union Member States. Science of the Total Environment, 542 (Part B), 1078–1093.

KONTAKT

Prof. Dr. Soraya Heuss-Aßbichler
heuss@lmu.de

Machbarkeitsanalyse zur Nachrüstung eines thermochemischen Phosphorrecyclingverfahrens für bestehende Mono-Klärschlammverbrennungsanlagen

Jakob Hirsch
CONENGA Group, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Aufgrund zukünftiger gesetzlicher Anforderungen zur Phosphorrückgewinnung aus kommunalen Klärschlämmen gewinnt die Entwicklung wirtschaftlicher und technisch umsetzbarer Recyclingverfahren zunehmend an Bedeutung. Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit einer Nachrüstung bestehender Klärschlammverbrennungsanlagen mit dem Phosphorrecyclingverfahren P-XTRACT. Hierzu wurde das Verfahren anhand einer Referenzanlage analysiert und auf eine bestehende Klärschlammverbrennungsanlage mit stationärer Wirbelschicht übertragen. Die technische Bewertung erfolgte auf Basis einer Grobauslegung der erforderlichen Anlagenkomponenten. Die wirtschaftliche Bewertung wurde in Anlehnung an ÖNORM EN 17463:2021 (VALERI) unter Anwendung der Kapitalwertmethode durchgeführt.

1 MOTIVATION UND RELEVANZ

Als essenzieller Nährstoff ist Phosphor für alle Lebewesen relevant. Da er das Pflanzenwachstum fördert wird er als Düngemittel in der Landwirtschaft eingesetzt. Hier kommt er vor allem Rohphosphat aus dem Bergbau aus nicht europäischen Staaten zum Einsatz. Um diese Importabhängigkeit zu reduzieren und zur Förderung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft sind auf EU-Ebene und in einzelnen Nationalstaaten Rechtsakte verabschiedet worden mit dem Ziel den Phosphorkreislauf zu schließen. Phosphor gelangt über die Nahrungskette über den menschlichen Organismus oder als Bestandteil von Waschmittel in das Abwasser (Wiater & Łapiński, 2021). Der Phosphor im Abwasser findet sich ebenso wie Schadstoffe und Schwermetalle aufkonzentriert im Klärschlamm wieder. In § 20 AVV (2024) der österreichischen Abfallverbrennungsverordnung ist festgeschrieben, dass ab 2033 Phosphor aus Klärschlamm beziehungsweise Klärschlammasche zurückgewonnen werden muss. Die bevorzugte Verwertungsmethode des Abfalls Klärschlamm ist die thermische Behandlung. Laut dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft (BMLUK) (Bernhardt et al., 2025) wurden im Jahr 2023 in Österreich rund 84.600 Tonnen Trockenmasse Klärschlamm thermisch verwertet. Nach einer Verbrennung in einer stationären Wirbelschichtanlage bleibt der Phosphor in der Asche zurück. Um ihn für Pflanzen oder die Industrie nutzbar zu machen und den Kreislauf zu schließen erfordert es einem weiteren nass- oder thermo-chemischen Behandlungsschritt. Es gibt aber auch Ansätze diesen zusätzlichen Verfahrensschritt in die Klärschlammverbrennung zu integrieren. Ein Beispiel eines solchen Verfahrens ist P-XTRACT (AZV Staufener Bucht, 2024). Hier wird versucht mit Additiven, die dem Brennstoff, dem Klärschlamm, zugegeben werden, die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors zu steigern und mit gezielter Ascheabscheidung die Schadstoffbelastung in der Produktfraktion zu senken. Da nun aufgrund von gesetzlichen Vorgaben ein Phosphorrecycling aus Klärschlamm erforderlich wird, stellt P-XTRACT eine günstige Alternative zu zusätzlichen nachgeschalteten nass- oder thermochemischen Aufschlüssen dar. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit untersucht, welche anlageseitigen Umbauten konkret erforderlich sind, um mit bestehenden Klärschlammverbrennungsanlagen phosphorreiche, als Düngemittel geeignete Aschen herzustellen.
Für eine Zulassung als Düngemittel muss die Asche den gesetzlichen Vorgaben entsprechen. Dabei ist vor allem auf die Gehalte des Nährstoffs Phosphor und der Schwermetalle zu achten.

P-XTRACT-VERFAHREN: Das von der Wehrle-Werk AG und dem Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) entwickelte P-XTRACT-Verfahren (Abb. 1) verfolgt das Ziel, phosphorhaltige Biomassen so zu verbrennen, dass der enthaltene Phosphor in einer pflanzenverfügbaren Form in der Asche erhalten bleibt und diese direkt als Düngemittel genutzt werden kann. Als Einsatzstoff dient insbesondere kommunaler Klärschlamm, der zunächst entwässert, getrocknet und anschließend monoverbrannt wird. Vor der Verbrennung wird dem Brennstoff das Additiv Natriumkarbonat (Na_2CO_3) zugesetzt. Das Natrium fördert die Bildung pflanzenverfügbarer Phosphorverbindungen, wie Buchwaldit ($CaNaPO_4$) und erhöht dadurch die Düngewirkung der entstehenden Asche. Die thermische Behandlung erfolgt in einer stationären Wirbelschichtanlage. Im und über dem Wirbelbett läuft die thermochemische Konversion des Brennstoffs ab. Dabei werden Temperaturen von über 850 °C erreicht, wodurch organische Schadstoffe sicher zerstört und die rechtlichen Vorgaben eingehalten werden. Nach der Verbrennung erfolgt die Abscheidung grober Feststoffpartikel im Heißgaszyklon. Die Abtrennung bei Temperaturen von rund 800 °C bewirkt, dass viele der im Klärschlamm enthaltenen Schwermetalle gasförmig bleiben und nicht in die Zyklonasche übergehen. Diese Asche enthält den größten Anteil des zurückgewonnenen Phosphors. Anschließend wird dem Rauchgas Wärme zur Energienutzung entzogen, bevor verbleibende Staub- und Schadstofffrachten in der Rauchgasreinigung entfernt werden.
Versuche zeigen, dass die Natriumadditivierung die pflanzenverfügbare, Neutralammoniumcitrat (NAC)- lösliche Phosphorfraktion in der Asche gegenüber einer konventionellen Klärschlamm-Monoverbrennung nahezu verfünffacht, wodurch die Eignung der Asche als Phosphordünger deutlich verbessert wird (Hacker et al., 2025).

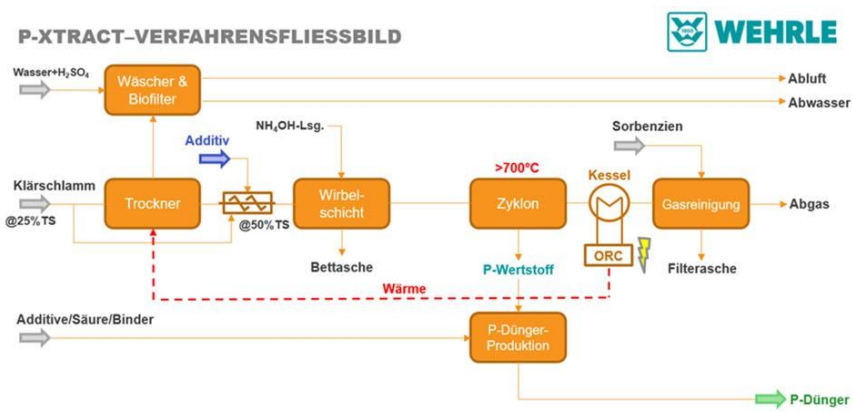


Abb. 1: P-XTRACT Verfahrensfließbild der Pilotanlage (AZV Staufener Bucht, 2024)

2 ADAPTIERUNG DER BEISPIELANLAGE

Es wurde untersucht, wie das Phosphorrecyclingverfahren in bestehende Klärschlammverbrennungsanlagen integriert werden kann. Dazu wurde eine reale, in Betrieb befindliche Anlage in Europa näher betrachtet, welche aber anonymisiert als Beispielanlage bezeichnet wird. Diese Anlage hat eine thermische Leistung von 12 MW und einen Brennstoffdurchsatz von rund 100.000 t/a. Da der Klärschlamm mit einem Trockengehalt von rund 30 % verfeuert wird, ist eine Stützfeuerung erforderlich, die auf fossilen Brennstoffen basiert. Für die P-XTRACT-Implementierung wurde festgestellt, dass aus verfahrenstechnischer Sicht die beiden Bereiche Heißgaszyklon inklusive Ascheförderung und -lagerung sowie Additivierung mit Additivlagerung und -dosierung nachgerüstet werden müssen. Für das Additiv ist ein Silo zu errichten, in dem das pulverförmige Natriumkarbonat (Na_2CO_3) zwischengelagert werden kann. Im laufenden Betrieb werden 2 mol Na_2CO_3 je mol Phosphor dem Brennstoff zugegeben. Dabei ist auf eine homogene Verteilung im Klärschlamm zu achten. Die Dosierung erfolgt im Aggregat, das den Klärschlamm

in die Wirbelschicht einbringt. Im Feuerraum reagiert bei der Verbrennung das Natrium mit den Phosphorverbindungen und es entsteht das NAC-lösliche Mineral Buchwaldit ($CaNaPO_4$) (Bier-Schorr, 2024). Diese Verbindung verbleibt in der festen Phase und wird aus dem Brennraum als Flugasche ausgetragen und wird größtenteils im Heißgaszyklon abgeschieden, der zwischen Brennkammer und Kessel verbaut ist. Wie in den meisten Abfall- und Klärschlammverbrennungsanlagen vorgeschrieben, muss das Rauchgas auf 850°C für mindestens zwei Sekunden aufgeheizt werden. Bei einer Temperatur von rund 800°C sind viele Schwermetalle gasförmig, sodass diese nicht in der Zyklonasche, sondern im Austrag der Rauchgasreinigung zu finden sind. Die Konzentration der Schwermetalle in der Zyklonasche ist unter anderem stark von der Menge und der Art der Schwermetalle im Brennstoff abhängig. Für die anfallende Zyklonasche, die das Hauptprodukt dieser Verfahrensintegration darstellt, ist ein Aschesilo erforderlich, der eine Zwischenlagerung der Asche ermöglicht.
Im Zusammenhang mit der Nachrüstung von P-XTRACT in eine bestehende Mono-Klärschlammverbrennungsanlage sind eine Adaptierung des Wirbelschichtbettmaterials, eine Einbindung von Rezirkulationsgas in den Feuerraum bzw. eine Anpassung der Rauchgasreinigung nicht zwingend erforderlich. Ebenso kann eine Veränderung des Trockengehaltes des Brennstoffs ausbleiben. Für den Betrieb einer Mono-Klärschlammverbrennungsanlage ist allerdings eine Trocknung des Brennstoffs zu empfehlen, da dieser dadurch autotherm verbrennt und somit auf eine ständige Stützfeuerung mit einem aschearmen Stützbrennstoff verzichtet werden kann.
ÖNORM EN 17463:2001 (VALERI): Die wirtschaftliche Bewertung der erforderlichen Umbauten für die Implementierung von P-XTRACT wurden in Anlehnung an die ÖNORM EN 17463:2021 durchgeführt. Dabei wurde die Kapitalwertmethode zur Erörterung der Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu einer alternativen ähnlich risikobehafteten Investition herangezogen. Ergänzt wurde diese Bewertung mit einer Sensitivitäts- und Szenarioanalyse. Die Ergebnisse zeigen für das Base-Case-Szenario, das den wahrscheinlichsten Fall abbildet, einen positiven Kapitalwert von über 17 Mio. €. Eine hohe Sensitivität ist gegenüber dem Preis von phosphorreicher Zyklonasche festzustellen (Abb. 2). So wurde unter Beibehaltung der anderen Szenarioparameter die Wirtschaftlichkeitsgrenze bei zirka 18 €/t Asche quantifiziert. Auf die gleiche Weise wurde eine Mindestlaufzeit der Investition von vier Jahren für einen positiven Kapitalwert ermittelt. Ebenso wirken sich der Kalkulationszinssatz und der Preis für die Entsorgung von Asche wesentlich aus. Da durch die Implementierung von P-XTRACT, aus einem Abfallstrom ein Produkt wird, erhöht sich die Sensitivität gegenüber dieses Aschemassenstroms, da Entsorgungskosten wegfallen und Erlöse erzielt werden können. Auffallend ist, dass die wirtschaftlichen Auswirkungen von Investitionsförderungen gering ausfallen.

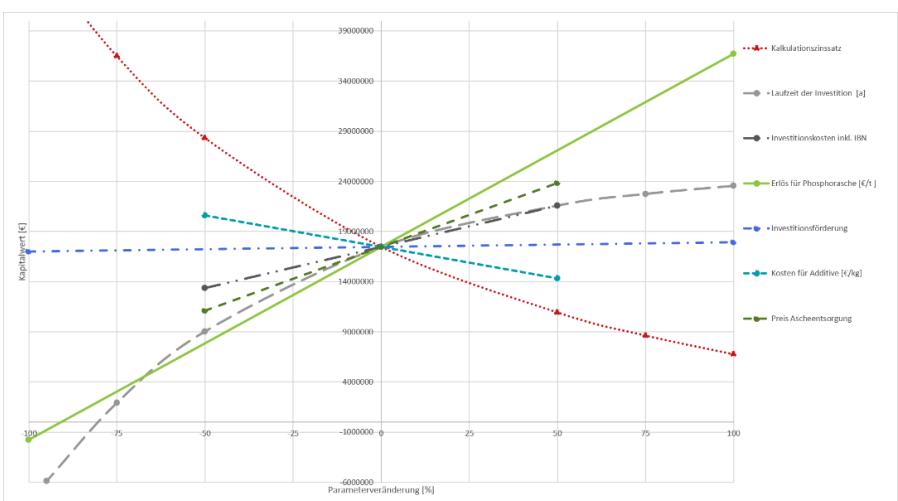


Abb. 2: Grafische Darstellung der Sensitivitätsanalyse (Eigene Darstellung)

3 LIMITATIONEN

Im Rahmen dieser techno-ökonomische Machbarkeitsanalyse zur Implementierung von P-XTRACT an einer ausgewählten Klärschlammverbrennungsanlage waren detaillierte Anlagendaten nur begrenzt verfügbar, weshalb zahlreiche Annahmen getroffen werden mussten. Diese wurden auf Grundlage öffentlich verfügbarer Informationen, Literaturdaten sowie technischer Erfahrungswerte abgeleitet. Die Ergebnisse der Untersuchung sind daher mit technischen und wirtschaftlichen Unsicherheiten behaftet. Die gewonnenen Erkenntnisse sowie die angewandte Methodik sind bei ähnlichen vorliegenden Rahmenbedingungen auch auf andere Klärschlammverbrennungsanlagen übertragbar. Für die Planung einer konkreten Anlagenumrüstung sind jedoch standortspezifische und aktuelle Daten, Abmessungen, Stoffströme sowie Investitions- und Betriebskosten heranzuziehen.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ergebnisse zeigen, dass die Nachrüstung des P-XTRACT-Verfahrens in bestehende Mono-Klärschlammverbrennungsanlagen technisch umsetzbar ist. Die erforderlichen Anpassungen beschränken sich im Wesentlichen auf die Additivierung des Brennstoffs sowie die Abscheidung, Förderung und Lagerung der phosphorreichen Zyklonasche. Die wirtschaftliche Bewertung nach ÖNORM EN 17463:2021 (VALERI) weist für das untersuchte Referenzszenario einen deutlich positiven Kapitalwert aus und bestätigt damit das Potenzial einer wirtschaftlichen Umsetzung. Gleichzeitig zeigen die Sensitivitätsanalysen, dass insbesondere die Vermarktungsmöglichkeiten der phosphorreichen Zyklonasche sowie die Investitionslaufzeit maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben. Insgesamt stellt das P-XTRACT-Verfahren eine vielversprechende Möglichkeit dar, die Phosphorrückgewinnung in bestehenden Klärschlammverbrennungsanlagen zu realisieren und einen Beitrag zu einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft zu leisten.

LITERATURVERZEICHNIS

AZV Staufener Bucht (2024). Abgerufen am 12. Juni 2026 von Das P-XTRACT Projekt: https://azv-staufener-bucht.de/p-xtract/

Bernhardt, A., Broneder, C., Gold-Stoiber, C., Neubauer, C., Olivia, J., Roll, M., . . . Weißenbach, T. (2025). *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich.* Wien: BMLUK.

Bier-Schorr, L. (2024). Phosphate Recycling from a Local Wastewater Treatment Plant as Part of the P-XTRACT-Project. Freiburg.

Hacker, M., Bier-Schorr, L., Brellochs, J., Goy, J., Hajek, P., Kornmayer, C., & Kurz, P. (2025). *P-XTRACT: Regionale thermische Verwertung von Klärschlamm mit integrierter Phosphor-Rückgewinnung.* Bad Krozingen.

Wiater, J., & Łapiński, D. (2021). Assesment of total phosphorus content and its fractions in municapal sewage sludge. *International Journal of Conservation Science*.

KONTAKT

Jakob Hirsch MSc
j.hirsch@conengagroup.com
+43 699 123 500 15
Process Engineer
CONENGA Group GmbH
www.conengagroup.com

Innovating Circular Business Models through Collaboration and Digital Technologies to extend Product Life Cycles

Romana Rauter[1] & Anika Schmitt[1]
[1)] Department of Environmental Systems Sciences, University of Graz, Graz, Austria

ABSTRACT: Businesses' dependence on finite natural resources and tightening European Union regulations are pushing firms toward circularity and circular business model innovation (CBMI) at the industry and firm level. However, market failures, such as information asymmetries, coordination problems, and incomplete markets for secondary materials continue to impede progress. We argue that digital platforms can help overcoming these barriers by coordinating actors, resources, and information across organizational boundaries, thereby stimulating CBMI. Drawing on four illustrative cases we distinguish between platforms as intermediaries, which facilitate exchanges of surplus resources and secondary materials, and software-as-a-service platforms, which enable resource tracking, data sharing, and value-chain coordination. We demonstrate that digital platforms can reduce transaction costs, enhance transparency and traceability, and create new opportunities for value creation and capture. However, their impact depends on the ability to generate network effects, manage governance tensions, and satisfy data and infrastructure requirements. Ultimately, scaling CBMI depends not only on technological sophistication but equally on firms' willingness to collaborate and share data, and on how deeply platform-enabled circularity becomes embedded within their business model portfolio.

1 INTRODUCTION

The current global economy is deeply dependent on finite natural resources, such as fossil fuels, with extraction rates far exceeding planetary boundaries (Sakschewski et al., 2025), and is exposed to growing systemic risks (World Economic Forum, 2026), including geopolitical tensions. In Europe, some of these problems are particularly acute: the European Union (EU) imports a significant share of its critical raw materials (Bobba et al., 2020), while industries and consumers alike continue to operate largely within linear production and consumption logics that generate vast amounts of waste. This is reflected in shorter product lifetimes and marketing-induced obsolescence, which often make disposal the more convenient over strategies designed to keep products and materials circulating at their highest value for as long as possible (EEA, 2025). At the same time, regulatory barriers and market failures, including incomplete markets for secondary materials and information asymmetries between different market actors undermine trust and markets for reused, refurbished, and recycled goods (e.g., Boukhatmi & Van Opstal, 2026). Recently, several Circular Economy (CE)-related regulations have come into force to increase product longevity, transparency, material traceability, and recovery. This includes, among others, the EU's Clean Industrial Deal and its related Circular Economy Act (European Commission, 2025), the Ecodesign for Sustainable Products Regulation [ESPR] (EU) 2024/1781, the Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive (2012/19/EU), as well as the Corporate Sustainability Reporting Directive (EU) 2022/2464. The Circular Economy Act (Siefridt, 2026), in particular, is expected to serve as a framework to address a "triple challenge: economic security, environmental crisis, and industrial competitiveness" (p. 3).

The persistent problems within the global economy, along with the EU's regulatory-driven changes, present significant opportunities for circular business model innovation (CBMI) at both the industry and firm level. In this context, digital platforms (DPs) have emerged as a promising mechanism to address these market failures, including persistent information asymmetries, by coordinating actors, resources, and information across organizational boundaries, thereby scaling circular value creation and extending product life cycles. In this contribution, we adopt an innovation perspective to explore selected potentials for CBMI enabled by DP-based solutions.

Using illustrative examples (Floow2 [https://floow2.com/], ECirc4all, Circularise [https://www.circularise.com/], and PiCo2RAEE [https://www.moku.io/en/projects/pico2raee]) we show distinct ways in which DPs facilitate the exchange of circular products and services and enable greater data sharing across value chains. We discuss the resulting changes to value creation and delivery (i.e., how a company creates and delivers sustainable value) and value capture (i.e., how it captures economic value while maintaining or regenerating natural, social, and economic capital beyond its own organizational boundaries) (Rauter et al., 2022), as well as how these innovations help overcome existing barriers to enhanced circularity. We conclude by emphasizing the crucial role of social and organizational conditions in enabling the collaboration that digital technologies alone cannot replace.

2 CIRCULAR BUSINESS MODEL INNOVATION

In contrast to the linear economic model, characterized by a take-make-dispose logic, the CE is widely acknowledged as a systemic (alternative) approach that seeks to close, narrow, and slow material and resource loops. In recent years, diverse facets and perspectives of the CE have been explored and implemented across research, business, and policy practice. These range from micro-level foundations at the individual and organizational level, such as circular business models (CBMs), consumer behavior, and product design strategies, to macro-level dimensions, including national policy frameworks, regulatory initiatives, and broader socio-technical transitions that support the shift toward a more circular economy.

From an organizational perspective, CBMs can be defined as “simplified representations of the value proposition, value creation and delivery, and value capture elements and the interactions between these elements within an organisational unit” (Geissdoerfer et al., 2018), which cycle, extend, intensify, and/or dematerialize material and energy loops to reduce resource inputs and minimize waste and emissions. The process of embedding circularity principles and practices into a new business model is known as circular business model innovation (CBMI) (Izquierdo-Montfort et al., 2026). This means that the business model (BM) itself becomes the subject of innovation, extending beyond single products, services, or technologies. CBMI can affect the entire BM or one or more of its elements, the interrelations between the elements, and the (entire) value network (Geissdoerfer et al., 2020). Moreover, CBM(I) expands organizational boundaries by unfolding through interaction and collaboration with ecosystem partners and stakeholders. Consequently, in addition to the internal complexities of integrating circularity into BMs (Assmann et al., 2023; Santa-Maria et al., 2022), several additional managerial challenges arise. These include the effective collaboration with external stakeholders who are involved in, or critical to, the successful implementation of CBM(I), as well as the need for data and information sharing, such as tracking materials, components, and products throughout their lifecycle, to ensure resources retain their value and remain in circulation for as long as possible. Yet, as outlined earlier, the levels of inter-organizational collaboration and data sharing required to strengthen CBMI remain difficult to achieve due to persistent market failures, such as information asymmetries and coordination problems (Boukhatmi & Van Opstal, 2026). Digital technologies are increasingly recognized as mechanisms for reducing such coordination costs and addressing the market inefficiencies that hinder collaboration (Barteková & Börkey, 2022; Jacobides et al., 2024).

3 PLATFORM-BASED BUSINESS MODEL INNOVATION FOR A CIRCULAR ECONOMY

DPs, as key technical infrastructure for cross-organizational coordination, are commonly defined as interfaces that mediate transactions among various actors (Blackburn et al., 2023). By leveraging resource sharing and fostering collective innovation among businesses, customers, and partners (Aagaard, 2024), they reconfigure how value is created, delivered, and captured, scaling circular value (co-)creation across organizations by coordinating activities that enable resource efficiency and circulation (Blackburn et al., 2025). DPs are commonly distinguished between (1) “intermediary platforms” (often referred to as “digital marketplaces”), which may act as

matchmakers connecting actors in two- or multi-sided markets to match supply and demand for surplus resources and secondary materials, and (2) “Software as a Service” (SaaS) platforms, which, rather than matching actors, function as software-based services upon which third parties build complementary products and services (e.g., “Circularise”, “PiCo2RAEE”), or a combination of both (e.g., “ECirc4all”, “Floow2”). These platform types differ in how they drive CBMI, that is, how they alter elements such as value proposition, value creation and delivery, or profit mechanisms of existing business models (Miehé & Gassmann, 2024) to become (more) circular.

Intermediary platforms reconfigure value creation and capture in distinct ways. First, they can shift the logic of value creation and capture toward *enabling shared use* rather than acquiring new resources for production processes. For instance, “Floow2”, a global B2B marketplace for corporate equipment, knowledge, and skills, connects companies with surplus resources to those seeking them within the same sector. This enables one company to gain access to idle resources, while the lending company shifts its value capture toward a product-as-a-service model by monetizing access to its own goods and services. For both companies, value creation is thereby redirected toward maximizing asset utilization. Second, intermediary platforms may create *markets for secondary materials* that would otherwise not exist. “ECirc4all”, a digital marketplace connecting the electronics value chain for reusing and repairing used electrical and electronic equipment (EEE), exemplifies this by linking Producer Responsibility Organizations (PROs) with independent and manufacturer-authorized refurbishers. For PROs, participation reconfigures value capture by enabling new revenue streams from supplying used EEE to refurbishers; for refurbishers, value creation shifts toward procuring used IT hardware, while localizing raw material sourcing and reducing exposure to geopolitical risks and shipping disruptions.

While digital marketplaces reconfigure value primarily through exchange, SaaS platforms enable more complex, collaborative forms of CBMI, delivered through subscription-based, cloud-based services that embed resource tracking, data sharing, and value chain coordination directly into firms’ operations (Boukhatmi & Van Opstal, 2026; Marantes et al., 2023). A compelling development is the emergence of B2B platforms powering Digital Product Passports (DPPs), which address data gaps in product and material composition and facilitate reuse, repair, refurbishment, and recycling (Boukhatmi & Van Opstal, 2026). “Circularise” uses blockchain-certified DPPs to help manufacturers move from self-declared sustainability to verifiable, third-party-certified claims, strengthening their value proposition, while also reconfiguring value capture by reducing compliance costs and mitigating risks posed by upcoming regulation such as the EU's ESPR (2024). Honda Motor Europe’s collaboration with “Circularise” on a digital battery passport, ahead of the Battery Regulation’s (EU) 2023/1542) 2027 passport requirement, shows how proactive data tracking secures regulatory readiness and competitive advantage, allowing for increased operational efficiency. Where “Circularise” establishes the baseline for verified compliance, “PiCo2RAEE” embeds DPP data into an operational second-life management tool that helps collection centers identify the most profitable reuse options for collected products and components, supporting disassembly operators’ strategic planning and creating a market for traceable second-life products and components that would otherwise have been disposed of (Marconi et al., 2026; Pietroni et al., 2025).

In practice, intermediary and SaaS platforms are not always mutually exclusive. While “Floow2’s” asset-sharing marketplace is operated via a customizable, subscription-based software platform, “ECirc4all”, currently under development, is envisioned to complement its matchmaking features with cloud-based software for sustainability reporting, tracking quantities of used EEE. For “ECirc4all”, this reconfigures value capture for both PROs and manufacturers: PROs reduce transaction costs for reporting their operations by drawing on data generated through marketplace activities, while OEMs reduce transaction costs for meeting sustainability disclosure requirements and tracking circularity targets.

4 CONCLUDING REMARKS

We examined four platforms to illustrate how digitally-enabled CBMI unfolds in practice. These platforms address central barriers including market failures, information asymmetries, and cross-organizational coordination challenges, which must be overcome to achieve outcomes like prolonging product life cycles. Across the cases considered ("Floow2", "ECirc4all", "Circularise", and "PiCo2RAEE"), two distinct patterns emerge in how digital platforms support CBMI. Market intermediary platforms, such as "Floow2" and "ECirc4all", primarily reconfigure value delivery and capture by creating new channels through which surplus resources, secondary materials, and circular services can be exchanged, enabling firms to diversify revenue while extending, intensifying, and closing material loops. From a platform owner's perspective, revenue from running such marketplaces is mostly commission-based, "by charging a fixed fee, earning commissions from buyers and sellers on the market" (Ritala & Jovanovic, 2024). SaaS platforms, such as "Circularise" and "PiCo2RAEE", instead reconfigure value creation by embedding resource tracking, data sharing, and lifecycle management into business processes. Through functionalities such as Digital Product Passports, they transform regulatory requirements for traceability and transparency into sources of competitive advantage by improving data quality, auditability, and accountability (Psarommatis & May, 2026). For software providers, the value proposition lies in offering businesses specialized features to support circularity, with revenue typically derived from subscription fees (Boukhatmi & Van Opstal, 2026).

The innovation potential of platform-based CBMI and the extent to which firms capture value from it, however, depend less on platform type than on the firm's existing business model (portfolio) and the depth of platform integration. Firms that adopt platforms merely as complementary distribution channels or as tools for CE-related reporting and compliance typically realize *incremental* innovation (Al-Khatib & Al-ghanem, 2021; Sivaiah & Vinodan, 2025). Here, platforms create additional channels through which resources, services, and information are exchanged across organizational boundaries, generating revenue from resource sharing while reducing transaction, reporting, and compliance costs. Value creation is innovated mainly through efficiency gains from intensified resource utilization, better information availability, and greater transparency, without necessarily altering the firm's value proposition. By contrast, firms that organize their BM around a platform logic, or embed platform functionalities deeply into their operations, may achieve more *transformational* CBMI. Here, digital technologies reconfigure not only value creation and delivery but the value proposition itself (e.g., servitization, rent instead of buy) (Curtis, 2021). Whether a firm acts as a focal orchestrator, as exemplified by "Floow2", or participates in a larger consortium, as in "ECirc4all", these inter-organizational dependencies introduce additional coordination requirements that often extend beyond the focal firm. As a result, such innovations often reshape the broader ecosystem in which value is co-created, thereby expanding the scope and impact of innovation (Mancuso et al., 2026; Schmitt & Rauter, 2026).

However, realizing the potential of platform-based CBMI requires overcoming several managerial challenges. First, intermediary platforms depend on achieving sufficient participation to generate network effects and establish viable markets (Berg & Wilts, 2019). Second, platform governance can create tensions between orchestrators and complementors over control and alignment, requiring sustained investment, particularly in early development stages (Arnold et al., 2025). Third, SaaS platforms and DPP-based solutions demand considerable data quality, interoperability, infrastructure, and cybersecurity capacity, creating adoption barriers especially for SMEs (Psarommatis & May, 2026). Finally, the material and energy demands of digital infrastructures may themselves cause rebound effects, underscoring the need for rigorous assessments of their net contribution to circularity (Berg & Wilts, 2019).

This contribution has explored how platform-based CBMI may make businesses more profitable and circular, how it fosters collaboration to overcome persistent barriers, and the managerial challenges it may pose, drawing on illustrative examples rather than systematic empirical analysis. Future research should investigate the scalability of platform-based CBMI across sectors and institutional contexts, using comparative case studies and quantitative impact assessments to weigh circularity outcomes against potential rebound effects–and centering the perspectives of

customers and end users–to help determine when digital platforms can move beyond isolated success stories to become reliable enablers of a (more) systemic circular economy.

REFERENCES

Aagaard, A. (2024). Introducing Business Model Innovation and the Game Changers of Tomorrow. In A. Aagaard (Ed.), *Business Model Innovation: Game Changers and Contemporary Issues* (pp. 1–25). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57511-2_1

Al-Khatib, A. W., & Al-ghanem, E. M. (2021). Radical innovation, incremental innovation, and competitive advantage, the moderating role of technological intensity: Evidence from the manufacturing sector in Jordan. *European Business Review*, 34(3), 344–369. https://doi.org/10.1108/EBR-02-2021-0041

Arnold, L., Hukal, P., & Link, M. (2025). Consortium Governance and Market Entry of Digital B2B Platforms: The Case of ADAMOS. *Information Systems Journal*, 35(4), 1235–1256. https://doi.org/10.1111/isj.12580

Assmann, I. R., Rosati, F., & Morioka, S. N. (2023). Determinants of circular business model adoption—A systematic literature review. *Business Strategy and the Environment*, *32*(8), 6008–6028. https://doi.org/10.1002/bse.3470

Barteková, E., & Börkey, P. (2022). *Digitalisation for the transition to a resource efficient and circular economy, OECD Environment Working Papers*, No. 192, OECD Publishing, Paris. https://doi.org/10.1787/6f6d18e7-en

Berg, H., & Wilts, H. (2019). Digital platforms as market places for the circular economy: Requirements and challenges. *Nachhaltigkeits Management Forum | Sustainability Management Forum*, *27*(1), 1–9. https://doi.org/10.1007/s00550-018-0468-9

Blackburn, O., Ritala, P., & Keränen, J. (2023). Digital Platforms for the Circular Economy: Exploring Meta-Organizational Orchestration Mechanisms. *Organization & Environment*, *36*(2), 253–281. https://doi.org/10.1177/10860266221130717

Blackburn, O., Ritala, P., Keränen, J., & Bocken, N. (2025). Circular Economy Platforms: A Systematic Review. *Business Strategy and the Environment, 35(2)*. https://doi.org/10.1002/bse.70307

Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., & Pavel, C. (2020). *Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU: A foresight study*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2873/58081

Boukhatmi, Ä., & Van Opstal, W. (2026). How Can Digital Platforms Resolve Market Failures to Foster a Circular Economy? *Business Strategy and the Environment*, *35*(1), 737–758. https://doi.org/10.1002/bse.70190

Curtis, S. K. (2021). Business model patterns in the sharing economy. *Sustainable Production and Consumption*, *27*, 1650–1671. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.04.009

Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Official Journal of the European Union, L 197/38 (2012). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019

Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as regards corporate sustainability reporting. Official Journal of the European Union, L 322/15 (2022). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022L2464

EEA. (2025). *Europe's consumption in a circular economy: The benefits of longer-lasting electronics*. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/europes-consumption-in-a-circular-economy-the-benefits-of-longer-lasting-electronics

European Commission. (2025). The Clean Industrial Deal: A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation (COM(2025) 85 final). Publications Office of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52025DC0085

Geissdoerfer, M., Pieroni, M. P. P., Pigosso, D. C. A., & Soufani, K. (2020). Circular business models: A review. *Journal of Cleaner Production*, *277*, 123741. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123741

Geissdoerfer, M., Vladimirova, D., & Evans, S. (2018). Sustainable business model innovation: A review. *Journal of Cleaner Production*, *198*, 401–416. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.240

Izquierdo-Montfort, J. O., De Rongé, Y., O. G. Thewissen, J., Wilmet, S., & Arslan-Ayaydin, Ö. (2026). Do Circular Economy Strategies Create Value? Evidence From the United States. *Business Strategy and the Environment*, 1–38. https://doi.org/10.1002/bse.70683

Jacobides, M. G., Cennamo, C., & Gawer, A. (2024). Externalities and complementarities in platforms and ecosystems: From structural solutions to endogenous failures. *Research Policy*, 53(1), 104906. https://doi.org/10.1016/j.respol.2023.104906

Mancuso, I., Petruzzelli, A. M., Panniello, U., & Del Giudice, M. (2026). Value Co-Creation and Value Capture in Digital Innovation Ecosystems: A Multiple Case Study in the Agrifood Sector. *Creativity and Innovation Management*, 1–15. https://doi.org/10.1111/caim.70063

Marantes, G., Soares, A. L., & Silva, H. D. (2023). The Design of Digital Platform Ecosystem Supporting Circular Economy. In L. M. Camarinha-Matos, X. Boucher, & A. Ortiz (Eds.), *Collaborative Networks in Digitalization and Society 5.0* (pp. 80–90). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42622-3_6

Marconi, M., Pietroni, G., Fiore, E., Rogato, A., & Favi, C. (2026). Reshaping the electric and electronic equipment sector towards a circular economy: The PiCo2RAEE platform. *Procedia CIRP*, *140*, 617–622. https://doi.org/10.1016/j.procir.2026.05.104

Miehé, L., & Gassmann, O. (2024). New Venues for Collaborative Business Model Innovation Through Ecosystems. In A. Aagaard (Hrsg.), *Business Model Innovation: Game Changers and Contemporary Issues* (1st ed., pp. 57–89). Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57511-2_3

Pietroni, G., Marconi, M., Favi, C., Tamborrini, P. M., Marino, C., & Fiore, E. (2025). Circular economy for electrical and electronic equipment: A life cycle design and management platform. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. https://doi.org/10.1007/s12008-025-02406-3

Psarommatis, F., & May, G. (2026). A Comprehensive Review of Digital Product Passports in Sustainable Manufacturing: Current State, Challenges, and Future Directions. *Circular Economy and Sustainability*, *6*(3), 207. https://doi.org/10.1007/s43615-026-00927-x

Rauter, R., Santa-Maria, T., & Schöggl, J.-P. (2022). Sustainable Business Models. In D. D'Amato, A. Toppinen, & R. Kozak, *The Role of Business in Global Sustainability Transformations* (1st ed., pp. 26–44). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003003588-4

Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC. Official Journal of the European Union, L 191/1 (2023). http://data.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj

Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products [ESPR], amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC. Official Journal of the European Union, L 2024/1781 (2024). http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj

Ritala, P., & Jovanovic, M. (2024). Platformizers, Orchestrators, and Guardians: Three Types of B2B Platform Business Models. In A. Aagaard (Ed.), *Business Model Innovation* (pp. 91–125). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57511-2_4

Sakschewski, B., Caesar, L., Andersen, L., Bechthold, M., Bergfeld, L., Beusen, A., Billing, M., Bodirsky, B. L., Botsyun, S., Dennis, D. P., Donges, J., Dou, X., Eriksson, A., Fetzer, I., Gerten, D., Häyhä, T., Hebden, S., Heckmann, T., Heilemann, A., … Rockström, J. (2025). *Planetary Health Check 2025: A Scientific Assessment of the State of the Planet.* Planetary Boundaries Science (PBScience). https://doi.org/10.48485/PIK.2025.017

Santa-Maria, T., Vermeulen, W. J. V., & Baumgartner, R. J. (2022). How do incumbent firms innovate their business models for the circular economy? Identifying micro-foundations of dynamic capabilities. *Business Strategy and the Environment*, *31*(4), 1308–1333. https://doi.org/10.1002/bse.2956

Schmitt, A., & Rauter, R. (2026). Collaborative Circular-Oriented Innovation in the Austrian Food Industry: Insights From the Fruit and Vegetable Supply Chain. *Journal of Circular Economy*, *4*(1). https://doi.org/10.55845/joce-2026-41352

Siefridt, C. (2026). *Circular economy act* (EPRS Briefing No. PE 782628). European Parliamentary Research Service.https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2026/782628/EPRS_BRI(2026)782628_EN.pdf

Sivaiah, P., & Vinodan, A. (2025). Digitalization in stages: Advancing sustainability reporting in SMEs through a maturity-based adoption model. *Journal of Global Responsibility*, 17(2), 250–292. https://doi.org/10.1108/JGR-04-2025-0124

World Economic Forum. (2026). *The Global Risks Report 2026* (No. 21). https://reports.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2026.pdf

CONTACT

Assoc. Prof. Dr. Romana Rauter: romana.rauter@uni-graz.at
Anika Schmitt, MA BA: anika.schmitt@uni-graz.at

Innovative und nachhaltige Geschäftsmodelle für Maschinen der Abfallwirtschaftsbranche am Beispiel von Komptech

Jochen Mandl[1], Ewald Konrad[2] & Bernd Walter[3]
[1)] Komptech, Internal Sales Management, Frohnleiten, Österreich
[2)] Komptech, Geschäftsführung, Frohnleiten, Österreich
[3)] Komptech, Marketing & Kommunikation, Frohnleiten, Österreich

KURZFASSUNG: Aufgrund der herausfordernden Zeiten, sinkenden Investitionsbereitschaft und schwachen Konjunktur ist auch die Abfallwirtschaftsbranche gefordert, innovative und nachhaltige Geschäftsmodelle zu entwickeln, die den sich ändernden Kundenbedürfnissen entsprechen. Neben klassischen Kauf- und Mietmodellen sind daher innovative Lösungen wie Pay-per-use gefragt, um neue Vorteile für Kunden zu generieren und gleichzeitig ressourcenschonender zu wirtschaften. Auch der steirische Recyclingspezialist Komptech bietet seit Frühjahr 2026 ein solches Geschäftsmodell für seine Kunden in Österreich und Deutschland an.

1 HERAUSFORDERUNGEN UND CHANCEN DER BRANCHE

Seit dem Jahr 2023 verzeichnen Maschinenhersteller der Abfallwirtschafts- und Umwelttechnikbranche eine schwache Konjunktur, sinkende Nachfrage und eine niedrigere Investitionsbereitschaft ihrer Kunden. Vor allem hohe Produktions- und Energiekosten sowie eine unsichere wirtschaftliche Lage werden dafür als Gründe genannt. Auch im Jahr 2026 ist laut des europäischen Maschinenbauverbands VDMA keine Erholung zu erwarten. (Scholl, 2026) Somit stehen Maschinenbauer in ganz Europa vor der Herausforderung, innovative und bedarfsorientierte Modelle im Investitionsgüterbereich zu entwickeln, die den aktuellen Kundenanforderungen entsprechen und höhere Flexibilität gewährleisten. Hersteller, die sich derzeit nicht weiterentwickeln, laufen Gefahr, den Anschluss zu versäumen und sich letztendlich nicht mehr an die neuen Umweltbedingungen anpassen zu können. (Gassmann et.al., 2021)

Trotz der rückläufigen oder sich nur schwach erholenden Zahlen weist die Abfallwirtschaft eine langfristig positive Perspektive auf. Steigende Recyclingquoten, strenger werdende Umweltauflagen sowie die höhere Nachfrage nach sekundären Rohstoffen und die damit verbundene Unabhängigkeit lassen die Abfall- und Recyclingbranche zu einer unübersehbaren Zukunftsbranche werden. (Rottnick, 2025) Nun gilt es, diese Chancen in Form von innovativen Geschäftsmodellen zu nutzen und neue Nutzungsmodelle zu präsentieren, die maximale Flexibilität und überschaubare Kosten versprechen. Zudem ist es wichtig, die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in den Modellen zu berücksichtigen. (Smol et al., 2024)

Als einer der Vorreiter gilt dabei das österreichische Unternehmen Komptech, führender Technologie- und Kompetenzpartner für mechanisches und biologisches Abfallrecycling sowie die Aufbereitung holziger Biomasse. Mit über 50 Maschinentypen im Portfolio werden von Komptech alle Prozessschritte der modernen Abfallbehandlung abgedeckt – von der Zerkleinerung von Industrie- und biogenen Abfällen über Separation bis hin zur biologischen Behandlung. Komptech entwickelt laufend neue Geschäftsmodelle, um am Puls der Zeit zu bleiben und die Produkte ideal an die sich ändernden Kundenbedürfnisse anzupassen. Dabei ist es notwendig, die Ausgangssituation konkret zu analysieren, die getroffenen Annahmen zu verifizieren, erste Prototypen zu testen und zuletzt einen erfolgreichen Markteintritt zu gestalten. (Buchholz & Bürger, 2020) Im Folgenden werden mehrere Geschäftsmodelle in Bezug auf die Maschinen der Abfallwirtschaft präsentiert.

2 KAUFEN, MIETEN ODER PAY-PER-USE

Die Anschaffung einer Abfallbehandlungsmaschine ist meist mit hohen Kosten verbunden und stellt vor allem für kleinere Unternehmen eine nicht zu unterschätzende finanzielle Herausforderung dar. Daher lohnt es sich, vor der Anschaffung verschiedene Modelle gegeneinander abzuwägen. Denn jede Variante hat Vor- und Nachteile – ob Kauf-, Miet- oder Pay-per-use-Option. Vor dem Vertragsabschluss steht ein ausführliches Beratungsgespräch sowie in den meisten Fällen auch eine Besichtigung der Maschine vor Ort.

2.1 Kaufmodelle

Der klassische Weg der Maschinenbauer ist der Verkauf von Maschinen. Dabei wird die verkaufte Maschine zu einem festen Bestandteil der Maschinenflotte des Kunden. Kundenvorteile sind die niedrigeren durchschnittlichen Kosten ab einer gewissen Gesamtauslastung, Abschreibungsmöglichkeiten (je nach steuerrechtlichen Rahmenbedingungen) sowie die ständige Verfügbarkeit der Maschine. Letztendlich kann auch der Restwert der Maschine nach Ende der Nutzungsdauer eine Rolle bei der Entscheidung zum Kauf spielen. (Tukker, 2015)

Demgegenüber stehen jedoch auch Nachteile wie hohe Anschaffungskosten, eine geringe Flexibilität bei sich ändernden Anforderungen und das Risiko von Stillstandszeiten. In vielen Fällen sind die Käufer nach dem Kauf allein für Wartung und Servicierung zuständig. Komptech geht jedoch auch hier innovative Wege und bietet mit Servicepauschalen fix kalkulierbare Kosten für die regelmäßige Wartung der Maschinen.

Neben dem Kauf von Neumodellen gibt es die Option des Gebrauchtmaschinenkaufs. Dies wird auch von Komptech angeboten. (Komptech, 2025) Der größte Vorteil im Vergleich zum Erwerb einer neuen Maschine liegt an den deutlich günstigeren Anschaffungskosten. Verschiedene Quellen sprechen von 20 bis 60 % Kostenersparnis. Zudem ist mit einer schnelleren Lieferzeit zu rechnen, da keine Fertigungszeit mehr berücksichtigt werden muss. Um das Risiko mangelnder Qualität bei Gebrauchtmaschinen zu umgehen und die Variante für Käufer somit attraktiver zu gestalten, werden die Gebrauchtmaschinen bei Komptech aufbereitet und mit dem Qualitätsversprechen „Certified used“ weiterverkauft. Dadurch profitieren die Käufer von geprüfter Qualität, original Ersatzteilen und einer Restgarantie.

2.2 Mietmodelle

Mietmodelle sind seit einiger Zeit am Vormarsch. So verzeichnete die European Rental Association im Jahr 2024 einen Gesamtumsatz des europäischen Maschinenvermietungsmarkts in 17 Ländern in Höhe von 33,4 Milliarden Euro – Tendenz steigend. (ERA, 2025) Denn Mietmodelle sind ökonomisch attraktiv für Kunden mit schwankendem Bedarf oder knapper Liquidität und werden auch bei schwacher Konjunktur gerne genutzt, da keine hohen Investitionssummen anfallen und dennoch präzise Kostenkalkulationen möglich sind.

Der steirische Recyclingspezialist Komptech setzt neben Kaufoptionen auch auf Mietmodelle, um Kapazitätsspitzen und Überbrückungen bei Maschinenausfällen abzudecken. Durch regelmäßiges Servicieren der Mietmaschinen wird ihre Lebensdauer entscheidend verlängert, was zu einer deutlichen Ressourceneinsparung führt. (Komptech, 2025) Mietmodelle haben zudem den Vorteil, durch regelmäßigen Austausch zwischen Maschinenbauer und Kunden die Kundenbindung zu stärken. Im Normalfall kann sich der Kunde außerdem darauf verlassen, dass die gemieteten Modelle stets auf dem neuesten technischen Stand sind.

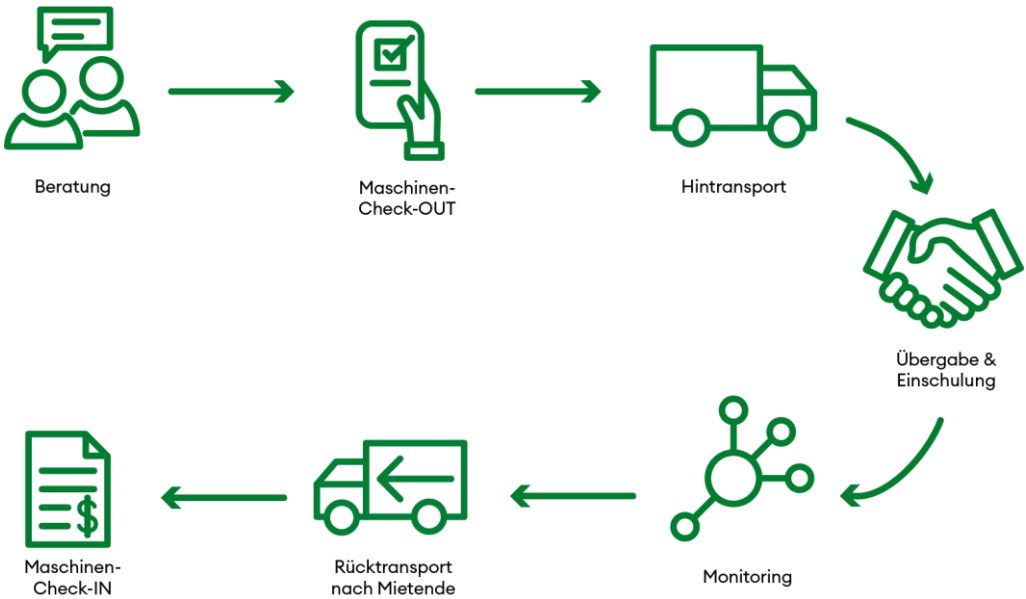


Abb. 1: Der Rental-Prozess bei Komptech

2.3 Pay-per-Use-Modelle

Pay-per-use unterscheidet sich konzeptionell von der klassischen Flatrate-Miete, da hier die Vergütung direkt an die tatsächliche Nutzung gebunden ist. Dadurch zahlt der Kunde lediglich die gefahrenen Betriebsstunden und nimmt – im Gegensatz zur zeitlichen Miete – keine Kosten bei Stillstandzeiten in Kauf. Je nach Auslastung und dem somit entsprechenden Umsatz steigen oder sinken die Maschinenkosten proportional, was eine praktische Kostenskalierung darstellt. Gerade in Zeiten niedriger Investitionsbereitschaft und schwacher Konjunktur ist dieses Modell gut geeignet, um kostensparend zu kalkulieren und dennoch gut auf Auslastungsspitzen vorbereitet zu sein.

Im Frühling 2026 startete Komptech in Kooperation mit dem oberösterreichischen Start-up Findustrial mit den Pay-per-Use-Modellen (Equipment as a service) und kommuniziert die Vorteile für Unternehmen: eine hohe Flexibilität bei gleichzeitig vollständiger Kostenkontrolle. Das Modell ist derzeit für Österreich und Deutschland verfügbar und schließt die zeitliche Lücke zwischen dem Kauf mit langen Abschreibungszeiten und dem kurzfristigen Mietmodell von wenigen Wochen. Je nach Bedarf kann die Maschine über Pay-per-use mit einer Vertragslaufzeit zwischen einem und fünf Jahren gemietet werden und wird am Ende der Frist wieder an Komptech zurückgegeben. Die Kosten werden dabei transparent in 3 Bereiche aufgeschlüsselt: eine einmalige Bereitstellungsgebühr, in der die Transport- sowie die Abholungskosten, die Einschulung und die Inbetriebnahme inkludiert sind, eine monatliche Grundgebühr zur Deckung der Fixkosten und zuletzt die nutzungsabhängigen Gebühren, die sich nach den tatsächlich genutzten monatlichen Betriebsstunden richten. Dabei gilt: Je länger die vereinbarte Laufzeit, desto niedriger der Preis pro Betriebsstunde.

Modell	Kapital-bindung	Kostencharakteristik	Flexibilität	Bilanzielle Wirkung	Wesentliche Nutzungsargumente
Direktkauf (Ownership)	Hoch (CAPEX)	Hohe Einmalinvestition, niedrige variable Kosten	Gering bis mittel	Aktivierung des Anlage-guts, Abschreibung	Höchste Verfügbarkeit, vollständige Eigentumsrechte, langfristig niedrigste Gesamtkosten bei hoher Auslastung
Pay-per-Use (Leasing)	Niedrig bis mittel	Nutzungs- bzw. laufzeit-abhängige Zahlungen	Mittel bis hoch	Überwiegend OPEX-orientiert	Hohe Kostentransparenz, reduzierte Kapitalbindung, Risikoübertragung auf Anbieter
Miete (Rental)	Sehr gering	Vollständig variable Nut-zungskosten	Sehr hoch	Reiner OPEX-Ansatz	Maximale Flexibilität, keine langfristige Bindung, schnelle Verfügbarkeit

Abb. 2: Vergleich der Vorteile zwischen den Modellen Kaufen, Pay-per-use und Mieten.

3 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Nicht nur durch die sinkende Investitionsbereitschaft aufgrund schwacher Konjunktur wird sichtbar, dass bei der Anschaffung von Maschinen in der Abfall- und Recyclingbranche neben Kaufoptionen auch andere Modelle immer gefragter werden. Varianten wie Miet- oder Pay-per-use-Modelle ermöglichen einen flexiblen und kostengünstigeren Einsatz von Maschinen für Kunden, der sich an Auslastung und aktuellem Bedarf bzw. Bedarfsspitzen orientiert. Langfristig wird die Branche durch steigende Recyclingquoten und strengere Umweltauflagen einen Aufschwung erleben, dessen Fundament bereits jetzt durch innovative Geschäftsmodelle gelegt wird.

LITERATURVERZEICHNIS

Buchholz, B., & Bürger, M. (2020). *Der Geschäftsmodell-Toolguide: Von der Idee zur Umsetzung.* Frankfurt am Main: Campus Verlag.

ERA. (2025). *https://erarental.org/publications/*. Von https://erarental.org/publications/: https://www.internationalrentalnews.com/news/the-european-rental-association-era-releases-2025-market-report/8087043.article?zephr_sso_ott=PkIhee abgerufen

Gassmann, O., Frankenberger, K., & Choudury, M. (2021). *Geschäftsmodelle entwickeln: 55+innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Navigator.* München: Carl Hanser Verlag.

Komptech. (2025). *ESG-Bericht.* Frohnleiten: Komptech.

Rottnick, K. (2025). *Recovery – Recycling Technology Worldwide*. Von https://www.recovery-worldwide.com: https://www.recovery-worldwide.com/de/news/vdma-fruehjahrsumfrage-2026-4383867.html abgerufen

Scholl, F. (2026). *VDMA*. Von https://www.vdma.eu/: https://www.vdma.eu/de/viewer/-/v2article/render/163810681 abgerufen

Smol, M., Marcinek, P., & Duda, J. (2024). *Circular Business Models (CBMs) in Environmental Management — Analysis of Definitions, Typologies and Methods.* Von https://www.mdpi.com: https://www.mdpi.com/2071-1050/16/3/1209 abgerufen

Tukker, A. (2015). Product services for a resource-efficient and circular economy – A review. *Journal of Cleaner Production*, 76-91.

Der Circular Economy Act der EU – überfälliger Neustart für Europas Ressourcenpolitik

Gregor Biley[1]
[1)] Niederhuber & Partner Rechtsanwälte GmbH, Graz/Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die Europäische Union bereitet mit dem „Circular Economy Act“ (CEA) einen neuen Rechtsakt zur Kreislaufwirtschaft vor, der als Verordnung auf Grundlage von Art. 114 AEUV den Binnenmarkt für Abfälle, Sekundärrohstoffe und sekundäre Produkte grundlegend (neu-)ordnen soll (Siefridt 2026). Anders als frühere Aktionspläne in diesem Bereich ist der CEA explizit als Wettbewerbs- und Industriepolitik positioniert und soll die Kreislaufrate bis 2030 verdoppeln, die strategische Abhängigkeit von Drittstaaten verringern und die Rahmenbedingungen für hochwertige Rezyklate verbessern. Der Beitrag skizziert aufbauend auf den aktuellen Kommissionsunterlagen, des EP-Briefings sowie der Auswertung der öffentlichen Konsultation die Ziele und Maßnahmen des geplanten Rechtsakts, analysiert zentrale Problemfelder und diskutiert, ob der CEA tatsächlich als „Neustart“ der EU-Ressourcenpolitik gelten kann.
Allgemeiner Hinweis: Dieser Artikel stellt den aktuellen Rechtsstand per Juli 2026 dar. Zu diesem Zeitpunkt ist der CEA nur als Vorschlag der Europäischen Kommission bekanntgemacht, zu welchem eine öffentliche Konsultation stattgefunden hat. Die Initiierung des Gesetzgebungsverfahrens ist frühestens für das zweite Halbjahr 2026 geplant. Änderungen im Rechtsbestand, die nach dem 12.7.2026 liegen, konnten daher hierin nicht berücksichtigt werden.

1 VOM AKTIONSPLAN ZUM WETTBEWERBSINSTRUMENT

Die europäische Ressourcen- und Abfallpolitik befindet sich seit über 10 Jahren im Übergang von einer hauptsächlich linearen „take-make-use-dispose“-Logik hin zur Kreislaufwirtschaft. Den Rahmen bilden der Aktionsplan „Closing the loop“ von 2015 und der Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft von 2020 (Europäische Kommission 2026), (Europäische Kommission 2020). Sie setzen auf Abfallvermeidung, höhere Recyclingquoten und bessere Produktgestaltung und stützen sich auf klassische Umwelt- und Abfallrechtsinstrumente wie Getrenntsammlung, Verwertungsziele, Ökodesign-Vorgaben und verpackungsrechtliche Vorgaben (Siefridt 2026).

Die seitens der Kommission zwischenzeitig gezogene Bilanz zeigt zwar bereits erste Fortschritte (beispielsweise sind die Recyclingquoten gestiegen und die Beschäftigung im Kreislaufsektor hat zugenommen), offenbart aber auch, wo im System noch nachgebessert werden muss. So stagniert die zirkuläre Materialnutzungsrate seit Jahren und lag 2023 bei nur rund 11,8 %. Auch überschreitet der Materialfußabdruck der EU mit etwa 14 Tonnen pro Kopf weiterhin die ökologischen Belastungsgrenzen. Die Europäische Umweltagentur kritisiert, dass die EU-Politik zu stark auf „downstream“-Maßnahmen wie Abfallbewirtschaftung und Recycling setzt und zu wenig auf Vermeidung, Wiederverwendung, Reparatur und die absolute Reduktion des Ressourcenverbrauchs (Siefridt 2026). Hinzu kommt eine wachsende Abhängigkeit von Importen strategischer und kritischer Rohstoffe. Bei schweren Seltenen Erden liegt die Importabhängigkeit nahezu bei 100 %, die Lieferketten konzentrieren sich auf wenige Drittstaaten. Der Rohstoffhandel der EU ist defizitär, die Importmengen sind gestiegen. Berichte von Mario Draghi und Enrico Letta sowie politische Erklärungen von Rat und Industrie heben hervor, dass Kreislaufwirtschaft ein zentrales Mittel zur Senkung von Materialkosten energieintensiver Branchen und zur Verringerung außenwirtschaftlicher Abhängigkeiten ist (Draghi 2024), (Letta 2024).

Mit dem CEA reagiert die Kommission auf diese Gemengelage. Der CEA soll als Verordnung auf Grundlage von Artikel 114 AEUV den Binnenmarkt für Abfälle, Sekundärrohstoffe und daraus hergestellte Produkte harmonisieren und Kreislaufwirtschaft ausdrücklich als Wettbewerbs- und

Sicherheitsinstrument verankern. Er baut auf bestehenden Rechtsakten auf (Abfallrahmenrichtlinie, Deponie- und WEEE-Regelungen, Ökodesign-Verordnung, Verpackungsrecht), adressiert aber insbesondere Markt- und Governancefragen. Eine breite öffentliche Konsultation im Jahr 2025 bildet die empirische Basis der Folgenabschätzung (Europäische Kommission 2025).

2 WAS WIRD DER CEA (WAHRSCHEINLICH) BEINHALTEN?

2.1 Ziele des CEA

Der Circular Economy Act soll den bislang zu langsamen Übergang zur Kreislaufwirtschaft deutlich beschleunigen und einen funktionierenden Binnenmarkt für Abfälle und Sekundärrohstoffe schaffen. Kernproblem aus Sicht der Kommission ist die stagnierende Zirkularitätsrate und die geringe Nutzung von Sekundärrohstoffen. Der CEA zielt daher darauf ab, Angebot und Nachfrage nach hochwertigen, überprüfbaren Sekundärrohstoffen zu erhöhen und rechtliche Hindernisse im Binnenmarkt abzubauen. Quantitativ verfolgt die Kommission das Ziel, die zirkuläre Materialnutzungsrate bis 2030 auf 24 % zu verdoppeln (Siefridt 2026). Dies steht im Kontext des 8. Umweltaktionsprogramms, das eine deutliche Reduktion der Material- und Konsumfußabdrücke und ihre Ausrichtung an planetaren Grenzen vorsieht. Der Rat fordert die Prüfung wissenschaftsbasierter, wirtschaftlich tragfähiger Reduktionsziele für Ressourcennutzung.

Ein Schwerpunkt liegt auf kritischen Rohstoffen. Deren Recyclingraten, etwa für Lithium und Seltene Erden, liegen derzeit deutlich unter einem Prozent. Viele dieser Stoffe stecken in Elektro- und Elektronikgeräten. Der CEA soll diese Abfallströme als Rohstoffquellen erschließen und die Ziele des Critical Raw Materials Act unterstützen, indem er Rückgewinnung und Marktnachfrage für Sekundärrohstoffe stärkt. Über diese Punkte hinaus soll der CEA externe Umwelt- und Gesundheitsbelastungen der linearen Wirtschaft verringern, die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie verbessern und die strategische Autonomie der EU stärken. Ressourceneffizienz und kreislauforientierte Verfahren können einen wichtigen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten. Da Materialien in vielen Industrien den größten Kostenblock darstellen, kann eine robuste Kreislaufwirtschaft zudem die Abhängigkeit von Rohstoffimporten verringern.

2.2 Welche Maßnahmen sieht der CEA vor?

Die Kommission benennt zwei zentrale Handlungsfelder: Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE) sowie den Binnenmarkt für Abfälle und Sekundärrohstoffe.

Im Bereich WEEE geht es um einen stark wachsenden, bislang unzureichend genutzten Abfallstrom. Der Abfallstrom in diesem Bereich wächst mit rund zwei Prozent jährlich, weniger als 40 % des Abfallstroms werden recycelt. Der CEA soll hier die Sammlung und das Recycling verbessern und eine Nachfrage nach kritischen Sekundärrohstoffen aus diesen Geräten erzeugen. Eine Überarbeitung der WEEE-Regelungen wird erwogen, um sie zweckmäßiger und einfacher zu gestalten. Die Konsultation zeigt hohe Zustimmung bei Behörden, NGOs und Wissenschaft zu stärkerer Herstellerverantwortung für Sammelziele und zu Kontrollen gegen illegale Exporte von Elektroaltgeräten (Siefridt 2026).

Horizontale Maßnahmen zielen auf die Harmonisierung grundlegender Rechtsbegriffe und Instrumente. Besonders wichtig sind End-of-Waste-Kriterien und die Definition von Nebenprodukten. Derzeit bestehen 27 nationale Regime mit unterschiedlichen Anforderungen, wann ein Stoff den Abfallstatus verliert. Diese Fragmentierung führt zu Rechtsunsicherheit, behindert den grenzüberschreitenden Handel mit Sekundärrohstoffen und verhindert Skaleneffekte. Der CEA soll unionsweite Kriterien weiterentwickeln und die gegenseitige Anerkennung nationaler Regelungen

stärken. In der Konsultation werden fehlende EU-weite Kriterien, die Heterogenität der Regeln und mangelnde Anerkennung als zentrale Hindernisse benannt.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Reform der erweiterten Herstellerverantwortung (Extended Producer Responsibility, EPR). Die Kommission sieht hier strukturelle Governance-Probleme: EPR-Systeme seien stark auf Kostenminimierung für Hersteller und wenig auf Kreislaufergebnisse ausgerichtet. Der Textilsektor zeigt, dass Wiederverwendung und Sammlung unterfinanziert und durch sinkende Qualität der Sammelware belastet sind (Siefridt 2026). Der CEA soll EPR-Systeme vereinfachen, harmonisieren und digitalisieren, etwa durch EU-weite Online-Plattformen zur Registrierung, mehr Transparenz bei Gebühren und Mindestanforderungen an die Verwendung der Mittel. Die Konsultation bestätigt breite Unterstützung für Transparenz und Kostendeckung, während die Ausweitung obligatorischer EPR-Systeme auf zusätzliche Produktgruppen bei Behörden und Forschung überwiegend Zustimmung, bei Wirtschaftsverbänden eher Skepsis erfährt (Europäische Kommission 2026).

Zur Nachfrageförderung für Sekundärrohstoffe wird die öffentliche Beschaffung als Hebel gesehen. Der CEA soll Kriterien für Ausschreibungen definieren, die Kreislaufaspekte wie Haltbarkeit, Reparierbarkeit, Rezyklierbarkeit und Rezyklatanteile berücksichtigen. Viele Stakeholder sehen die öffentliche Beschaffung als starken Treiber, insbesondere in Bereichen wie Bau und Infrastruktur, Elektronik, IKT sowie Textilien. Weitere Maßnahmen betreffen Vereinfachung und Harmonisierung von Genehmigungsverfahren für Recyclinganlagen, die Förderung transregionaler „Circularity Hubs“ für Sammlung, Sortierung und Verwertung sowie Anpassungen der Abfallverzeichnis-Verordnung, um neue Abfallströme wie Photovoltaik-Module, Glas- und Carbonfaserverbundstoffe oder separat erfasste Bioabfälle besser abzubilden. Diskutiert werden ergänzend fiskalische Instrumente wie Deponie- und Verbrennungssteuern, die Begünstigung recycelter Inputs im Mehrwertsteuersystem und Anforderungen an Exporte abfallgebundener kritischer Rohstoffe (Siefridt 2026).

3 PROBLEME UND KONFLIKTFELDER AUS DER BISHERIGEN KONSULTATION

Die Kommission erkennt mehrere Formen von Marktversagen, die den bisherigen Übergang zur Kreislaufwirtschaft behindern. Höhere Preise von Sekundärrohstoffen spiegeln ihre geringeren Umweltbelastungen nicht wider; externe Kosten der zirkulären Wirtschaftsweise werden nicht angemessen eingepreist. Informationsdefizite, Verhaltensverzerrungen und Betrugsrisiken erschweren den Handel mit Rezyklaten. Die fragmentierte Rechtslage der Kriterien zum Abfallende, Nebenprodukten und EPR-Systemen führt zu Rechtsunsicherheit und erhöhten Transaktionskosten. Nationale Sonderwege verschärfen dies. Die Konsultation bestätigt, dass fehlende Harmonisierung und mangelnde gegenseitige Anerkennung als zentrale Hindernisse gesehen werden. Im WEEE-Bereich fehlen gerätebezogene Vorgaben für die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe, die Infrastruktur für Sammlung und Recycling ist unzureichend und Märkte sind kleinteilig. Über eine Ausweitung von Kategorien, etwa für Photovoltaik-Module, gehen die Meinungen auseinander (Europäische Kommission 2026).

Bei EPR-Systemen stehen Forderungen nach Transparenz und Lenkungswirkung im Spannungsverhältnis zu Sorgen vor Kostensteigerungen und administrativem Aufwand. NGOs und Verbraucherorganisationen sehen EPR als Instrument mit klaren Kreislaufzielen, Wirtschafts-verbände eher als Kostenverteilungsmechanismus (Europäische Kommission 2026). Spezifische Abfallströme wie Klärschlamm und Bioabfälle sind durch Kontaminationsrisiken und uneinheitliche Qualitätsstandards geprägt. Dies führt zu Skepsis und hemmt Investitionen in deren Nutzung als Sekundärmaterial (Europäische Kommission 2026). Ähnliche Herausforderungen bestehen bei Bergbauabfällen. Die internationale Dimension wird kritisch betrachtet. Viele Akteure erwarten, dass Kreislaufmaßnahmen die Abhängigkeit von Primärrohstoffimporten verringern und die strategische Autonomie stärken. Zugleich warnen sie vor Wettbewerbsnachteilen für EU-

Unternehmen, wenn Importe nicht vergleichbaren Anforderungen unterliegen. Die Wirkung hängt stark von der konkreten Ausgestaltung ab (Europäische Kommission 2026).

4 FAZIT – EIN ECHTER NEUSTART FÜR DIE RESSOURCENPOLITIK?

Die Antwortet lautet wie so oft: Es kommt darauf an. Der derzeitige Entwurf zum Circular Economy Act hat das Potenzial, die europäische Ressourcenpolitik neu zu rahmen, weil er die Kreislaufwirtschaft aus der Umweltpolitik in das Zentrum der Binnenmarkt- und Industriepolitik rückt. Als Verordnung auf Grundlage von Artikel 114 AEUV soll er unmittelbar harmonisierend wirken und zentrale Hindernisse im Binnenmarkt für Abfälle und Sekundärrohstoffe beseitigen. Maßnahmen zu WEEE, Kriterien zum Abfallende, EPR, öffentlicher Beschaffung und spezifischen Abfallströmen adressieren wesentliche Defizite des bestehenden Rahmens. Ob der CEA den „überfälligen Neustart“ aber tatsächlich bewirkt, hängt von seiner konkreten Ausgestaltung ab. Entscheidend ist, ob er über Effizienzsteigerungen hinaus verbindliche, wissenschaftsbasierte Reduktionsziele für den Ressourcenverbrauch integriert und Vermeidung, Wiederverwendung und Reparatur deutlich stärkt. Die Governance von EPR-Systemen, die Berücksichtigung von Gesundheits- und Stoffrecht und die praktische Umsetzung durch die Mitgliedstaaten werden weitere Prüfsteine sein. Für Juristen, Techniker und Praktiker der Abfallwirtschaft ist klar: Der CEA kann Abfall-, Rohstoff- und Industriepolitik enger verzahnen. Ob er damit zum überfälligen Neustart der EU-Ressourcenpolitik wird, entscheidet sich im Detail der Normsetzung und in der praktischen Umsetzung.

LITERATURVERZEICHNIS

Draghi, The future of European competitiveness: Report by Mario Draghi, (2024)

Europäische Kommission, Aufforderung zur Stellungnahme zu einer Folgenabschätzung – Circular Economy Act, (2025)

Europäische Kommission, Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft - Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa, COM(2020) 98 final

Europäische Kommission, Factual Summary Report on the Public Consultation on the Circular Economy Act (2026)

Letta, Much more than a market, (2024)

Siefridt, Circular economy act: Commission initiative in preparation, EPRS Briefing PE 782.628 (2026)

KONTAKT

Mag. Gregor Biley
gregor.biley@nhp.eu
Niederhuber & Partner Rechtsanwälte GmbH
www.nhp.eu

V.EFB

Verein zur Verleihung
des Zertifikates eines
Entsorgungsfachbetriebes



Setzen Sie ein Zeichen!

EFB-Zertifizierung: Nachhaltigkeit auf einem neuen Level - Mehr als „nur" ISO 14001

V.EFB ZERTIFIZIERTER ENTSORGUNGS FACHBETRIEB

Das Zertifikat Entsorgungsfachbetrieb:

- der anerkannte Branchenstandard der Abfall- und Ressourcenwirtschaft
- optimiert Betriebsabläufe
- sorgt für transparente Betriebsorganisation
- branchenspezifische Erweiterung zu ISO 9001 bzw. ISO 14001

Was garantiert eine EFB Zertifizierung?

- Überprüfung der Rechtskonformität (Legal Compliance)
- Leichte, unkomplizierte Umsetzung im Betrieb durch eine Prüfliste
- Ausreichender Versicherungsschutz sowie Risikoabschätzungen
- Zuverlässigkeit und Fachkunde der verantwortlichen Personen
- Plausibilitätsüberprüfung von Abfallbilanzen im EDM
- Vorteile bei Ausschreibungen und Behördenüberprüfungen
- Verwaltungsvereinfachungen für zertifizierte Betriebe

Lothringerstraße 12
1030 Wien
Tel.: +43(0)1 532 62 83
Mail: office@vefb.at

www.vefb.at



GEMEINSAM RESSOURCEN SICHERN

DIE STIMME DER ÖSTERREICHISCHEN ENTSORGUNGSBETRIEBE

ANTS Anthropogene Stoffkreisläufe | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Aufbereitung & Prozessketten

- Probenahme und Materialcharakterisierung
- Prozess- und Anlagentechnik
- Prozessbilanzierung und -optimierung



Modellierung & Bewertung

- Prozess- und Produktsystemmodellierung
- Lebenszyklusweite Nachhaltigkeitsbewertung und Materialflussanalysen
- Bewertung von Kreislaufführung und Circular Economy



Sensortechnik & Data Science

- Anwendung von Sensortechnik und KI-basierter Datenanalyse
- Digitales Stoffstrommonitoring
- Prozesssimulation und -steuerung



Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe
Wüllnerstraße 2, 52062 Aachen
www.ants.rwth-aachen.de

VIVIS

Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH
vivis Konferenzen
Konferenzen | Fachbücher | Wissenstransfer

TK Verlag

Wissen vernetzen. Zukunft gestalten.

Seit über 50 Jahren organisiert vivis Fachkonferenzen und veröffentlicht wissenschaftliche Tagungsbände sowie Fachbücher zu den Themen Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Energie- und Rohstoffwirtschaft, Umwelttechnik und Nachhaltigkeit.

Wir verstehen uns als Plattform für den Wissenstransfer zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Verwaltung.

Unsere Publikationen

Das Angebot umfasst E-Books, gedruckte Fachbücher, sowie ein digitales Archiv.

Unsere Konferenzen

BKAWE
Berliner Konferenz Abfallwirtschaft und Energie

BKK
Berliner Klärschlammkonferenz

BKMNA
Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle

BKM
Berliner Konferenz Metallkreisläufe

Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH
Dorfstraße 51
D-16816 Nietwerder
konferenzen@vivis.de
https://vivis.de

Nutzen Sie gerne unsere Konferenz-App – dies ist auch über den Browser möglich

English Abstracts



Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband





Die österreichische, **unabhängige Expert:innen-Plattform** für **Wasser-, Abwasser-, Abfall- und Kreislaufwirtschaft**

www.oewav.at

Folgen Sie uns auf LinkedIn

zukunft SEIT 1909 denken

How do megacities tackle their waste problems?

Kerstin Kuchta
Hamburg University of Technology (TU Hamburg), CREM Institute, Hamburg, Germany

Waste management in megacities faces a wide range of interlinked challenges. Population growth, urbanisation, rising consumption, inadequate infrastructure, financial constraints, low recycling rates, and environmental and climate impacts make the implementation of sustainable waste management considerably more difficult. To tackle these problems in the long term, investment in modern waste disposal systems, greater promotion of the circular economy, an effective legal framework and the active participation of the public are required. Against this backdrop, examples of implementations with varying degrees of success are outlined. Particular attention is paid to the organisation of waste management in high-rise buildings and hyper-densely populated areas.

The term ‘mega-city’ refers to a particularly large and densely populated city or urban agglomeration. According to the traditional definition, a mega-city is one with a population of five million or more, or a minimum population of ten million. This definition is used by the United Nations (2025) and serves as an internationally recognised benchmark for distinguishing mega-cities from other types of urban settlements. Further attempts at definition focus on minimum population density, which has been set at more than 2,000 inhabitants per square kilometre. Mega-cities are the result of an ongoing process of urbanisation, which has led to strong population growth in cities, particularly in developing and emerging economies.

According to estimates by the United Nations, the proportion of the world’s population living in cities will continue to rise in the coming decades. As a result, the number of megacities worldwide is also growing. This trend highlights the fact that sustainable urban planning, along with modern approaches to the circular economy and waste management, are crucial factors for the quality of life of the population and for long-term environmental and climate protection in megacities.

Waste management is one of the greatest challenges facing modern megacities. As the urban population continues to grow, the volume of solid municipal waste is also rising steadily. According to the World Bank, more than two billion tonnes of municipal waste are generated worldwide each year, with a significant proportion of this arising in urban agglomerations. Forecasts suggest that this volume will increase significantly by 2050 due to ongoing urbanisation, population growth and rising consumption. For megacities, this trend means that waste management systems are repeatedly reaching their capacity limits and must be comprehensively expanded and modernised.

In developing and emerging economies in particular, the population often grows faster than urban infrastructure. New residential areas sometimes spring up unplanned and lack adequate waste management facilities. Informal settlements, in particular, are often not connected to municipal waste management systems. Consequently, waste is frequently dumped in open spaces, in rivers or on roadsides, or burnt in the open air. These practices cause significant environmental damage and, at the same time, increase the risk of disease.

Tthe study closes with outlining strategies for addressing the growing challenges posed by high volumes of waste megacities. It describes megacities that have comprehensive guidelines, adequate investment and excellent organisations, and have thoroughly regulated responsibilities. Here, innovative processes and concepts, as well as the opportunities offered by digitalisation, are increasingly coming into focus. Other examples highlight the specific challenges faced by rapidly growing megacities that suffer from organisational and technical shortcomings, and for which the transition to a circular economy remains a long way off.

Behaviour of PFAS in municipal waste incineration – results of a large-scale measurement campaign

Daniel Wohter [1], Anna Holfelder [2], Ragnar Warnecke [3], Hans-Joachim Gehrmann [2], Dieter Stapf [2] & Peter Quicker [1]

[1)] RWTH Aachen University, Thermoprocesses and Emission Control in Waste Management and Recycling Teaching and Research Unit (TEER), Aachen, Germany

[2)] Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Technical Chemistry (ITC), Karlsruhe, Germany

[3)] GKS – Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH, Schweinfurt, Germany

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in municipal solid waste (MSW) pose a challenge for safe disposal and circular economy objectives. To investigate the behavior of PFAS in MSW incineration, a comprehensive measurement campaign was conducted at the Schweinfurt plant of GKS-Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH (GKS). Three different scenarios were investigated: the incineration of MSW as a reference scenario, the incineration of MSW mixed with PFAS-contaminated soil and the incineration of MSW spiked with PFAS-containing materials as a worst-case scenario. All input and output streams of the plant were sampled and analyzed for PFAS. As the methodological basis for detecting PFAS in thermal waste treatment plants still lacks a solid foundation, this aspect was central to the project. Therefore, a comprehensive comparison of different PFAS measurement methods for flue gas and analysis techniques for the residual materials was carried out. Special focus was also placed on the measurement of products of incomplete combustion in the flue gas (e. g. CF_4).

Analyses of the MSW indicated PFAS concentrations of 40-50 $\mu g/kg_{dry}$. However, PFAS enter the plant not only via the waste input but also through other streams. In the primary air 2-3 ng/m^3_{STP} of ionic PFAS were measured and for the scrubber process water 2 µg/L TFA and 6 ng/L of other ionic PFAS were determined.

During the PFAS spiking scenario the PFAS concentration in the flue gas was around 1-3 ng/m^3_{STP}. In comparison to the reference scenario no significant increase in the values was determined. CF_4 emissions were observed only during PFAS addition, while other products of incomplete combustion were undetectable. Concentrations of PFAS in the residues were also very low and only slightly above the detection limit. Only bottom ash values were elevated during the PFAS spiking scenario. The results of the campaign indicate a high decomposition rate of PFAS in municipal waste incineration.

For the entire plant, total fluorine-based destruction rates of > 99.9999% were determined for toxicologically relevant PFAS (excluding CF_4). Taking CF_4 emissions into account results in a destruction rate of > 99.7%. These high destruction rates confirm that municipal waste incineration acts as a sink for PFAS.

Asbestos! Testing the Limits of the Circular Economy

Roland Pomberger[1], Frank Melcher[2] & Klaus Philipp Sedlazeck[1]
[1)] Technical University Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] Technical University Leoben, Chair of Geology and Economic Geology, Leoben, Austria

Asbestos has been banned in Austria since 1990; however, the substance has not disappeared from buildings or material streams. The renovation and demolition of older buildings are bringing asbestos-containing products to light again. At the same time, asbestos may occur geogenically in natural rocks, as demonstrated by the case of Burgenland, where authorities ordered the closure of several quarries. The investigations conducted there illustrate the range spanning from the mere detection of asbestos in a material, through the potential release of fibres, to actual exposure.

This brings a key question of the circular economy into focus: How can resources be kept in circulation while health risks are consistently minimized? This issue is particularly critical for construction and demolition waste, in which asbestos may either have been intentionally added or occur as a contaminant or geogenic component. Against this background, clear, practicable, and harmonized regulations, as well as uniform limit values, are required across the entire value chain, from extraction and processing to recycling.

Circular Economy in Transition – Administrative Burden or Justified Instrument?

Tatjana Katalan
DORDA Rechtsanwälte GmbH, Vienna - Graz - Klagenfurt, Austria

The transition to a circular economy is a central objective of European environmental and industrial policy. Through the Circular Economy Action Plan (CEAP), the European Union has introduced a range of legislative measures aimed at reducing waste, improving resource efficiency and strengthening circular value chains. This paper discusses two key regulatory developments: Regulation (EU) 2025/40 on Packaging and Packaging Waste (PPWR) and Regulation (EU) 2023/1542 on Batteries and Waste Batteries. Both regulations address the entire product life cycle and seek to promote circularity through requirements relating to product design, recyclability, resource recovery and waste management.

The PPWR introduces harmonised packaging rules across the EU and requires suppliers, producers, and importers to comply with extensive conformity assessment, documentation, and record-keeping obligations. Similarly, the EU Battery Regulation establishes comprehensive sustainability requirements and strengthens extended producer responsibility by requiring manufacturers to organise and finance the collection, treatment, and recycling of waste batteries.

While both regulations create important foundations for a more resource-efficient and circular economy, they also impose significant administrative and organisational burdens on businesses. In addition, important implementation details at both European and national level remain unresolved. The paper concludes that the success of these measures will depend on clear, proportionate and legally certain implementation and raises the question whether such regulatory complexity is necessary to achieve a circular economy.

Circular economy – but how?

Wolfgang Klett[1]
[1)] Kunz Rechtsanwälte Partnerschaft mbB, Büro Köln, Germany

This paper analyses the discrepancy between political ambitions and practical reality in the implementation of the circular economy in Germany and Austria. Whilst the European Union has for years been setting out ambitious targets to promote the circular economy and has enshrined these in the revised Waste Framework Directive and the Circular Economy Act, the reality paints a different picture: the circular economy accounts for just two per cent of the EU's economic output. The transposition of EU legal requirements into national law remains incomplete, as evidenced by several infringement proceedings against Austria. In Germany, too, there are as yet no specific end-of-waste regulations for the largest waste stream – mineral substitute building materials – despite the legal framework for this is prepared in the Substitute Building Materials Ordinance.

This paper examines the national circular economy strategies of both countries. Both strategies set out targets that are only partially underpinned by specific measures. The German Advisory Council on the Environment emphasises that, whilst much of what is required in the construction sector is already technically feasible, there is a lack of economic incentives, information on the materials used in construction, and clear legal requirements.

A key analysis of barriers identifies economic and legal obstacles. Building owners show little inclination to incorporate waste into buildings, as they fear the risks posed by materials contaminated with harmful substances and future liability issues as waste producers. The waste hierarchy is not being put into practice, and even efficient recycling facilities are being shut down due to a lack of economic viability. Extended producer responsibility is being discussed as a possible solution. Taking plastics as an example, the European Commission is planning uniform end-of-waste criteria; however, strict requirements regarding the proportion of foreign material could make it more difficult to achieve end-of-waste status. The new EU End-of-Life Vehicles Regulation further illustrates manufacturers' obligation to design vehicles with a circular economy in mind and to keep components and raw materials within the circular economy.

This article sets out specific solutions. A targeted approach should focus on the largest volume of waste – namely mineral construction waste, which accounts for around half of the total waste generated in Germany. To date, recycled building materials have only met around one-tenth of the total demand for aggregates. The public sector could play a decisive role in setting an example. Public construction accounts for two-tenths of the total construction volume, whilst the federal government's commercial construction volume accounts for merely one-third of that. Under Section 45 of the Circular Economy Act (KrWG), public authorities are obliged to give priority to materials produced in accordance with the principles of the circular economy when procuring materials. Transferring this obligation from the federal government to the Länder and local authorities could open up the remaining two-thirds of public construction to the circular economy. Furthermore, this obligation should be reinforced by enforceable claims on the part of manufacturers of products made from secondary raw materials.

The conclusions of this article call for a fundamental shift in thinking. It is not enough to think in terms of waste when it comes to recovering secondary raw materials. Thinking in terms of cycles must begin where materials are introduced into the cycle, namely during the manufacture of products. Economic incentives alone are crucial to success. The article illustrates this using the example of a shift in mobility patterns: instead of buying cars, users could purchase a mobility service. The car manufacturer would then have a vested economic interest in ensuring that the vehicle remains roadworthy in the cycle for as long as possible, a factor that would be taken into account right from the product design stage, including its durability, reparability and sustainable recycling. The law must then adapt to these economic developments.

Back to the Future – Reverse Logistics as a Key Instrument of the Circular Economy

Thomas Enderlein[1]
[1)] Kunz Rechtsanwälte Partnerschaft mbB, Office Köln, Germany

This article examines the legal classification and significance of reverse logistics as a key instrument of the circular economy. Whilst traditional logistics focuses on forward-flowing material streams, reverse logistics refers to all processes associated with returning substances, materials, products and information back to the starting point of the value chain. It encompasses both internal processes – such as take-back, sorting and checking for reusability – and external processes – such as collection, transport and documentation of return routes.

An analysis of the current provisions shows that, historically speaking, the German legal framework is geared towards linear value chains (‘cradle to grave’) and does not meet the requirements of circular economy concepts (‘cradle to cradle’). The relevant areas of law – in particular product liability, including under the Circular Economy Act, the Packaging Act, the Electrical and Electronic Equipment Act, and Transport and Freight-forwarding Law – have so far been considered in isolation and show a clear discrepancy with the requirements of reverse logistics. Product liability is primarily based on regulatory requirements, whilst rigid take-back quotas, locally limited return obligations and documentation requirements designed for analogue processes have so far failed to take flexible and efficient logistics concepts into account.

This article sets out five key principles for designing reverse logistics processes: Distinguishing between products and waste is crucial for determining the applicable legal framework;

- product responsibility begins as early as the product development phase, for which cooperation between the stakeholders involved is essential.
- Digitalisation and transparency are key factors for success.
- Liability risks associated with reverse logistics can be minimised through careful planning and documentation.
- The recommendations emphasise the need to take legal requirements into account at an early stage and to build up specialist expertise and appropriate structures.
- Companies are urged to consider future take-back processes as early as the product development phase, to invest in partnerships and to utilise digital technologies to ensure seamless traceability of material flows.

In conclusion, the article highlights that reverse logistic introduces a new dimension to logistical tasks: it is a strategic tool for sustainable business models and a key prerequisite for fulfilling product responsibility within the framework of the circular economy model.

The Circular Economy Needs a Landfill Ban

Werner Bauer
WtERT Germany GmbH, Munich, Germany

Under Directive (EU) 2018/850—which amends the Landfill Directive 1999/31/EC—up to 10% of the total volume of untreated municipal solid waste may be landfilled by 2035. However, in many Eastern European countries, there is no end in sight to landfilling 10 years before the deadline - making it difficult to monitor reductions. In the environmental policy debate, pursuing the goal of a circular economy is a priority. The Circular Economy Action Plan (CEAP, 2020)—as a central operational program—includes measures related to design, production, consumption, waste prevention, and secondary raw materials. The introduction of the Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) aims to improve the durability, reparability, and recyclability of products. Greater producer responsibility is to be leveraged to finance a societal transformation. Instead of relying on planned obsolescence, producers should earn revenue through the longevity of their products. New business models are needed. The most significant momentum is currently being generated by the preparation of the Circular Economy Act 2026. The planned “Circular Economy Act” (CEA, 2026) aims to create a unified single market for secondary raw materials, thereby strengthening demand for recycled materials and doubling the EU circularity rate from the current ~12% to 24% by 2030. A look at the current figures and the challenges facing the recycling industry highlights the obstacles to achieving these goals. As long as the extended producer responsibility remains limited- or, in Germany, has not even been properly defined - and 25% of municipal waste in the EU is still sent to landfills, proposals for a new approach must be discussed with both the legislative and executive branches. Before this development has even the slightest chance of becoming a reality, we must strive every day to communicate honestly about the potential for social change and base the necessary changes to the circular economy on the reliability of a landfill ban or similar measures.

In the Name of Nature Conservation

Martin Eisenberger
Eisenberger & Offenbeck Attorneys at Law, environmental Law, Graz, Austria

30 years ago, a particularly protected bird prevented the expansion of a federal road. As a consequence, the survival of this species in the Enns valley was possibly ensured, but it is certain that the prevention of the expansion of the route near the Enns claimed the lives of more than 50 people who died in traffic accidents on the old federal road. In the last 30 years, nature conservation has become an important component of maintaining a functioning environment; unfortunately, this matter has increasingly been misused in recent times for ideological reasons to prevent infrastructure projects, industrial and commercial facilities, and waste disposal plants. Whether this always happens for the benefit of humans is questionable.

Now environmental protection is undoubtedly an important piece of the puzzle to ensure the survival of the human species on planet Earth. However, nature conservation is only a tiny part of this puzzle. Followers of this substitute religion regularly portray the FFH Directive and the nature conservation laws based on it as if the survival of our species, or even the entire planet, depended on saving a beetle, a butterfly, a lizard, or the Crex Crex, which became sadly famous at least in the Enns valley, in exactly the area where something is to be created for the benefit, but also for the protection, of humans.

The belief in nature conservation, and this danger is every religion exposed to, has recently also repeatedly turned into extremism. Then hands, feet, or the gluteus maximus are glued to streets or chained to trees in a way bordering on self-mutilation. Combined with the clamor in public, preferring to suffer oneself or even die rather than allow harm to be done to animals and plants. The rule of law is doubted when it opposes one's own views, but exploited to the extreme when it can be used to enforce belief.

The human species has survived so far not because it has prevented everything, but because it has created prosperity through progress. And progress means change and therefore transformation. Without change, we would still be living in caves and in trees, there would be no cultural landscapes, and many of the wonderful natural beauties would not exist on this Earth without our intervention. The question must be allowed to be asked whether it is more important to preserve human prosperity, to have electricity for heating and lighting, or even to save human lives, or instead to maintain the habitat of an animal at a very specific location. Every rational person who truly cares about the preservation of their species does not need to think long about this question.

The challenges of the new EU End-of-Life Vehicles Regulation for the recycling industry

Peter Hodecek
Vice President of Recycling Europe, Brussels

As early as 13 July 2023, the European Commission (COM) presented the draft of a new version of the European legal framework for end-of-life vehicles. The new regulation is intended to replace the more than 25-year-old Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles (ELVs) and to make the entire life cycle of vehicles more sustainable through stricter recycling and design requirements (e.g. in the form of mandatory minimum recycled content for certain materials used in vehicles) and to regulate the export of end-of-life vehicles.

A provisional agreement was achieved on 18 June 2026 between the European Parliament and the Council on the Commission's proposed Regulation on End-of-Life Vehicles, covering the design, production and end-of-life treatment of vehicles. Intensive negotiations lasted more than two years.

Key points of the new EU End-of-Life Vehicles Regulation are:

1. Gradual extension of the scope of the regulation to include trucks, buses and motorcycles in addition to the vehicles currently covered - passenger cars (M1) and light commercial vehicles (N1),
2. Design and recycling: Manufacturers must design vehicles in such a way that they are easier to dismantle,
3. Introduction of the first binding European targets for the share of recycled plastic in vehicles in order to increase the demand for recyclates: At least 25% of plastics used in vehicles must be from recycled material (after 2036), and 20% of that share must come from ELVs),
4. In the future, the basic principle will apply that a vehicle must be considered an end-of-life vehicle (= waste) if it is irreparable. Criteria for this are listed in Appendix 1,
5. Improved treatment standards for end-of-life vehicles to enable the recovery of more and higher quality materials and
6. Extended Producer Responsibility.

The final text of the new EU End-of-Life Vehicles Regulation surprisingly includes the introduction of quality requirements for recycled steel and aluminum, which were not included in the negotiating mandate of the Council or the European Parliament, and that are outside the scope of a technical and economic impact assessment. Detailed quality requirements are usually embedded in industry specifications or standards, which are more suitable for technical adaptations than by setting binding standards in a regulation applicable throughout the Union, particularly those affecting the internal market.

Recent Developments in Environmental Impact Assessment for the Waste Management Sector

Christoph Cudlik & Patrick Petschinka
Schoenherr Attorneys at Law, Vienna, Austria

Environmental Impact Assessment (EIA) has become a key strategic issue for waste management projects in Austria. It is no longer merely a question of whether a project exceeds an abstract statutory threshold. In practice, the applicability of the Austrian Environmental Impact Assessment Act (EIA Act) can determine how a project is designed and permitted, how long the permitting process will take, and which participation rights must be considered.

This is particularly relevant for the waste management sector. The EIA Act covers several categories of waste-related projects, including landfills, treatment facilities for hazardous and non-hazardous waste, and waste storage facilities. In addition, complex or multifunctional waste management projects may also fall within other project categories under the EIA Act, making the initial legal classification of the project particularly important. Depending on the type and capacity of the project, these facilities may be subject to a full EIA procedure, a simplified EIA procedure, or an individual screening assessment. The question is not limited to new large-scale projects. Modifications and extensions of existing treatment plants and landfills may also trigger EIA obligations, especially where capacity increases accumulate over time.

A further practical challenge arises from the assessment of cumulative effects, commonly referred to in Austrian practice as *Kumulationsprüfung*. Even if a proposed project remains below the statutory threshold on a stand-alone basis, an EIA obligation may still arise where the threshold is reached together with other projects in the surrounding area. Recent case law of the Austrian Supreme Administrative Court has significantly broadened the circumstances in which different projects may have to be considered together, including cases where statutory thresholds are expressed in different units but can be converted by using an appropriate factor. In parallel, the European Commission has initiated infringement proceedings against Austria concerning the transposition of cumulation provisions, and a reform of the EIA Act is currently under negotiation.

For project developers and operators in the waste management sector, these developments create both risks and strategic considerations. EIA-related risks should therefore be assessed at an early stage, starting with project classification and continuing through site selection, project structuring and the development of the permitting strategy. A proactive assessment, including the use of the determination procedure (*Feststellungsverfahren*) under the EIA Act where appropriate, can help obtain early legal certainty, identify cumulative risks, avoid procedural surprises and improve planning certainty in the permitting process.

Impacts of the amendment to the Austrian Ordinance on Occupational Exposure Limits (GKV) on recovery-oriented building deconstruction

Uliana Moroz[1], Arne M. Ragossnig[1] & Simon Muralt[1]
[1)] RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Vienna / St. Veit a. d. Glan, Austria

One of the main objectives of the RBV (Recyclingbaustoffverordnung / Recycling Building Materials Ordinance) is to improve the suitability of demolition waste for the production of recycled building materials by removing hazardous pollutants. Regarding the hazardous pollutant potential, asbestos is particularly relevant in recovery-oriented building deconstruction in connection with safety at work and the associated legal requirements of the GKV 2025 (Grenzwerteverordnung / Ordinance on Limit Values).

A critical regulatory shift in the GKV 2025 is the reduction of the technical guidance concentration (TRK) for asbestos to 10,000 F/m³, with a further already confirmed decrease to 2,000 F/m³ scheduled for December 21st, 2029. Crucially, this amendment abolishes the previous threshold of 15,000 F/m³ for "occasional low-level exposure". As a result, specific activities that were formerly exempt from asbestos notification towards the labor inspectorate under this threshold have been eliminated. Consequently, the regulatory framework for tasks critical to recovery-oriented building deconstruction is undergoing a fundamental shift. Activities previously classified as low-exposure now mandate rigorous, case-by-case evaluations alongside metrological verification of the TRK value. Given that recovery-oriented deconstruction of asbestos-contaminated buildings involves frequent operations that routinely fail to meet the strict criteria for short-term or occasional work, applying such regulatory exemptions has become virtually impossible under the current legal framework.

Compliance with current and future, increasingly stringent exposure limits, is legally unfeasible without establishing negative-pressure decontamination enclosures. Consequently, metrological verification through mandatory clearance measurements will gain critical importance, fundamentally shifting project cost structures for these types of decontamination measures. Beyond core remediation expenses, projects will face substantial supplementary expenditures driven by intensified monitoring and expert assessment services.

Eco-Modulation and Recyclability in the Austrian Single-Use Deposit Return System – Circular Economy from Theory into Practice

Monika Fiala[1], Katharina Reuck[2] & Stephan Kern[3]
[1)] EWP Recycling Pfand Österreich gGmbH, Management, Vienna, Austria
[2)] EWP Recycling Pfand Österreich gGmbH, Audit & Quality Management, Vienna, Austria
[3)] wpa Beratende Ingenieure GmbH, Managing Director / Project Management, Vienna, Austria

Under § 10(2) of the Austrian Deposit Ordinance (Pfandverordnung), the central body of the Austrian single-use deposit return system (EWP) is required to differentiate producer fees according to ecological criteria. At Union level, this eco-modulation obligation follows from Art. 8a(4)(b) of Directive 2008/98/EC and Art. 6(8) of Regulation (EU) 2025/40 (PPWR), whose implementing delegated acts are not expected before 2028. This paper closes the resulting gap with a practical model: each registered packaging type is assessed component by component (main body, closure, label) on the basis of objectively measurable parameters across the dimensions sorting, recycling at scale and recycling; the benchmark is the measured performance of the actual sorting plant together with the EN 18120 series, complemented by a volume-class-specific material-input benchmark. The mass-weighted overall score yields a performance class (A–D) that triggers a surcharge on the producer fee, thereby creating an economic incentive for recycling-friendly packaging design.

Adjustment of participation fees for collection and recycling systems based on the product passport

Walter Hauer
[1)] Technisches Büro HAUER Umweltwirtschaft, Langenzersdorf, Austria

For electrical and electronic equipment, information regarding design, materials used, repair and recycling is increasingly becoming mandatory. This information could serve as the basis for charging collection and recycling companies fees that vary according to the products' residual value and recyclability. Experience shows that even small financial incentives can very quickly lead to the desired adjustments in product design. This would require appropriate organisational arrangements, a central database containing product information, and a central framework for bonuses based on appropriate design. Despite the high complexity of the various electrical and electronic devices, the product passport provides sufficient information to apply such adjustments to participation fees (eco-modulation) and thereby brings about changes in product design. A central body is needed to collect and provide the relevant information and to specify which bonuses products receive for which measures. The operational activities relating to financial settlements, as well as collection and recovery, could remain with the collection and recovery systems. It would be a shame if the information provided by manufacturers in the product passports were not used for steering measures to encourage more environmentally friendly product design.

Simply wasted

Torben Kraffczyk
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Österreich

The European circular economy is facing a critical transformation phase, in which regulatory ambitions, economic interests, and market consolidation increasingly shape the future of the recycling sector. Small and medium-sized recycling companies (SME) in Germany and Austria are particularly affected by rising regulatory requirements, capital-intensive technological developments, increasing competition for valuable material streams, and structural challenges such as skilled labor shortages and succession issues. While traditional strengths such as regional expertise, customer proximity, and operational flexibility remain important, they are no longer sufficient to ensure long-term competitiveness. The next five to ten years will therefore represent a strategic turning point for the recycling SME sector. Sustainable growth will require innovation, digital transformation, investment capacity, and new forms of cooperation. Strategic partnerships, alliances, and mergers offer opportunities to combine expertise, share investment risks, and strengthen regional market positions. The future success of the recycling middle market will depend on its ability to balance ecological responsibility with economic competitiveness to actively shape the ongoing transformation of the circular economy.

Circular Economy Rights for Secondary Raw Materials!

Christine Bertl[1]
[1)] University of Applied Sciences Technikum Wien, Chemical Engineering and Ecotoxicology, Vienna, Austria

In view of pressing global crises and the finitude of natural resources, a profound shift in thinking toward a circular economy has already begun. However, this shift is currently significantly hindered by the regulatory and economic disadvantages that secondary raw materials face compared to primary resources. This paper identifies a critical gap in existing national and EU-wide legal frameworks and proposes the concept of "Circular Economy Rights for Secondary Raw Materials!" as an impulse to equip these materials with specific legal privileges. The ultimate objective is to make circular material flows more attractive and to ensure legal recognition for the inherent value of these materials. Based on visions of a universal declaration of material rights and service-oriented business models, such as "Material as a Service," the discussion addresses the fundamental shift from ownership to usage rights as well as the implementation of continuous producer responsibility. A central lever for this transformation is the further development of waste legislation toward a material-based approach, supported by transparent and practicable end-of-waste criteria. By incorporating the Safe and Sustainable by Design (SSbD)-Concept, the European Ecodesign Regulation and the Digital Product Passport (DPP), the paper demonstrates how secondary raw materials can be legally privileged to sustainably strengthen resource efficiency and global competitiveness.

Waste Management as a Driver of the Circular Economy Three Socratic Dialogues on Interpretive Authority

Ulrike Gelbmann[1], Martina Zimek[1] & Josef-Peter Schöggl[1]
[1)] Department of Environmental Systems Sciences, University of Graz, Austria

This paper explores the role of waste management in Austria's transition to a circular economy and examines who has the authority to define the concepts of waste and circular economy. Rather than treating these as purely technical issues, the authors argue that they are shaped by political, economic, and societal values. To investigate the competing perspectives, we apply a sociological discourse analysis and presents preliminary findings through three fictional Socratic dialogues representing the waste management sector, public administration, and civil society.

The first dialogue presents the perspective of the waste management industry, which views the circular economy primarily through the lens of recycling and technological innovation. From this standpoint, waste is considered a valuable resource that can be recovered through efficient collection, sorting, and recycling processes. Although the industry acknowledges that waste prevention is important, it regards this responsibility as belonging mainly to consumers, manufacturers, and policymakers rather than waste management companies themselves.

The second dialogue focuses on policymakers and public authorities. Their role is to create legal frameworks, define when materials become waste, and regulate recycling and waste prevention. The paper highlights that governments act as mediators between economic interests, environmental goals, and societal expectations. Consequently, public policy views the circular economy as a combination of regulation, technological solutions, and stakeholder cooperation rather than a single fixed concept.

The third dialogue reflects the perspective of civil society and environmental NGOs. These actors argue that a genuine circular economy should prioritize waste prevention over recycling by promoting durable, repairable, reusable, and refurbished products. They criticize an excessive focus on recycling, claiming that it may create the illusion of sustainability while failing to address overconsumption and unsustainable product design. According to this view, the circular economy is fundamentally an ethical and cultural concept rather than merely a technical one.

The authors conclude that each stakeholder defines the circular economy differently: the waste management sector emphasizes material recovery, policymakers focus on regulation and governance, and civil society prioritizes waste prevention. No single perspective is sufficient on its own. Instead, achieving a truly sustainable circular economy requires collaboration among all stakeholders throughout the entire product life cycle. The paper argues that recycling is an essential component but cannot by itself create a circular economy. Long-term success depends on integrating technological innovation, effective policies, responsible product design, and changes in consumer behavior. Austria already has a well-developed waste management system, but further progress will require stronger cooperation of industry, government, and society.

Littering in Austria 2025: Nationwide Waste Quantities and Composition

Peter Beigl[1], Benedikt Vay[1], Gudrun Obersteiner[1], Victoria Menedetter[2], Christian Pladerer[2] & Gerhard Fritz[3]
[1)] Institute of Waste Management and Circular Economy, BOKU University, Vienna, Austria
[2)] pulswerk GmbH, Vienna, Austria; [3)] FHA GmbH, Vienna, Austria

Article 8 of the Single-Use Plastics Directive (2019/904/EU) requires producers of certain single-use plastic items to cover the costs of cleaning, collecting and transporting littered waste and waste from public waste bins, within an Extended Producer Responsibility (EPR) scheme. Representative data on this waste stream, previously unavailable for Austria, are required for reliable cost allocation. Commissioned by VKS GmbH, a consortium of BOKU University, pulswerk GmbH and FHA GmbH conducted Austria's first nationwide, representative survey, sorting analysis and extrapolation of littering quantities and composition (October 2024 to May 2025), covering public waste bins, manual and mechanical sweeping, and voluntary litter picking. A stratified random sample of 91 municipalities was surveyed (88% response rate) and sampled for sorting analyses comprising 148 samples totalling 3,105 kg.

The extrapolation yields a nationwide littering quantity of approximately 91,000 tonnes per year (± 15 %): 83 % from public waste bins, 16 % from manual sweeping and 0.7% from voluntary litter picking; cities account for 75 % of the total. The mass share of SUP-relevant fractions ranges from 7% to 10%, the volume share is considerably higher, at 22 % to 34 %. Beverage containers subject to a future deposit dominate, followed by bags and film packaging ≤400 g, beverage cups and food packaging ≤400 g; cigarette butts account for the largest item share per pieces (around 60 %) but only a small mass share, due to their low unit weight.

This study provides Austria's first robust, nationwide dataset on littering quantities and composition, forming a basis for stocktaking, planning collection infrastructure and cost allocation under extended producer responsibility. Littering is dominated by cities and public waste bin collection; SUP-relevant fractions, despite their small mass share, are highly relevant in practice given their volume and visibility in public space. Repeated surveys and further analysis of SUP fractions for eco-modulation of producer fees are recommended.

Innovative strategies for increasing the recycling rates of bulky waste

Robert-Balthasar Wudtke[1], Simon Ballüer[1], Yuwei Chang[1], Sreekar Babu Malli[1], Sangit Kadu[1] & Jantje Samtleben[1]
[1)] Nordhausen University of Applied Sciences, Thuringian Innovation Centre for Recyclable Materials (ThIWert), Germany

The SeRo.inTech research group is a project funded by the State of Thuringia and co-financed by the European Social Fund Plus (ESF+). It focuses on bulky waste, mixed construction waste, and textiles within circular economy principles in the Free State of Thuringia. Nordhausen University of Applied Sciences is responsible for the bulky waste sub-project. In 2024, Thuringia generated about 80,000 tonnes (38 kg per capita) of bulky waste, with only 15% recycled, 65% incinerated, and 20% landfilled. Despite containing valuable secondary raw materials such as wood, metals, and plastics, recycling rates remain low due to high material heterogeneity and composite content, meaning there is considerable potential for optimization. The project develops practical solutions with regional and national companies using technologies available at Thuringian Innovation Centre for Recyclables (ThIWert). It aims to improve material-specific collection, sorting, and processing to increase efficiency and recycling quality of secondary raw materials, while also assessing decarbonization potentials. The research project covers six key areas: the collection, mobilization, processing and recycling of materials; economic and legal analysis; and an examination of decarbonization issues. By focusing on these key areas, the study aims to improve recycling rates and circular economy performance to support decarbonization strategies in the bulky waste sector.

Turning organic urban waste into bioplastics and single-cell protein by gas fermentation

Maximilian Lackner[1], Charles Moritz[1], Philipp Zanaschka[1], Michael Stadlbauer[1] & David Drew[1]
[1)] CIRCE Biotechnologie GmbH, R&D, Vienna, Austria

Urban areas generate large quantities of organic waste, which is typically valorized through composting, anaerobic digestion, or energy recovery. Gas fermentation offers an alternative route to convert waste-derived methane into higher-value products such as single-cell protein (SCP) and bioplastics. In this work, several methanotrophic strains were evaluated for SCP production and benchmarked against *Methylococcus capsulatus (Bath).* Particular attention was given to strain selection, cultivation stability, and the use of methanol-scavenging microorganisms in co-culture. One newly identified strain, termed V1, achieved sustained biomass productivities of approximately 5 $g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$ during continuous cultivation and maintained stable operation for more than one month. Biomass was successfully recovered and converted into a spray-dried SCP powder, which is currently being evaluated for food and feed applications. A coupled gas fermentation concept is also presented, where CO_2 generated during methane oxidation is supplied together with renewable hydrogen to a second fermentation stage for additional product formation. This approach increases overall carbon utilization and offers the potential for the production of additional SCP and polyhydroxyalkanoates (PHA). The results demonstrate that methane-based gas fermentation can convert waste-derived carbon streams into valuable protein products while contributing to a circular urban bioeconomy.

Composting trials of certified degradable plastics - Comparison of rotting conditions in mesh bags compared to open windrow composting

Christian Zafiu[1], Benedikt Vay[1], Maximilian Straka[1] & Erwin Binner[1]
[1)] BOKU University, Department of Landscape, Water and Infrastructure, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

Compostable plastics are made from biodegradable polymers that can be degraded quickly under controlled conditions. In addition to tests on the mineralization behavior on a laboratory scale, in which the plastics must be degraded to more than 90 % after 6 months, fragmentation studies are also carried out on a pilot scale or under practical conditions. Plastics must meet the condition that less than 10 % of the originally used mass disintegrates into fragments > 2 mm within 3 months. Under industrial conditions, such proof requires a large amount of material to ensure a reliable recovery rate. To reduce the amount of material and reduce the scale of investigation, the plastics are often installed in mesh bags to be able to locate them again after the treatment time and to check their fragmentation behavior. The separation of the material by the mesh bags represents a barrier for the exchange of moisture and microorganisms, especially since the material is not turned (homogenized) into bags and cannot mix with the rest of the windrow. Therefore, it is unclear whether the results from degradation investigations with mesh bags can be transferred to the degradation behavior in the windrow or alternative test setups must be developed.

In the present work, rotting materials in mesh bags were treated in a composting plant that carries out open windrow composting according to the Austrian state of the art. The rotting material in the mesh bags and that from the windrow were examined for parameters that indicate the rotting conditions and the rotting status of the material in order to draw conclusions about the significance of such test results for degradation tests.

Tsunami or the Perfect Wave? How EU Textile Legislation Creates New Opportunities for Sustainability and Innovation

Andreas Bartl[1]
[1)] TU Wien Institute of Chemical, Environmental & Bioscience Engineering, Vienna, Austria

The European textile sector is undergoing a profound transformation driven by an unprecedented wave of new legislation. Within only a few years, the European Union has introduced the EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles, mandatory separate collection of textile waste, the Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR), the Digital Product Passport, and mandatory Extended Producer Responsibility (EPR) schemes for textiles. Together, these measures represent the most comprehensive regulatory framework ever established for the textile value chain. Whether this legislative wave will trigger a "tsunami" of additional textile waste or create the "perfect wave" for a circular textile economy depends largely on how these measures are implemented.

While the new legislation is expected to substantially increase separately collected textile waste, the development of downstream infrastructure is lagging. Existing collection, sorting and reuse systems are already under considerable economic pressure due to declining textile quality, increasing volumes, volatile second-hand markets and rising processing costs. Consequently, simply collecting more textiles will not automatically result in higher recycling rates or improved circularity.

A major challenge lies in the growing complexity of modern textile products. Blended fibres, elatane-containing fabrics and increasingly sophisticated textile constructions require additional preparation for recycling between sorting and the actual recycling process. Mechanical, chemical and biotechnological pre-treatment technologies are essential for generating homogeneous material streams suitable for high-quality fibre-to-fibre recycling. Sorting technologies can identify and separate material fractions, but they cannot resolve complex fibre blends. Efficient interfaces between collection, sorting, preparation for recycling and recycling therefore become a key prerequisite for future circular systems.

Beyond technological challenges, the availability of stable markets for recycled textile materials will largely determine the success of circular textile systems. High-quality recyclates often remain more expensive than virgin materials, while manufacturers require consistent quality and reliable supply. Consequently, circularity depends not only on technological innovation but also on market development and the integration of recycled materials into industrial value chains.

The paper concludes that the success of future textile circularity will depend less on increasing collection volumes than on effective material flow management, efficient interfaces along the value chain and competitive markets for high-quality textile recyclates. Only if these elements develop in parallel can the current regulatory wave become the "perfect wave" rather than a "tsunami" for the European textile sector.

Josef Ressel Centre ReSTex – an interim report

Christian B. Schimper[1], Birgit Herbinger[1], Judith Rudolf-Scholik[1], Agnes Grünfelder[1], David Lilek[1], Felice Quartinello[1,2], Jeannie Egan[1,3], Georg M Gübitz[2], Eva Sykacek[2], Andreas Mautner[2], Thomas Rosenau[3], Nika Depope[4] & Andreas Bartl[4]

[1)] University of Applied Sciences Wiener Neustadt, Josef Ressel Centre for Recovery Strategies for Textiles, Biotech Campus Tulln, Austria

[2)] BOKU University, Institute of Environmental Biotechnology, Department of Agricultural Sciences, IFA-Tulln, Austria

[3)] BOKU University, Department of Natural Sciences and Sustainable Resources, Institute of Chemistry of Renewable Resources, Tulln, Austria

[4)] TU Wien, Institute of Chemical, Environmental and Bioscience Engineering, Research Group for Particle Technology, Recycling Technology and Technology Assessment, Vienna, Austria

The recycling of blended polyester/cotton textiles represents one of the major technological challenges for establishing a circular textile economy. While polyester and cotton together account for almost 80% of global fibre production, less than 1% of textile fibres are currently recycled into new textile products. Since the establishment of the Josef Ressel Centre for Recovery Strategies for Textiles (ReSTex) in October 2023, the regulatory framework has evolved considerably. Mandatory separate collection of textile waste, the implementation of the EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles, the Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR), Extended Producer Responsibility (EPR) schemes and the recently adopted Clean Industrial Deal have substantially increased the demand for scalable textile recycling technologies.

This contribution presents an interim report after three years of research and summarises the major scientific developments within ReSTex. The interdisciplinary research programme combines expertise from the University of Applied Sciences Wiener Neustadt, BOKU University, TU Wien and industrial partners to develop complementary recycling strategies for cotton/polyester blended textiles. Research activities cover the entire recycling chain, including Design for Recycling, life cycle assessment, AI-assisted spectroscopic material identification, enzymatic fibre separation, thermomechanical recycling of recovered polyester and selective polymer dissolution.

The project has generated several key scientific outcomes. More than thirty commercial cellulase formulations were systematically characterised to identify activity profiles suitable for selective cotton depolymerisation, leading to optimized enzyme formulations, pretreatment strategies and enzyme reuse concepts that substantially improved separation efficiency while reducing process costs. In parallel, a unique reference dataset comprising more than 250 cotton/polyester textile samples with defined blend compositions enabled the development of robust chemometric and machine learning models for quantitative material identification and future AI-assisted textile sorting. The recovered polyester fraction was successfully integrated into thermomechanical recycling studies, demonstrating that contaminant control—particularly the removal of rubber components—is critical for maintaining polymer quality during melt processing.

Besides the established biotechnological recycling route, ReSTex has successfully developed a second complementary separation technology based on novel hydrophobic deep eutectic solvents (DES). This process enables selective dissolution of polyester while preserving both polyester and cotton in their polymeric state, thereby allowing high-quality fibre-to-fibre recycling of both components. Together, the presented developments demonstrate how complementary analytical, biotechnological and chemical recycling strategies can contribute to the establishment of a circular textile economy and provide the scientific basis for future industrial implementation.

Collection and sorting concepts for recyclable elastic textiles containing thermoplastic copolyester elastomers

Ricarda Wissel[1], Jasmin Roos[1] & Thomas Gries[1]
[1)] RWTH Aachen University, Institut für Textiltechnik, Aachen, Germany

Elastic textiles containing conventional elastane fibres represent a major challenge for fibre-to-fibre recycling. Since elastanes are not suitable for thermoplastic processing, they cannot be efficiently processed in thermomechanical recycling. A promising alternative is the substitution of conventional elastanes with elastic yarns made from thermoplastic copolyester elastomers (TPC), which show compatibility with textile-grade polyethylene terephthalate (PET) and therefore enable in principle a joint thermomechanical recycling. However, the successful implementation of recyclable elastic textiles requires not only suitable material innovations but also appropriate end-of-life strategies.

This study investigates collection and sorting concepts for post-consumer textiles containing TPC. A morphological chart is developed to systematically identify potential solution concepts. The parameters and respective parameter options are established based on qualitative expert interviews with 14 stakeholders representing the textile recycling value chain. The resulting concepts are discussed in a comparative manner, taking into account their advantages and disadvantages, and the preferred solution is identified.

The results indicate that integrating TPC-containing textiles into existing mixed post-consumer textile collection systems is the most suitable collection strategy. Separate collection is considered impractical because it would require additional consumer participation and significantly increase logistical effort. Following collection and sorting of reusable textiles, automated material-based sorting is regarded as essential for economically viable sorting for recycling. Near-infrared (NIR) spectroscopy is seen as the preferred sorting technology. Assigning TPC-containing textiles to the pure PET fraction would help to ensure sufficient quantities of input material for thermomechanical recycling. However, this approach depends on the reliable detection of TPC and its clear differentiation from conventional elastanes where necessary. Similar to elastanes, the identification of elastic yarns remains challenging because they are typically present in low concentrations and are often embedded within the textile structure.

Additional labelling technologies, including RFID, chemical markers, optical codes and the Digital Product Passport (DPP), are discussed as complementary solutions if NIR-based identification proves insufficient. Nevertheless, all investigated approaches involve uncertainties regarding feasibility, cost-effectiveness and the reliability of the information provided, and should therefore only be implemented if they provide a clear benefit compared with NIR-based sorting alone.

Overall, the study proposes a practical collection and sorting concept for recyclable elastic textiles containing TPC and identifies key prerequisites for its implementation. Future research should focus on the reliable detection and, if required, quantification of TPC in textile products using NIR spectroscopy.

Why Is Textile Sorting So Complex?

Annika Ludes[1], Elias Pfund[2], Tobias Dietl[3] & Bastian Küppers[1]
[1)] Stadler Anlagenbau GmbH, Process Engineering, Aachen, Germany
[2)] Stadler Anlagenbau GmbH, Digital Solutions, Altshausen, Germany
[3)] Stadler Anlagenbau GmbH, International Sales, Bottrop, Germany

High-quality recovery starts with the input stream. The quality, composition and reliability of collected materials determine the performance of sorting processes and the quality of the resulting output fractions. In lightweight packaging sorting, this principle is reflected in a comparatively mature system: collection structures, mechanical pre-treatment, sensor-based sorting, defined output fractions, regulatory requirements and established downstream markets have developed over decades. Lightweight packaging is not simple to sort, but its process logic is comparatively clear: a mixed packaging stream is separated into standardised material fractions with defined quality expectations.

Textiles differ fundamentally from this logic. A separately collected textile article is not automatically recycling input. It may still be suitable for reuse, preparation for reuse, repair or continued use as a product. Before material-based sorting can begin, textile sorting must therefore evaluate the product level: type, condition, function, marketability, colour, construction and equipment influence whether reuse or recycling is the appropriate route. Only when reuse or preparation for reuse is no longer suitable do fibre composition, fibre blends, colour, coatings and non-textile components become the central sorting criteria.

Collection systems directly shape the input quality available to sorting facilities. Higher collection volumes alone do not create recyclable feedstock. Moisture, mould, oil, odours, contamination and misthrows can reduce both reuse and recycling potential. The EU-wide separate collection of textiles is expected to increase collected quantities, but the central challenge is to generate usable, specified and marketable material streams rather than merely larger volumes.

Recycling, in turn, defines the required output. Mechanical, thermomechanical and chemical recycling routes require different levels of fibre purity, blend composition, colour separation, contaminant removal and pre-processing. A cotton-rich fraction for mechanical fibre opening is not equivalent to a polyester-rich fraction for chemical recycling. Sorting is therefore not an isolated plant function, but the link between collection and recycling. Without clear recycling requirements, the necessary sorting depth remains unclear; without defined sorting fractions, the market value of the output remains uncertain.

Textile sorting is complex because it must identify reusable articles, separate recyclable materials, remove disruptive components, serve different recycling pathways and deliver marketable qualities. Sortability directly limits recyclability. A scalable secondary raw material market for used textiles can only emerge when input quality, output specifications, quality measurement, financing models, recycling capacities and reliable demand are aligned along the textile value chain.

Textile Recycling as a Pioneer Field of the Circular Economy: Market Complexity and Practical Implementation

Eva-Maria Wurzer[1] & Herwig Pfeiffer[2]
[1)] Saubermacher Austria GmbH, Business Development Textiles, Feldkirchen bei Graz, Austria
[2)] Saubermacher AG, Research and Development, Feldkirchen bei Graz, Austria

Textiles are increasingly becoming a focal point of European circular economy policies due to rising consumption levels, declining product quality, growing textile waste streams, and the introduction of mandatory separate textile collection across the European Union from 2025 onwards. At the same time, highly visible examples such as textile waste accumulations in the Atacama Desert, Accra, and Nairobi highlight the limitations of a linear textile system and the challenges associated with global second-hand clothing markets.

This paper analyzes the textile waste market as an interaction of three interconnected sub-markets: the input market (collection and supply of used textiles), the recycling market (sorting, pre-treatment and recycling processes), and the output market (reuse channels and markets for recycled materials). The analysis demonstrates that a functioning textile circular economy must be built on two complementary pillars: reuse and recycling. While reuse remains the environmentally preferred option and has historically dominated the used-textile sector, existing second-hand markets alone will not be able to absorb the increasing quantities of post-consumer textiles in the future.

The paper argues that the strategic growth market lies in the development of sorting, pre-treatment and recycling infrastructure. The main challenge is no longer the availability of textile waste but the transformation of heterogeneous textile streams into defined secondary raw materials suitable for industrial applications. Particular attention is given to textile-to-textile recycling (closed-loop recycling), which aims to convert end-of-life textiles into new textile products, and to high-value open-loop applications in sectors such as construction, furniture, automotive and technical nonwovens.

Current market barriers include material complexity, mixed-fibre compositions, insufficient industrial recycling capacity, volatile reuse markets and limited demand for recycled textile materials. At the same time, significant opportunities arise from Extended Producer Responsibility (EPR) schemes, automated sorting technologies and growing industrial demand for sustainable raw materials. The successful implementation of textile recycling depends less on individual technological breakthroughs than on the coordinated development of collection systems, recycling infrastructure, quality standards and end markets.

A central conclusion of this paper is that investments in recycling infrastructure, know-how development and market creation must begin immediately. Delaying the establishment of recycling systems while focusing exclusively on optimizing existing reuse structures would slow down innovation, hinder the development of secondary raw material markets and ultimately limit the resource-saving potential of the textile sector. Reuse remains an essential first pillar of circularity; however, large-scale textile recycling must be established as a complementary second pillar to prevent valuable textile resources from being lost through incineration.

Textile recycling therefore represents a pioneer field of the circular economy. Its success will depend on the ability of policymakers, industry and recycling stakeholders to jointly create the technological, economic and regulatory conditions required for closing textile material loops and transforming textile waste into valuable secondary resources.

Designing an EPR System for Textiles in Austria: Interim Results

Peter Beigl[1], Astrid Allesch[1], Elisabeth Schmied[1], Andreas Bartl[2], Sebastian Rosenbusch[2] & Marion Huber-Humer[1]
[1)] Institute of Waste Management and Circular Economy, BOKU University, Vienna, Austria
[2)] Institute of Chemical, Environmental and Bioscience Engineering, Technical University Wien (TU Wien), Vienna, Austria

The introduction of mandatory separate textile collection across the EU in 2025, together with the revised Waste Framework Directive (EU) 2025/1892 (WFD), requires EU Member States to introduce Extended Producer Responsibility (EPR) schemes for textiles. Commissioned by the Austrian Ministry (BMLUK), the authors are examining the design of an Austrian textile EPR system through a status-quo analysis, an international review, a comparison of alternative system models and a stakeholder dialogue including 35 interviews and a workshop attended by more than 80 participants in June 2026. In 2024, approximately 179,000 tonnes of used textiles and footwear generated in Austria, of which only 26.5 % were collected separately. Among four EPR model variants assessed, the monopoly and competitive Producer Responsibility Organisation (PRO) models were analysed in greater depth, as the revised WFD requires the establishment at least one PRO. Centralised systems perform better in financing security and transparency, whereas competitive systems offer advantages in cost efficiency and innovation. A likely Austrian scenario would combine reuse-oriented collection with subsidies for collectors, open-loop recycling financed close to cost-recovery, simplified eco-modulation and stricter regulations for online-trade. Neither model is inherently superior; the success of an EPR system depends primarily on the quality of its design rather than on its market structure. This finding is consistent with existing models in EU. Key design options, assessed against the legal requirements include fee eco-modulation, the definition of target-fraction, collection financing mechanisms, participation rights for social economy actors, and support for research and development in sorting and recycling technologies. The future system must be financially viable even in absence of net market revenues while integrating existing collection structures. The final report is expected in autumn 2026, with key findings to be presented at DepoTech 2026.

Resource Efficiency – An Approach to Measuring

Stefan Gäth
Justus-Liebig-University Giessen, Professorship of Waste Management and Environmental Research, Giessen, Germany

Using the example of the various types of lighting—which have evolved over time—for “Christmas Eve” — candles, incandescent bulbs, LEDs — an approach to measuring resource efficiency is presented that can also be used as a tool in waste management.

Responsibility for the sustainable management of our environment is one of the central goals of companies and is repeatedly subjected to critical scrutiny during the development and refinement of our products.

Methodological framework for conducting consolidated waste analyses to verify discrepancies between the quantities of material flows placed on the market and the quantities of waste properly recovered from them

Bertram Zwisele[1] & Leonie Theresia Wachtler[1]
[1)] ARGUS Statistik und Informationssysteme in Umwelt und Gesundheit GmbH, Berlin, Germany

The goal of the project is to develop a methodological framework for regular, consolidated waste analyses to determine the material composition of mixed municipal solid waste. This is intended to provide the data required by the European Commission on plastic packaging, packaging, food waste, used textiles, and used batteries, as well as other material streams specified by the Federal Environment Agency (waste electrical and electronic equipment, biowaste in residual waste, and mixed commercial municipal waste) across various disposal pathways.

To close existing data gaps, improper disposal pathways are examined in particular, and misdisposal is quantified. The methodological framework defines relevant disposal pathways, standardized analytical methods, and technical guidelines for this purpose. Existing waste analyses are integrated as far as possible and harmonized with new studies. A standardized catalog of substance groups enables the comparable evaluation of all material flows and comparison with the quantities placed on the market. The methodological framework thus forms the basis for future baseline and follow-up studies.

Systematic selection of social aspects for the sustainability assessment of technical processes using social life cycle assessment

Theresa Angerler[1], Klaus Doschek-Held[1] & Julia Graf[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Thermal Processing Technology, Leoben, Austria

The consideration of social sustainability aspects is becoming increasingly important in the assessment of technical processes, as it contributes significantly to the social acceptance and successful implementation of innovations. In contrast to environmental and economic assessment dimensions, social aspects have so far been incorporated into technology assessment only to a limited extent in terms of methodology. This study therefore develops a systematic approach to the selection and prioritisation of social indicators based on the Social Life Cycle Assessment (sLCA). To this end, existing sLCA frameworks, international guidelines and current scientific approaches are analysed and compared. Building on the six stakeholder categories of the sLCA, an application-oriented catalogue of indicators is developed, which considers process specifications, data availability and relevance along the value chain. The aim is to develop a transferable decision-making and assessment approach that can be flexibly applied to a variety of technical processes. The methodology is being tested, by way of example, on a recycling process for the recovery of mineral waste materials. The result is a practical and transferable catalogue of indicators for the systematic integration of social sustainability aspects into the assessment of technical processes.

From Everyday Life to the Carbon Footprint: A Digital Tool and Initial Household Surveys for Climate-Friendly Consumption

Elisabeth Schmied[1], Silvia Schütz[1] & Gudrun Obersteiner[1]
[1)] BOKU University, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

The Horizon Europe CARE project aims to reduce household greenhouse gas (GHG) emissions by promoting more sustainable consumption practices, with a particular focus on food waste, clothing, and laundry. To support this objective, the CARE CO_2 Tool was developed as an open-source digital application that enables households to quantify, monitor, and reduce emissions associated with these consumption domains. Unlike general carbon footprint calculators, which typically assess a broad range of lifestyle activities, the CARE CO_2 Tool focuses exclusively on the project's intervention areas, providing a more detailed and action-oriented assessment of household behaviour.

The tool combines scientifically robust greenhouse gas accounting with an intuitive and user-friendly interface. Users record everyday activities related to food consumption, clothing purchases, and laundry habits, while the system automatically calculates the corresponding emissions using a life cycle assessment methodology based on the Product Environmental Footprint (PEF) approach. Immediate feedback is provided after each data entry, allowing users to understand the environmental impact of their actions and identify effective opportunities for emission reductions. A personal dashboard continuously visualizes cumulative savings, enabling users to track their progress over time and encouraging sustained behavioural change.

To ensure broad applicability across Europe, the CARE CO_2 Tool is available in multiple languages and incorporates region-specific emission factors that reflect national conditions. In addition to individual monitoring, the platform supports knowledge exchange through integration with the CARE community website, where participants can share experiences, successful practices, and practical solutions for reducing household emissions. The system is continuously improved through iterative development, incorporating user feedback, technical enhancements, and evaluations conducted during project pilot studies to optimize functionality, usability, and scientific reliability.

The CARE CO_2 Tool bridges the gap between scientific emission assessment and practical decision-making in everyday life. By translating complex environmental data into understandable and actionable feedback, it empowers households to adopt more sustainable consumption patterns and to document measurable emission reductions. Its targeted focus on food, clothing, and laundry addresses consumption areas that are often overlooked in conventional carbon footprint calculators despite their considerable mitigation potential. As a result, the tool provides a practical and evidence-based instrument for supporting climate-friendly household behaviour and contributes to the broader objectives of the CARE project to foster sustainable well-being while reducing greenhouse gas emissions.

Field Sampling of Textile Waste Sites in the Atacama Desert

Sebastian Rosenbusch[1], Andreas Bartl[1] & Gabriela Veronica Aguirre Martinez[2]
[1)] TU Wien, Mechanical Process Engineering and Clean Air Technology, Vienna, Austria
[2)] Arturo Prat University, Centro Andaluz de Ciencia y Tecnologia Marinas (CACYTMAR), Iquique, Chile

The global textile industry is among the most resource-intensive economic sectors, and fast fashion drives growing volumes of textile waste exported to the Global South. A striking example is the extensive illegal textile dumpsites in Chile's Atacama Desert, where unsold new goods and discarded clothing accumulate, causing ecological, health-related and resource-related challenges. This contribution presents an ongoing field study combining material characterization with ecotoxicological and atmospheric assessment to evaluate the environmental burden and recycling potential of textiles deposited there. During several weeks of fieldwork in the Tarapacá region (Iquique and Alto Hospicio), more than one ton of waste textiles as well as soil and water samples were collected and partly analyzed, using a sampling and characterization approach adapted from a comparable study in Vienna, Austria. Preliminary results show a fibre composition dominated by cotton (45%) and polyethylene terephthalate (32%), while ecotoxicity tests on textile eluates using ostracods showed no significant toxicity. Germination bioassays, soil/saltwater eluate testing, and chemical analysis of air filters for persistent organic pollutants and microplastics (with RECETOX, Masaryk University Brno) are still pending and will be reported, with a full mass balance and a Vienna comparison, in a subsequent publication.

Setting Recycling Rates: Gut Feeling versus Scientific Rationale

Helmut Rechberger & Stefani Rivic
TU Wien, Institute for Water Quality and Resource Management, Research Unit of Waste and Resource Management, Vienna, Austria

To achieve the European Union's ambitious recycling targets for plastic packaging, substantial investments are needed to improve collection, sorting, and recycling. On the other hand, the disruptions during the COVID-19 pandemic have exemplified that when crude oil prices - and thus primary plastic prices - are low, producers of recycled materials cannot compete with their products in the market. The result was overflowing interim storage facilities and a difficult economic situation for recyclers, which also led to insolvencies. Since then, the recycling industry has been calling for the introduction of a minimum content rate of recyclate (recycled content) to ensure and stimulate recyclate demand. However, the effectiveness of these measures to promote plastic recycling has not yet been studied. This paper develops an integrated modeling framework based on a material flow analysis (MFA) of the Austrian plastic packaging system. This MFA is combined with a partial economic equilibrium model to jointly model physical material flows, economic market structures, pricing mechanisms, and policy frameworks within the plastic packaging system in Austria. By embedding empirically observed material flows into an economically consistent macroeconomic context, the model bridges an important knowledge gap between the physical world of waste and abstract economic modeling approaches. It is interesting to note that the relatively simple MFA results in a highly complex mathematical-economic model. The strictly mathematical description of real-world relationships (e.g., licensing fees) makes it clear that setting an optimal minimum recycled content requirement would require knowledge of more than 20 parameters (prices, flow rates, functional form parameters) and a multitude of cost and profit functions. The developed model was validated using real-world data and can now be used to test various scenarios. It thus enables a systematic and analytical evaluation of policy instruments designed to promote a circular economy for plastic packaging. Compared with empirical findings in the literature, the model delivers robust results and replicates observed market behavior very accurately. The analysis further shows that a mandatory minimum recycled content rate is insufficient to achieve the desired economic and environmental goals. In particular, such a regulation does not have the expected stimulative effect on the recycling industry and therefore does not effectively promote higher recycling rates. The methodology developed here shows that recycling rates and similar targets need not be set arbitrarily; instead, models can be developed to test the effects of various options and combinations, thereby deriving scientifically grounded, evidence-based recycling targets.

Solid Waste Analyses as a Contribution to Circular Economy

Victoria Menedetter[1] & Christian Pladerer[1]
[1)] pulswerk GmbH, Kreislaufwirtschaft und Abfall, Vienna, Austria

Waste analyses are a key instrument of modern waste management and provide the essential data foundation for evidence-based decision-making. By systematically examining the material composition of waste streams, it becomes possible to determine the proportions of individual fractions, identify improper sorting (contaminants), and uncover both recovery potentials and opportunities for process optimization across the entire system. The results support municipalities, waste management associations, and companies in evaluating, improving, and further developing collection, treatment, and recycling systems. In addition, they provide a solid basis for implementing targeted measures in line with the principles of the circular economy, helping to increase resource efficiency and reduce environmental impacts. Reliable, comparable, and meaningful results require standardized sampling and sorting procedures, as well as carefully quality-assured analysis and evaluation methods. Only under these conditions can waste composition studies serve as a robust basis for long-term monitoring and strategic planning. For many years, pulswerk has been conducting standards-compliant waste analyses across a broad range of waste streams, including residual waste, separately collected recyclables, commercial waste, bulky waste, and littering waste. The results are prepared in a structured format and provided as part of formal reporting, thereby creating a transparent and robust basis for strategic and operational decision-making in waste management.

Austrian Carbon Management Strategy

Markus Lehner
Technical University of Leoben, Chair of Process Technology and Industrial Environmental Protection, Leoben, Austria

This contribution synthesizes the core elements of Austria's 2024 Carbon Management Strategy, which establishes a framework to address hard-to-abate greenhouse gas emissions on the pathway to net zero, emphasizing the urgent need for a coherent regulatory environment, targeted R&D, and initial public support to enable timely deployment of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) and carbon dioxide removal (CDR) options 1. Even under ambitious transition scenarios, Austria is not projected to reach zero emissions by 2040 without additional measures; a progressive estimate indicates about 14.8 Mt CO_{2eq} of residual emissions, while a more optimistic assessment still foresees roughly 11 Mt CO_{2eq} in 2040, underscoring the necessity of CCUS and negative emissions to close the gap. The government strategy therefore proposes a phased approach: first establishing the legal foundations, then building infrastructure and implementing measures.

Potential measures in the field of carbon management can be categorized into CO_2 removal, utilization, and storage. Carbon Dioxide Removal (CDR) is defined as anthropogenic activities that remove CO_2 from the atmosphere and store it durably in geological, terrestrial, oceanic reservoirs, or in products; technical pathways (tCDR) include DACCS, BECCS, enhanced weathering, mineral carbonation, and biochar, while natural CDR (nCDR) focuses on strengthening ecosystems as carbon sinks. Austria's natural CDR priorities include enhancing carbon storage in land use and forestry (LULUCF) with a linear target from 2026 to increase net storage by about 880,000 t CO_{2eq} by 2030 relative to 2016–2018, while addressing climate risks to these sinks through resilience-enhancing land and forest management. To guide prioritization, the strategy highlights evaluation criteria across storage capacity, technological readiness, scalability, current and future costs, environmental impacts, energy demand, and space requirements, and calls for further research to clarify each option's potential contribution.

For Carbon Capture and Utilization (CCU), innovation, learning curves, and scale effects are pivotal, supported by a national pipeline system linking major point sources to storage sites or users; standardized climate-relevance assessment, resolution of missing EU-ETS accounting, and clarity on financing, operation, and liability remain critical gaps, alongside managing the high additional energy demand for capture, transport, and use. For Carbon Capture and Storage (CCS), geological storage options include domestic hydrocarbon fields and saline aquifers - though the latter are less explored - as well as sites in other European countries, with Austrian deployment of saline aquifers envisaged in the 2030–2040 timeframe and contingent on CO_2 pipeline infrastructure. Implementing CCS requires lifting Austria's current legal ban on geological CO_2 storage and fully transposing the EU CCS directive, while coordinating competing subsurface uses (geothermal, CO_2 storage, green hydrogen, synthetic methane).

Key next steps include repeal of the storage ban, establishing the legal basis for geological storage and pipeline transport, complementary reforms across the CCUS/tCDR chain, strengthened international coordination, and scenario-based national and cross-border infrastructure planning - paired with targeted R&D and public incentives to accelerate deployment in line with climate goals.

Evaluation of Aqueous Carbonation as a Valorisation Pathway of Mineral Residues for CO_2 Sequestration

Sarah Reiter[1], Sophie Zotter[1], Leo Buchegger[1] & Markus Lehner[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Process Technology and Industrial Environmental Protection, Leoben, Austria

The need for effective strategies to mitigate hard-to-abate emissions from sectors such as waste incineration and cement or refractory industry has significantly increased interest in carbon capture, utilization and storage (CCUS) technologies. Among these, mineral carbonation is considered a promising option for permanent CO_2 sequestration. During carbonation, calcium- and magnesium-bearing mineral phases react with carbon dioxide to form thermodynamically stable and insoluble carbonate minerals and thus enabling long-term CO_2 storage. Within this context, direct aqueous carbonation has emerged as a promising process route for accelerating the reaction. In this approach, finely ground Ca- or Mg-rich materials react with CO_2 in an aqueous medium, resulting in enhanced mass transfer, improved reaction kinetics, and significantly higher CO_2 uptake rates compared to conventional gas–solid carbonation routes. As various industrial residues are suitable feedstocks for the process, carbonation enables alternative valorisation pathways as permanent CO_2 sinks.

In this study, three industrial residues are investigated regarding their CO_2 storage potential uptake via aqueous carbonation: bottom ash from municipal solid waste incineration (MSWI), magnesia-carbon-rich refractory residues from furnace linings, and cement bypass dust. Originating from hard-to-abate sectors, these materials represent currently underutilized mineral resources with significant availability and low competition with established utilization routes.

Aqueous carbonation experiments are conducted in a stirred batch reactor under varying CO_2 partial pressures (5 and 20 bar) and temperatures (20-100 °C). The results reveal distinct material-dependent carbonation behaviour related to differences in mineralogical composition and phase reactivity. Bypass dust exhibits the highest CO_2 uptake due to its significant content of reactive calcium-bearing phases, reaching up to 270 kg CO_2 t^{-1} of raw material. The refractory material shows a pronounced temperature dependency with increasing CO_2 uptakes from 30 to 208 kg t^{-1} when elevating the temperature from 20 to 100 °C. This is attributed to the kinetically limited magnesium carbonation at lower temperatures. Despite its heterogenous composition and high amorphous content, MSWI ash achieved a relevant CO_2 uptake potential of 80 kg t^{-1}.

Considering the annual availability of these material streams in Austria, the investigated residues correspond to a cumulative technical CO_2 storage potential of approximately 57 kt CO_2 per year. Although the specific uptake capacities vary significantly between the materials, the results demonstrate that aqueous carbonation of industrial mineral residues can contribute to future carbon management strategies via the combination of permanent CO_2 storage with the valorisation of continuously generated secondary resources.

Recycling of fine mineral fractions for use in concrete

Lina Baacke[1], Niklas Kappelt[1] & Björn Siebert[1]
[1)] Institute for Building Materials, Geotechnical Engineering, Transport and Water (IBGVW), Faculty of Civil Engineering and Environmental Engineering, Cologne University of Applied Sciences, Cologne, Germany

Recycling is becoming more important in the construction industry, especially in the building material sector. It plays a key role in protecting natural resources and reducing CO_2-emissions. Therefore, there's growing interest in potentially recyclable materials. They might be used as aggregates or as alternative binder to cement. At the Cologne University of Applied Sciences different materials are being investigated in a range of research projects to assess their suitability for use in the construction sector.

A promising alternative to cement as a binder is calcined clay. Soils of clay may arise from excavation material generated during tunnel construction. Through the process of firing the material at up to 800 °C (so called calcination), the clay minerals transform into amorphous aluminosilicates, which are known for their pozzolanic behavior. Experimental results have shown that these calcined clays can be included at moderate replacement rates without significant loss of mechanical strength and in some cases even slightly higher strength, due to granulometric effects. This approach not only reduces the percentage of Portland cement clinker necessary, but also recycles material, that would otherwise have been sent to landfill.

Another way to recycle residual materials is the usage of mineral fractions extracted from municipal solid waste incineration ash. Advanced technologies, such as electrodynamic fragmentation and precise sorting methods, make it possible to extract mineral-rich fractions that can potentially replace natural aggregates in concrete. These secondary aggregates typically have a higher water absorption and altered particle morphology compared to natural aggregates such as gravel or pebbles. While compressive strength will decrease slightly when replacing a significant proportion of natural aggregates, further optimization of mix water and admixtures can alter these effects. Some heavy metal limits for waste materials - like copper, zinc, and occasionally lead - are exceeded in the ash. It is important to say, that these contaminants do not leach out of the material, but legal hurdles still need to be addressed.

Beyond traditional cementitious binders, geopolymers - aluminosilicate-based binders that react in combination with activators by polymerization and not hydration- - are emerging as sustainable alternatives that completely avoid the use of Portland cement clinker. Using secondary raw materials from concrete demolition and fines of processed railway ballast as aggregates in geopolymer concretes has shown good performance, with generally satisfactory mechanical strengths even at higher substitution levels.

In summary, the integration of secondary raw materials - through calcined clays, processed waste incineration ashes, recycled aggregates, and advanced binder systems - represents a key strategy for enhancing sustainability in concrete construction. These approaches support broader use of recycled materials, helping to conserve resources and reduce CO_2 emissions in the building sector.

Material Trends in Mobile Phone Printed Circuit Boards: Industrial Metals Instead of Precious Metals on a Smaller Surface Area (1998–2021)

Aleksander Jandric[1], Lukas Ginzinger[1] & Stefan Salhofer[1]
[1)] BOKU University, Department of Landscape, Water, and Infrastructure; Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

In this presentation, we show the findings of an analysis of the material composition changes in Printed Circuit Boards (PCBs) from mobile phones, covering a period of years from 1998 to 2021. We mechanically disassembled and milled a total of 45 mobile phone PCBs and analysing them with a newly developed method for X-ray fluorescence (XRF). Our analysis reveals significant shifts in the physical and material properties of printed circuit boards in mobile phones encompassing the following: 1) Miniaturization of PCBs: Although the total mass of modern smartphones has increased, the size of the PCBs has decreased significantly over time. On average, the PCBs are shrinking by approx. 6.9 wt.% per year. 2) Base Metals Dominate: Three base metals, copper (Cu), nickel (Ni), and tin (Sn), constitute a large portion of the PCB mass and continue to play a critical role in both electrical conductivity and mechanical function. 3) Decline in Precious Metals: Conversely, precious metals such as gold (Au), silver (Ag), and palladium (Pd) have shown a clear downward trend in their total mass per PCB over time. These developments indicate significant shifts in materials used in the industry. The ongoing miniaturization of PCBs, along with a decline in the concentration of precious metals, highlights advancements in technology and increased cost efficiency. Meanwhile, industrial metals like copper and nickel remain important in terms of volume. However, their much lower market values compared to precious metals offer limited economic benefits for the recycling industry. Consequently, these findings must be taken into account for the future recycling strategies, evaluating the potential for material recovery from end-of-life cell phones, and estimating the resource potential of urban mines.

Non-destructive determination and sorting of supply-critical raw materials using PGNAA: A case study on waste electrical and electronic equipment (WEEE) and metal alloys

Helmut Spoo
Dr. Spoo Umwelt-Consulting, Stolberg/Rhld., Germany

The waste management sector is facing far-reaching changes. A prerequisite for a genuine circular economy is a significant increase in the reparability and reusability of products and devices. Recycling and raw material recovery must be carried out in such a way that the resulting secondary raw materials are comparable to primary raw materials in terms of composition and properties. Consequently, the efficiency and quality of the recycling process will be of crucial importance in the future. To achieve this goal—and to return raw materials, particularly supply-critical ones that have previously rarely been recovered, to the economic cycle—precise knowledge of raw material composition is essential. Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA) has been developed as a detection and sorting method that enables rapid, non-destructive, and sensitive elemental analysis. When combined with AI-driven technology, it allows for the high-quality, recovery-oriented routing of material streams. Implementing a circular approach based on the Product Mining® concept reduces dependence on countries such as China while simultaneously contributing to climate protection and energy savings.

Screwdriver seeks standard interface – Dismantling an electric vehicle in practice and reality check

Alexia Tischberger-Aldrian[1], Felix Scheidl[1], Walter Martinelli[2], Yves Radmann[2], Klemens Winkler[3], Felix Strohmeier[4] & Gerald Koinig[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] SCHOLZ Austria GmbH, Laxenburg, Austria
[3)] K1-MET GmbH, Simulation & Data Analyses, Linz, Austria
[4)] Salzburg Research Forschungsgesellschaft m.b.H, Salzburg, Austria

This study examines the practical feasibility and constraints of dismantling a battery electric vehicle (BEV) through a full, largely non-destructive teardown of an all-wheel-drive SUV with a panoramic roof, conducted after safe removal of the traction battery (625 kg). The work was undertaken within the KIRAMET project context, which targets knowledge generation for metal composite recycling and end-of-life vehicle (ELV) treatment. The study aimed to (a) quantify disassembly times, (b) comprehensively enumerate components, and (c) characterize material compositions to inform recycling and reuse pathways.

A strictly non-destructive strategy was applied where feasible, with exceptions when tools were unavailable, safety risks existed (e.g., pyrotechnic devices), or further teardown offered no additional insight. Each part received a unique ID and was assigned to standardized categories (composites, metals, plastics, electronics, liquids, textiles, glass) according to documented criteria defining manually inseparable multimaterial items as “composites” and using handheld XRF and NIR for material identification where needed. In total, 1,033 components (vehicle mass without traction battery: ~1,895 kg) were recorded, with mass dominated by composites (53.6%; 1,016 kg), followed by plastics (22.5%; 427 kg) and metals (21.7%; 412 kg). By count, plastics led (452 items; 43.7%).

The teardown was time- and resource-intensive: a complete dismantling to the level of individual components required approximately four weeks for one person at a 40-hour work week, and even targeted removal of single parts often necessitated substantial upstream disassembly to gain access—especially when preserving parts for reuse. Practical barriers included the need for vehicle- or component-specific tools and specialized equipment (e.g., for windshield removal), compact packaging in the engine bay that impeded damage-free extraction (e.g., cable cutting at the fuse box), unexpected residual fluids despite prior battery and coolant hose removal (coolant and gearbox fluid), and lack of vehicle maneuverability (no neutral/rolling function) during teardown. These findings underscore that tool/accessibility limits directly constrain reuse and high-quality material recovery potential.

The results frame implications for evolving policy and product design. The draft EU ELV Regulation envisions mandatory pre-shred disassembly of specified components (with conditional allowances for demonstrated post-fragmentation separation), and lists items that must always be removed prior to shredding (e.g., traction and starter batteries, powertrains, wiring, glazing, tires, select electronics). Yet, even with future Digital Product Passes, the physical demands of dismantling persist; design-for-disassembly features, standardized interfaces, and robust drainage/emptying procedures are pivotal enablers. Ultimately, design choices decisively shape recyclability outcomes.

Smart Waste – Process Assessment Supported by Digital Product Passes

Klemens Winkler[1], Felix Strohmeier[2] & Alexia Tischberger-Aldrian[3]
[1)] K1-MET, Area 3 – Simulation and Data Analyses, Linz, Austria
[2)] Salzburg Research Forschungsgesellschaft mbH, Intelligent Connectivity, Salzburg, Austria
[3)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

Recycling of complex metal-composite products is increasingly constrained by limited insight into product composition, fragmented data availability, and a potential mismatch in recycling output and market demand. Recent regulatory developments surrounding sustainable products and the introduction of the Digital Product Passport (DPP) provide a foundation for improved data consistency and accessibility. Building on this framework, our approach connects product-related information from DPPs with digital twins of recycling processes and a digital marketplace, enabling a predictive and market-oriented optimization of recycling outcomes. In this concept, detailed material and component data from the DPP are used to generate a digital twin of the incoming waste stream, mapping materials, alloying elements, and hazardous constituents at component and elemental resolution. By coupling this digital representation with a process twin of the recycling plant and integrating both into a marketplace where secondary raw material buyers articulate their specifications, the system can forecast the quality and quantity of potential output fractions before physical processing begins. Optimization algorithms weigh parameters such as expected market price, processing cost, and plant utilization to identify the most beneficial configuration for all stakeholders along the recycling chain.

To realize this vision, reliable and sovereign data sharing is essential. Concerns about proprietary product information from manufacturers and process confidentiality from recyclers remain major barriers, compounded by generally low digitalization within the sector and the recycling process specifically. We propose addressing these challenges in accessing the data by aligning with a standardized, interoperable data space, which provides regulatory alignment and secure and sovereign data exchange mechanisms, and creating a user-friendly Human-Machine Interface (HMI) that demonstrates clear value creation. With these enablers in place, such an integrated optimization environment can significantly enhance transparency, efficiency, and the economic viability of high-quality secondary raw materials. This will drive broader industry adoption and support Europe’s transition toward a circular product economy.

Sorting of E40 Scrap

Gerald Koinig[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1]) Technical University of Leoben, Department of Environmental and Energy Process Engineering, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

This paper demonstrates how copper-containing particles in a shredder fraction can be detected using convolutional neural networks. For this purpose, CNN-based object detection architectures were employed. The experiments showed that a computer-vision-based classification model can be trained to identify copper-containing particles. However, due to the unavoidable heterogeneity of waste particles, a large and diverse training dataset was required. After rusty particles had been incorporated into the dataset, the models achieved purities of 99.907 wt.%.

From Truck Bed to Chemistry: Benchmarking Segmentation Algorithms for Accurate Scrap Characterization in Sustainable Steelmaking

Florian Egger[1], Klemens Winkler[1], Bernard Ennis[2] & Frank Schrama[2]
[1)] K1-MET GmbH, Linz, Austria
[2)] Tata Steel, IJmuiden, Netherlands

The transition to sustainable steelmaking requires a significant increase in scrap utilization, making accurate characterization of Heavy Melting Scrap (HMS) more critical than ever. Elements such as copper and sulfur negatively affect steel quality and process efficiency, limiting the production of high-grade steels. To address this in the EU Horizon funded Project DiGreeS, we propose a method that combines im-age-based segmentation with Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) to link chemical measurements to individual scrap pieces within truck-load images. This enables piece-level aggregation of LIBS data, providing a reliable estimate of each component's chemistry rather than isolated point measurements.

A major challenge lies in segmenting contiguous pieces of irregularly shaped, visually complex scrap, where labelled datasets are scarce and manual annotation is impractical. We therefore systematically evaluated commercially available segmentation algorithms and frameworks for this task. Conventional models trained on Common Objects in Context (COCO) datasets proved unsuitable for metallic scrap surfaces, while the Segment Anything Model (SAM) delivered the most usable segmentation masks. SAM is not designed for the specific demands of HMS instance segmentation. Consequently, we applied post-processing refinements, including duplicate removal, region merging, and threshold optimization, to further improve segmentation quality. These findings demonstrate that, with targeted optimization, SAM offers a viable foundation for piece-level scrap identification and subsequent chemical characterization, marking an important step toward automated scrap analysis and enabling greener steelmaking practices.

Applying Statistical Process Control (SPC) to Sensor-Based Monitoring of Mobile Construction Demolition Waste (CDW) Streams

Luz Alejo[1], Lieve Göbbels[1], Alexander Feil[1], Karoline Raulf[1] & Kathrin Greiff[1]
[1)] Chair of Anthropogenic Material Cycles, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

Sensor-based quality assurance is still emerging in CDW processing (Müller & Martins, 2022). The scoping review by (Göbbels et al., 2025) identified 31 sensor families across 364 studies, with visual imaging (RGB, CCD*, CMOS* color cameras) and infrared spectroscopy being the most common. However, only a handful of CDW-focused works have reached Technology-Readiness Level (TRL: technology validated in relevant environment) ≥ 5, and virtually none deploy high-TRL (7–9) inline RGB cameras in the harsh, dusty, vibrating environment of a mobile plant. This gap hampers reliable upstream data for downstream sorting, classification, and process-control modules.

While sensor-based monitoring in mobile CDW plants is still at a research stage, recent studies increasingly investigate the use of RGB sensors (RGB, RGB-D and RGB-D cloud point) to discriminate material fractions before downstream crushing, screening, or sorting (Dodampegama et al., 2024). The reliability of the subsequent sorting decisions is directly linked to the quality of the raw image data entering the data-driven pipeline. A principal obstacle is the demolition-site environment itself, as fluctuating lighting conditions, dust, and mechanical vibrations directly degrade the image data feeding RGB camera-based quality monitoring systems (Göbbels et al., 2025; Su et al., 2023). When such fouled input data remains in the processing pipeline, this leads to further cascading into mis-classifications, undermining downstream sorting, robotic handling, and market-oriented CDW trading platforms (Chacón-Albero et al., 2025; Islam et al., 2024; Su et al., 2023)

This work proposes a Statistical Process Control (SPC) framework (Montgomery, 2008, 2024; Montgomery & Mastrangelo, 1991), for real-time assessment of the input-data quality, specifically, light intensity, of an RGB-camera set-up mounted on a mobile CDW unit. The objective is to (i) identify which metrics can be the most suiting to monitor light intensity in mobile CDW plants, (ii) identify control limits for this metric and detect out-of-control situations. This work aims at showing how to identify faulty data before the data are fed to the data-driven pipeline and further processes.

Smartphone-Based Deep Learning for Real-Time Quality Assessment in Glass Recycling

Cornelia Adami
Brantner Digital Solutions GmbH, Krems an der Donau, Austria

In modern recycling facilities, the precise separation of glass fractions is crucial for maintaining high-quality cullet streams and reducing contaminants. This paper presents a novel computer vision-based system for monitoring and analyzing glass recycling streams, focusing on flint, green and amber glass. Using smartphone-based image acquisition under both normal and ultraviolet (UV) illumination, samples are captured to detect and classify relevant contaminants, including lead-containing glass that fluoresces under UV light. The images are stored on a MinIO server, while associated metadata is managed in a MongoDB database. Object detection is performed with a YOLOv8-based model, and instance segmentation is refined using a Segment Anything–based module, classifying fragments into predefined categories such as Flint glass, Amber glass, Green glass, Blue glass, Lead glass under UV, Heat-resistant glass, Ceramics and porcelain, Stones, Metal wires and Metal springs. Detected objects are annotated, and their mass is estimated by applying gram-per-pixel calibration derived from prior measurements. The results are aggregated and transferred into a SQL database and further communicated to a programmable logic controller (PLC) via an OPC UA interface, enabling real-time monitoring and automated alarm generation if threshold values are exceeded. This approach provides a scalable, cost-efficient, and automated solution for enhancing glass recycling quality control.

A patent application related to the described procedure and device has been filed under the title „Verfahren und Vorrichtung zur Analyse eines Objektgemischs“ (application no. A55101/2025).

recAIcle – Reality instead of theory: AI assistance for manual waste sorting

Julian Aberger[1], Barbara Mayer[2] & Renato Sarc[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] Siemens AG, Graz, Austria

recAIcle represents a decisive step towards the digitalisation of waste management. Until now, manual waste sorting has been a "black box". Manual waste sorting is an integral part of waste management, yet it has not undergone any significant changes or innovations for decades.

recAIcle has set itself the goal of digitally modelling this process and supporting sorting staff in their decision-making. To help the sorting workers, light pulses guide them to particles of interest. This publication deals with the development, validation and practical implementation of this AI assistance system.

Every stage of the system's development was validated through experiments, including tests with sorting workers. The result of this work is the recAIcle prototype and an implementation strategy for deploying the system in real-world waste management facilities.

Furthermore, human–machine interaction, automated data collection and annotation, and advanced machine learning approaches have been integrated into a coherent system architecture. A projection-based human–machine interface highlights particles of interest to the sorters on the conveyor belt in real time. Meanwhile, a second camera, positioned behind the sorters, provides feedback to the AI model. This interface enables the model to learn continuously through observation. The assistance system offers an end-to-end solution that enables a robust and adaptable implementation of AI with continuous human-assisted learning in sorting operations.

DiGiDO connects: VEBS, DIWASS, WasteX and eFTI as digital infrastructure for a resilient circular economy

Constantin Gessner[1,2]
[1)] DiGiDO GmbH, Product Management, Vienna, Austria
[2)] ARAplus GmbH, Innovation, Vienna, Austria

The circular economy is undergoing a significant transformation towards the data-driven management of secondary raw material flows. Regulatory initiatives such as DIWASS, WasteX and the upcoming implementation of the eFTI regulation are progressively replacing paper-based processes with standardized digital information systems.

In this context, the present paper analyses the role of the DiGiDO platform as an integrative data infrastructure for waste and recycling logistics. DiGiDO GmbH, a subsidiary of ARAplus GmbH, develops a multidirectional platform designed to connect companies, public authorities and logistics stakeholders while enabling the seamless integration of existing enterprise systems.

Beyond the digitalization of operational processes, the platform supports data-driven decision-making and process optimization. Industrial applications, including the cooperation with the Triplast sorting facility in Ennshafen, demonstrate significant improvements in process efficiency and transparency of material flows along the value chain.

A key development is the supported implementation of an eFTI-compliant platform within the framework of Austria's national logistics funding scheme, marking one of the first initiatives of its kind in the country. The project is funded by the Federal Ministry for Innovation, Mobility and Infrastructure and administered by SCHIG mbH.

In parallel, the platform is further developed within European initiatives, particularly in the context of Horizon Europe. In cooperation with international partners, including the Dual System Germany, intermodal use cases and cross-border data exchange are being implemented to enhance interoperability and resilience in logistics networks.

The findings highlight that digital platform solutions play a crucial role in the transformation of the circular economy. By integrating operational processes, regulatory requirements and advanced data analytics, platforms such as DiGiDO provide the foundation for transparent, efficient and resilient logistics systems across national and European contexts.

The Path to the Digital Consignment Note 2027: A Flexible Open-Source ERP Solution for Waste Management Using the Practical Example of R&K GmbH

Rainer Saga[1] & Wolfgang Ammerer[2]
[1)] axtesys GmbH, Systemintegration, Graz, Austria
[2)] R & K GmbH, Management, Kilb, Austria

The waste and recycling management industry is facing one of the most significant digital transformations in its history. Driven by the pressure for process optimization, the integration of Artificial Intelligence (AI), and strict regulatory mandates, companies must fundamentally rethink their IT infrastructure. A critical milestone is January 1st, 2027: from this date onward, the "digital consignment note" (Digitaler Begleitschein) becomes mandatory in Austria, making a seamless interface to the VEBSV 2.0 (Verbund elektronischer Begleitschein-Systeme) indispensable. Traditional, monolithic industry software often struggles to provide this required flexibility in a cost-effective manner, leaving waste management companies with rigid systems, slow innovation cycles, and high customization costs.

To address this challenge, axtesys, in close cooperation with the waste management specialist R&K GmbH, developed a pioneering solution. The technological foundation is the globally established open-source ERP system Odoo. Thanks to its modular architecture, Odoo allows for highly customized adaptations to the specific needs of the waste management sector—from weighbridge integration to automated invoicing—without the burden of proprietary licensing fees.
This paper presents the development and implementation of this agile solution, focusing on three core pillars:

- **Full Integration of VEBSV 2.0**: The interface for the upcoming mandatory digital consignment note was natively integrated into the ERP system. This eliminates duplicate data entry and automates mandatory regulatory reporting in the background.
- **Mobile Solutions for Driving Personnel**: Via a user-friendly tablet application, drivers can receive orders, record weighing data, and present the digital consignment note directly onsite. This significantly reduces error rates and accelerates turnaround times.
- **Process Automation:** By leveraging modern workflows, administrative and operational processes are automated to actively counter the ongoing shortage of skilled labor.

In conclusion, axtesys and R&K GmbH demonstrate how small and medium-sized waste management enterprises can successfully master digital transformation. We illustrate that regulatory compliance does not have to be a mere cost factor but can instead serve as a catalyst for a more efficient, transparent, and cost-effective corporate management system. This paper serves as a pragmatic, scalable roadmap for managing directors and operations managers seeking an innovative alternative to traditional legacy software.

Quantifying Recycling Potentials for Post-Consumer Polypropylene Using Waste Characterization and Material Flow Analysis

Sarah Schmidt[1], Mohammed Hafis Veralikkattil Assainar[1], Chaimae Chettouh[2], Victoria Goetjes[2], Hans-Peter Heim[2] & David Laner[1]

[1)] University of Kassel, Research Group on Resource Management and Solid Waste Engineering, Institute of Water, Waste and Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Pause / play carousel, Kassel, Germany

[2)] University of Kassel, Plastics Engineering, Institute of Materials Engineering, Faculty of Mechanical engineering, Kassel, Germany

Plastics are among the fastest-growing material groups worldwide. Polypropylene (PP), together with polyethylene, accounts for a substantial share of global plastic production and is used across a wide range of applications. Post-consumer polypropylene (PC-PP) is typically recovered as part of the mixed polyolefin fraction and is predominantly recycled into lower-value applications due to limitations related to material quality and contamination. This contribution aims to quantify the potential for increasing PC-PP recycling in Germany by integrating material flow analysis, waste characterization campaigns, and materials engineering analyses. This interdisciplinary approach enables the identification and quantification of currently untapped recycling potentials and supports the derivation of requirements for future sorting and recycling technologies. The results provide a scientific basis for developing strategies to increase recycling rates and the utilization of recycled PC-PP. Furthermore, they support the assessment of these recycling potentials in the context of regulatory targets and material performance requirements.

This contribution is part of the research project "Use of Post-Consumer Polypropylene Recyclate in Technically Demanding Applications, Particularly for Automotive Interior Components" (PC-PP4Pkw), which is funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy within the framework of the Industrial Collective Research (IGF) programme.

Decontamination and Decolorization in Dissolution Recycling of Polyethylene from Flexible Packaging Waste

Johannes Schneider[1]
[1)] Fraunhofer Institute for Process Engineering and Packaging IVV, Freising, Germany

Recycling flexible plastic packaging remains a significant challenge due to complex multi-material structures, contamination, and the lack of sorting infrastructure capable of separating food-contact from non-food-contact packaging waste. With the European Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) mandating minimum recycled content targets for plastic packaging, including food-contact applications, from 2030 onwards, the demand for advanced recycling technologies capable of producing high-quality recyclates is increasing substantially. Conventional mechanical recycling processes are limited in their ability to remove contaminants, colorants, adhesives, and foreign materials, particularly from flexible multi-layer packaging structures commonly used in food packaging applications.

This work investigates the decontamination performance and achievable recyclate quality of dissolution recycling of polyethylene (PE) from flexible post-consumer packaging waste. The cleaning efficiency was quantified using a challenge test approach with nine model contaminants covering a broad range of physicochemical properties, including volatile and semi-volatile substances with varying molecular weights and functional groups. Low-density polyethylene (LDPE) flakes were artificially contaminated and subsequently processed on a small-technical scale demonstration plant for dissolution recycling. The process involves selective dissolution of PE, mechanical separation of insoluble foreign materials, multi-stage purification of the polymer solution, drying, and degassing extrusion to recover the polymer as granulate.

For volatile and semi-volatile contaminants with molecular weights below 300 g/mol, cleaning efficiencies exceeding 99% were achieved, with residual concentrations falling below the limits of quantification of the analytical method employed. For higher molecular weight, semi-volatile contaminants, the base process yielded cleaning efficiencies of 67-94%. However, by incorporating an additional extractive purification step targeting soluble contaminants, the decontamination efficiency was significantly enhanced to 91-98%, with further optimization potential through repeated extraction stages.

In addition, real post-consumer packaging waste from a sorting fraction of the German dual system was processed using the dissolution recycling approach at laboratory scale. The results demonstrated that the base purification process effectively removes the majority of foreign materials and coarse impurities. However, fine particulate color pigments, especially from printed and black-colored films, caused visible discoloration of the recyclate. Integration of an additional purification step specifically designed for the removal of fine particles and colorants yielded a recyclate with optical quality comparable to virgin material, which is an essential prerequisite for use in transparent or light-colored packaging applications.

Overall, the results demonstrate the high potential of dissolution recycling as a complementary technology to mechanical recycling for producing high-quality, potentially food-grade PE recyclates from complex post-consumer packaging waste streams. The findings highlight the importance of multi-stage purification concepts to effectively address both chemical contaminants and optical impurities, thereby enabling closed-loop recycling of flexible polyethylene packaging in compliance with upcoming European regulatory requirements.

Influence of different process steps in mechanical recycling on the properties of polypropylene recyclates

Hannah Zeilinger[1], Franz Rittmannsberger[2] & Jörg Fischer[1]
[1)] Johannes Kepler University Linz, Institute of Polymeric Materials and Testing & LIT Factory, Linz, Austria
[2)] Prezero Polymers Austria GmbH, R&D, Haimburg, Austria

EU recycling regulations in the context of a circular economy aim to increase recycling rates in order to promote sustainability and resource conservation. To achieve these goals, specific requirements for the recycling process must be met in order to produce high-quality recyclates. A key challenge in mechanical recycling is the inhomogeneous input stream, which contains not only the target fraction but also polymeric and non-polymeric contaminants and impurities. These impurities negatively affect the properties of the recycled material and make it difficult to achieve recycling targets. A central task in the recycling process is to separate undesirable components and contaminants from the target stream as completely as possible through a sequence of suitable process steps. The input stream is mechanically shredded into flakes and fed into a washing line. During the washing process, foreign materials and adhering contaminants are removed. Friction washers are used to separate fine particles, such as dirt, paper, glue, or organic residues from the plastic particles. A fundamental sorting method during the washing stage is the float/sink method. The materials are separated based on their density, causing higher-density materials to sink and be removed from the process. A major disadvantage of this method is the limited separability of materials with very similar densities so no effective separation is possible. In the conversion step, further foreign non-melting particles are removed using melt filters in the extrusion process. The separation of contaminants in various process steps has a significant impact on the quality and properties of the final recyclate. The aim of this study was to determine the influence of individual process steps on the property profile of a rigid post-consumer polypropylene (PP) fraction. PP is one of the most commonly used polymers in the food and non-food packaging industry. For characterization, samples were taken at defined positions along the entire mechanical recycling chain. The characterization methods included melt flow rate (MFR), mechanical testing methods (Tensile tests and Charpy impact tests), and differential scanning calorimetry (DSC). Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) was used for a more detailed compositional analysis. Based on the results, optimization potentials in the mechanical recycling process are to be identified in order to improve recyclate quality and close sustainable material loops.

Transformation of the plastic value chain by overcoming technological purity barriers in PC-PO as a solution to meet the PPWR quota required for 2040

Johanna Langwieser[1], Verena Pardametz[1] & Franz Rittmannsberger[1]
[1)] PreZero Polymers Austria GmbH, R&D, Haimburg, Austria

The transition from the Packaging and Packaging Waste Directive (PPWD) to the Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) marks a fundamental paradigm shift in European environmental policy. It elevates plastic recycling from a voluntary sustainability measure to a mandatory pillar of resource sovereignty. A cornerstone of this regulation is the 2040 mandate requiring a 25 % post-consumer recyclate (PCR) content in contact-sensitive (food-grade) packaging. While closed-loop recycling systems are well-established for polymers like polyethylene terephthalate (PET), post-consumer polyolefins (PC-PO), which constitute the largest share of household plastic waste, face systemic technological, material, and macroeconomic barriers that hinder compliance. PO exhibit inherent material traits that make them highly susceptible to absorbing organic substances, volatile organic compounds (VOCs), and environmental contaminants. During conventional mechanical recycling, exposure to high temperatures and mechanical shear induces polymer degradation, causing chain scission, viscosity shifts, and a drastic loss of mechanical properties. Furthermore, the thermal degradation of legacy inks, adhesives, and coatings, compounded by non-recyclable packaging designs, generates complex mixtures of Non-Intentionally Added Substances (NIAS). Because current "Design for Recycling" guidelines fail to adequately mitigate these precursors, quantifying migration kinetics to comply with the European Food Safety Authority (EFSA) remains a critical bottleneck.

On a processing level, standard Near-Infrared (NIR) sorting technologies can differentiate polymers but cannot identify a package's usage history, leading to severe cross-contamination between food-grade and non-food-grade waste. To bridge the gap toward the 2040 targets, the industry must undergo a paradigm shift, prioritizing chemical and organoleptic purity over mere quantitative sorting efficiency. Research demonstrates that the degree of chemical contamination influences final recyclate quality more severely than the base polymer type. Overcoming these purity barriers requires an integrated, multi-layered technological matrix. Advanced decontamination must supersede conventional washing. This includes solid-state thermal desorption under high vacuum to extract deep-seated NIAS from the polymer matrix, or supercritical CO_2 extraction. For melt-phase decontamination, modified compounding extruders equipped with high-efficiency vacuum degassing zones and inert stripping gases (e.g., nitrogen or steam) can rapidly remove volatile toxins before pelletization.

Concurrently, sorting infrastructures must combine NIR spectroscopy with AI-based vision systems and digital watermarking (e.g., the HolyGrail 2.0 framework) to dynamically isolate food-contact streams in real time. Ultimately, scaling this advanced processing ecosystem, supported by decentralized data registries and Digital Product Passports, will transition the fragmented plastic value chain into a synchronized, quality-assured infrastructure capable of transforming PC-PO into a compliant, high-quality resource.

The Role of rPS4FoodPackaging in Achieving Food-Contact Approval for Recycled Polymers

David Mittermayr[1], Sandra Czaker[1], Alexander Felgel-Farnholz[1] & Joerg Fischer[1,2]
[1)] Johannes Kepler University Linz, Institute of Polymeric Materials and Testing, Linz, Austria
[2)] Johannes Kepler University Linz, LIT Factory, Linz, Austria

The transition towards a circular economy requires the establishment of safe and efficient recycling routes for plastic packaging, particularly for food-contact applications. While recycling of polyethylene terephthalate (rPET) has already achieved broad regulatory acceptance, equivalent pathways for other polymers remain largely undeveloped. Closing this gap is essential to meet increasing recycled-content targets and enable truly circular material flows.

A prerequisite for any food-contact recycling process is the generation of a suitable input stream. Therefore, the first step involves the implementation and validation of advanced pre-treatment technologies, including object- and flake-based sorting, to ensure compliance with regulatory requirements regarding the origin and composition of post-consumer waste. In parallel, washing and purification processes must be optimized to maximize physical and chemical purity while preserving material performance.

The core of the authorization process is the demonstration of consumer safety. This requires the determination of safety thresholds and target decontamination efficiencies based on migration modelling and exposure assessments for sensitive population groups. To establish a scientific basis for process design, diffusion coefficients of representative contaminants within the polymer matrix must be determined, enabling prediction of contaminant removal under industrial processing conditions. These findings provide the foundation for defining process parameters and evaluating cleaning performance.

Subsequently, the recycling process must be validated through challenge testing using intentionally introduced surrogate contaminants. Such tests verify whether the technology consistently achieves the decontamination efficiencies required for food-contact safety. Complementary analytical investigations of input and output materials are necessary to characterize contaminants throughout the process chain, identify contamination sources, and quantify cleaning performance under industrial conditions.

Beyond contaminant removal, process-induced material changes must also be assessed, as recycling conditions can affect polymer structure, mechanical performance, and long-term functionality. Only the combined evaluation of feedstock quality, decontamination efficiency, contaminant monitoring, migration behavior, and material performance provides the scientific evidence required for regulatory approval.

Using post-consumer polystyrene as a case study, rPS4FoodPackaging demonstrates that a systematic and data-driven approach can establish the foundation for food-contact authorization of recycled polymers. The presented methodology extends beyond polystyrene and illustrates the key scientific and technological steps required to unlock circular food packaging solutions for a wider range of polymer materials.

Utilizing Property Profiles in Sensor-Based Sorting of Plastics

Nikolai Kuhn[1], Moritz Mager[2], Gerald Koinig[1], Jörg Fischer[2] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] Johannes Kepler University Linz, Institute for Polymeric Materials and Testing / LIT Factory, Linz, Austria

Improving recyclate quality is essential for replacing primary plastics in higher-performance applications and for meeting upcoming minimum recycled content targets. Because “quality” varies by route and use case, property profiles provide a practical way to assess and communicate fitness for purpose. These profiles capture polymer type, shape, color, application, chemical load, and processing metrics such as melt flow rate.

A particle-level study of lightweight packaging waste (55,197 items; 1,110 kg sampled across urban, intermediate, and rural regions over one year) shows that property profiles enable flexible, problem-focused analyses without repeated sampling. Settlement structure had a stronger effect on per-capita collection than seasonality. Polymer and product-type composition remained relatively stable, which supports planning of application-specific recycling routes.

Polypropylene (PP) packaging illustrates high mechanical, chemical, and design heterogeneity. Typical ranges include impact strength of 4–10 kJ m^{-2}, tensile modulus of 800–1,990 MPa, and melt flow rate of 2–90 g 10 min^{-1}. Furthermore, 143 chemicals and multiple multilayer designs were identified. Without sorting by material properties, PP recyclates show fluctuating profiles and limited substitution potential.

Sensor-based sorting can raise quality by producing fractions with distinct profiles. Sorting PP by opacity and translucency yielded recyclates with different tensile moduli (white: 1,424 MPa; natural: 1,154 MPa) and melt flow rates (white: 17.2 g 10 min^{-1}; natural: 9.1 g 10 min^{-1}), reflecting differences in copolymer content and processing history.

Correlating near-infrared spectra with melt flow rate achieved balanced accuracies of 0.82–0.92 across practical thresholds. Regression accuracy is not yet sufficient for direct industrial control, and mid-infrared added little. Future work should use higher spectral resolution and signal-to-noise and clarify how chemistry and morphology shape spectra. Overall, property profiles combined with advanced sorting can deliver stable, application-tailored recyclate streams and expand their substitution potential.

Development of a methodology for determining the proportion of plastic in WEEE with a view to assessing the potential for plastic recycling

Ralf Brüning[1], Florian Witt[1] & Christian Kitazume[2]
[1)] Dr. Brüning Engineering UG, Brake, Germany
[2)] Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Germany

In 2023 the recycling rate for plastics out of WEEE just stood at 19.3%, indicating that plastics from WEEE were primarily channeled into energy recovery processes. In order for manufacturers to make greater use of post-consumer (PC) recycled plastics in their existing processes, the quality and availability of suitable plastic recyclates must be improved. Suitable incentives should foster demand for PC recycled plastics. Mandatory PC recycling and recycled material usage targets can serve as important drivers in this regard, as is already stipulated, for example, in the European Battery Regulation. However, plastics from electrical and electronic equipment pose complex challenges for increased recycling. For example, a variety of plastics are used in individual devices, which in turn may be contaminated with a wide range of harmful and/or disruptive substances. Against this background, the company Dr. Brüning Engineering UG, in collaboration with ARGUS GmbH, cyclos GmbH and INTECUS GmbH on behalf of the German Federal Environment Agency, carried out the research project 'Development of a methodology for determining the proportion of plastic in waste electrical and electronic equipment and assessing the potential for plastic recycling' from 2022 to 2024. The aim of the project was to develop a scientific basis for the introduction of recycling targets for plastics from WEEE. The project developed a methodology for obtaining a representative data set for the whole of Germany. Data collection was carried out for the WEEE in collection group 1 (heat exchangers), collection group 2 (display devices), collection group 4 (large appliances) and collection group 5 (small appliances and small consumer electronics). On-site trials were carried out at primary treatment plants. They included sorting of 55 input containers and recording their contents, as well as their determined weights. For groups 2, 4 and 5, this was followed by the manual dismantling. This involved dismantling the selected WEEE, weighing the dismantled fractions, sampling the plastic components and bagging the plastic samples, as well as recording the compositions, properties and weights. Group 1 was excluded from this dismantling. For the WEEE in Group 1, mechanical shredding was carried out as part of a plant trial. In total, and around 4,500 plastic samples were archived from the 55 container loads processed. During the subsequent analyses approx. 81 % of the plastic parts were identified by type. Among the plastics used in the WEEE of SG2, SBC (styrene-butadiene copolymer), PS (polystyrene), PMMA (polymethyl methacrylate) and PP (polypropylene) are the plastics with the highest mass fractions. SBC is particularly noteworthy, as it is present in significant quantities across several categories. Among the plastics used in the WEEE of Group 2, polypropylene (PP) accounts for the largest proportion. PP is used particularly frequently in washing machines (UNU-Key 0104) and tumble dryers (UNU-Key 0105). SBC (styrene-butadiene copolymer) is also a significant component of the plastic composition of Group 4. Particularly high quantities are found in Professional IT appliances (UNU-Key 0307) and tumble dryers (UNU-Key 0105). Among the plastics used in the WEEE of Group 5, styrene-butadiene copolymer (SBC) accounts for the largest proportion. SBC is particularly common in vacuum cleaners (UNU-Key 0204) and printers (UNU-Key 0304). Other significant plastics in the SG5 category are polypropylene (PP) and polystyrene (PS). Further analyses will aim to identify harmful and disruptive substances. Building on this, well-founded recommendations for target recycling rates for plastics from WEEE can be derived, and a further basis for decision-making regarding the potential future development towards a recycled content target in electrical and electronic equipment can be established.

Characterizing Heterogeneity in Post-Consumer Rigid PP Packaging Waste: Implications for Object and Property-Based Flake Sorting

Moritz Mager[1], Nikolai Kuhn[2], Alexander Felgel-Farnholz[1] & Jörg Fischer[1]
[1)] Johannes Kepler University Linz, Institute of Polymeric Materials and Testing, Austria
[2)] Technical University of Leoben, Waste Processing and Waste Management, Department of Environmental and Energy Process Engineering, Leoben, Austria

Meeting the recycled content targets of the Packaging and Packaging Waste Regulation requires significant improvements in recycle quality for high-performance rigid polypropylene (PP) packaging. However, the post-consumer rigid PP stream is highly heterogeneous, resulting in intermediate recycle properties when processed as a single stream. This study provides a comprehensive characterization of 20 representative rigid PP packaging products from an Austrian sorting facility, combining rheological, mechanical, thermal, molecular, and chemical analyses to derive a product-property matrix and sorting implications. The results reveal substantial variability in melt flow rate, stiffness, impact strength, crystallinity, and molecular weight distribution, driven by polymer design and degradation during primary processing. Additional heterogeneity arises from chemical loads, particularly between food and non-food products, as well as inconsistent stabilizer packages and barrier layers. These findings highlight inherent limitations of object-based sorting, which cannot reliably infer material properties from external product attributes. Conversely, correlations between spectral-relevant properties underscore the potential of property-based flake sorting to classify materials by intrinsic characteristics. A systemic combination of both strategies is proposed: isolating food-contact materials at the object stage and generating application-specific recycle fractions through flake sorting. Developing robust spectral-property prediction models for PP remains a critical step toward substituting virgin grades.

This contribution is based on: M. Mager, N. Kuhn, A. Felgel-Farnholz, J. Fischer, *Journal of Applied Polymer Science* **2026**, e71068. https://doi.org/10.1002/app.71068

In the Loop, Under Observation: Cyclic Degradation of Plastic Recyclates and Inline Raman Quality Control

Matthias Frühwirth[1] & Nina Krempl[2]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Polymer Processing, Leoben, Austria / ib-frühwirth e.U., Ingenieurbüro für technischen Umweltschutz, Vienna, Austria
[2)] Technical University of Leoben, Chair of Polymer Processing, Leoben, Austria

Closed polymer loops require recyclates with stable properties and reliable purity, although post-consumer materials often have an unknown processing history. This contribution investigates recycled polypropylene (rPP) from a post-consumer lightweight-packaging stream over ten simulated recycling cycles and combines this material perspective with process-integrated quality monitoring by inline Raman spectroscopy. The cyclic processing route comprised repeated compounding, wet pelletizing, drying, injection moulding and grinding. An unstabilized rPP and a variant containing 3 wt.% antioxidant masterbatch were analysed after the first, fifth and tenth cycle by rotational rheometry, tensile testing, oxidative induction time/temperature and gel permeation chromatography.

The results show that repeated processing strongly affects the molecular structure and, consequently, the usability of unstabilized recyclates. In the unstabilized material, the number-average molar mass decreased by about 22%, while the weight-average molar mass, which reflects the contribution of long polymer chains, decreased by about 59% after ten cycles. The elongation at break dropped by approximately 90%, whereas the tensile modulus remained almost unchanged. Stabilization substantially slowed down this degradation: the stabilized rPP retained an almost constant average chain length, showed a considerably smaller reduction in long-chain fractions and maintained a significantly higher oxidative stability even after ten cycles.

In addition to preserving material properties, early detection of foreign polymers is essential for high-quality closed-loop recycling. Therefore, inline-capable Raman measurements were evaluated for the detection of polymer contaminations in PP, HDPE and PS blends. Initial measurements directly at the extruder haul-off belt revealed practical limitations caused by the small probe measurement area and lateral strand movement, resulting in unstable signal quality. Static and quasi-dynamic measurements on 38 binary material mixtures nevertheless demonstrated that foreign polymer contents of approximately 2 wt.% could be detected with promising reliability. The results indicate that Raman spectroscopy, especially when combined with multivariate chemometric models, can support real-time monitoring of recyclate streams and enable future process decisions such as direct diversion of off-spec material. The combined approach of cyclic material assessment, targeted stabilization and inline quality control provides a basis for robust, technically feasible closed-loop recycling concepts.

Future Waste – A Term Between Buzzword Inflation and Real Scientific Meaning

Thomas Nigl[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Treatment Technology and Waste Management, Leoben, Austria

Since its introduction into the scientific literature by Pomberger & Ragossnig twelve years ago, the term Future Waste has enjoyed a remarkable career. It appears with increasing frequency in scientific publications, research proposals, conference programmes, marketing materials and even political strategy papers. This measurable rise in usage, however, has not been matched by conceptual clarity: the term increasingly serves as a projection screen onto which very different meanings are cast. This contribution therefore asks whether Future Waste is merely an inflationary buzzword or whether it can carry real scientific meaning – and argues for the latter, provided the term is sharpened.

A survey of current usage reveals four distinct readings: (a) wastes that do not yet exist, arising from new products and materials; (b) products in use today that will become waste tomorrow, i.e. the anthropogenic stock as waste in an on-hold mode; (c) wastes from emerging technologies of the energy and mobility transition; and (d) a metaphorical-normative usage that primarily addresses waste prevention. Austrian examples – gypsum, mineral wool and textile wastes – demonstrate that Future Waste is generated not only by technological innovation but also by regulatory intervention: landfill bans and separate collection obligations can effectively create waste streams that existed materially but were barely visible to waste management. A comparison with related yet non-identical concepts (emerging waste streams, urban mining and anthropogenic stocks, design for recycling, prospective material flow analysis) shows that Future Waste touches all of them without being reducible to any.

The research approaches of the working group "Future Waste and Waste Management" at Technical University of Leoben combine model-based forecasting with experimental waste characterisation. Three case studies – hydrogen technologies, photovoltaic modules and lithium-ion batteries – are read as snapshots of one and the same development at different stages of maturity: from an emerging technology whose returns do not yet exist and whose recycling research remains at laboratory scale, through a booming technology with a predictable return wave and pilot-scale processes, to an established technology with industrial recycling routes awaiting demand-driven scale-up. The sequence makes visible what Future Waste research is meant to achieve: closing the action gap before the masses arise.

On this basis, an operational working definition is derived. Future Waste denotes material streams that will, with justifiable probability, arise as waste in the future due to products placed on the market today, foreseeable technology and consumption pathways, or regulatory developments, and for which today's waste management systems do not yet provide adequate collection, treatment or recovery solutions. Three criteria are constitutive: temporal reference, anticipability and an action gap. Thus defined, Future Waste turns from a label into a planning instrument – enabling forward-looking capacity planning, the timely development of recycling processes, systematic design feedback and evidence-based policy advice. Both the definition and the underlying concept are explicitly offered to the scientific community for discussion, as a step towards transforming waste management from a reactive into an anticipatory discipline.

Optimization of the Mechanical Properties of Recycled Short Glass Fibers from Shredded Wind Turbine Blades and Post-Industrial Waste in Epoxy Resin Plates

Bianca Purgleitner[1] & Christoph Burgstaller[1,2]
[1] Transfercenter für Kunststofftechnik GmbH, Wels, Austria
[2] University of Applied Science Upper Austria GmbH, Wels, Austria

The recycling of glass fiber-reinforced polymers (GFRP) from wind turbine blades represents a growing challenge in polymer engineering due to the increasing number of decommissioned installations after 20–25 years of service. Traditional end-of-life pathways, such as landfilling and incineration, are becoming less acceptable owing to environmental concerns and regulatory pressures. Although extensive research has been conducted over the past three decades, scalable and economically viable recycling strategies remain limited. Mechanical recycling, involving shredding and milling processes, has emerged as the most industrially feasible approach due to its relatively low energy demand, simplicity, and scalability.

The aim of this work was to investigate the use of mechanically recycled GFRP (rGFRP) derived from both post-consumer (PC) wind turbine blades (WTB) and post-industrial (PI) laminate waste as reinforcement in epoxy-based composite panels. Therefore, the materials were sieved into defined particle size fractions, with finer fractions selected for processing. Fiber content was determined via thermogravimetric analysis. Composite plates were produced by manually mixing rGFRP with an epoxy resin system and pressing the bulk in a hot press. The influence of particle size, material origin, coupling agents and matrix formulation (petrochemical versus partially bio-based epoxy) on tensile properties was systematically assessed.

Higher fiber content was observed in PI and industrially pretreated PC fractions. Mechanical testing revealed that composites reinforced with PI and purified PC materials achieved superior tensile values compared to untreated WTB waste. This highlights the importance of pre-treatment and impurity removal. Finer particle fractions yield higher tensile properties, whereas coarse fractions reduces the mechanical properties. The addition of coupling agents showed no significant improvement, suggesting limited compatibility with recycled fibers incorporated in cured resin. The use of a bio-based epoxy resin demonstrated comparable processability and mechanical properties to the petrochemical reference system.

This study demonstrates that mechanically recycled GFRP can be effectively incorporated into epoxy composites, achieving promising mechanical performance. Fine particle fractions and purified feedstocks provide the best results, while bio-based resin systems offer a sustainable alternative without significant property loss. Future work should focus on optimizing additive systems and establishing scalable recycling infrastructures.

A green alternative to aqua regia for platinum recovery from PEM electrolyser stacks

Richard Yaw Nti[1], Veronika Kanzler[1], Lea A. Brandner[2] & Thomas Nigl[1]
[1)] Technical University of Leoben, Department of Environmental and Energy Process Engineering, Leoben, Austria
[2)] HyCentA Research GmbH, Graz, Austria

The projected terawatt-scale rollout of proton exchange membrane (PEM) electrolysers makes the recovery of platinum from end-of-life components an economic and geopolitical necessity, yet conventional aqua regia leaching generates toxic NO_x and hazardous mixed-acid waste. We present a systematic evaluation of the H_2O_2/HCl system as a green alternative that eliminates NO_x entirely through peroxide reduction to water while operating at ambient temperature without external heating. Leaching experiments at 3, 5, and 10 vol % H_2O_2 in 12 M HCl were conducted in triplicate across three representative feed materials: thermally platinised PTLs, physical vapour deposition (PVD)-coated PTLs, and NIST SRM 2556 (spent autocatalyst), the latter included for analytical validation. Against an aqua regia benchmark of 92.16—99.89 % recovery, the H_2O_2/HCl system recovered 53.8—58.1 % from thermally platinised PTLs with wide variability (CV 26—35 %) reflecting coating heterogeneity, and 68.3 % from the high-surface-area SRM 2556, achieved with tight error bars (good reproducibility). Together, these results confirm the thermodynamic and kinetic viability of H_2O_2/HCl for porous, heterogeneous matrices. However, dense PVD coatings resisted dissolution almost entirely (<10 % across all concentrations), with tight error bars, revealing that physical morphology, specifically, the diffusion barrier imposed by uniform sputtered films, is the dominant limiting factor over oxidant strength. These findings establish a clear practical guideline: H_2O_2/HCl is a more sustainable, ready-to-use lixiviant for thermally platinised PTLs but requires further optimisation (e.g., via ionic additives) to increase recovery efficiency and extend its applicability to modern PVD-coated PTLs, which is the focus of our ongoing work.

Plastic components from electric vehicles: material composition and recycling options

Philipp Schetter[1] & Sabine Flamme[1]
[1)] FH Münster, IWARU, Münster, Germany

The growing adoption of electric vehicles is accompanied by an increasing need for high-quality recovery pathways for automotive plastic components. Plastics are widely used in electric vehicles due to their low weight, cost-effective processing and high design flexibility. At the same time, the increasing use of plastics, fibre-reinforced materials and multi-material components raises new challenges for dismantling, reuse and material recovery. After vehicle treatment, many plastic components still enter heterogeneous waste streams, where mixed polymers, composite structures and insufficient material labelling limit high-quality recycling. Emerging European and national regulations further increase the need for improved dismantling, recyclate use and recycling-oriented vehicle design.

This contribution examines the material composition and recovery potential of plastic components from electric vehicles. The methodological approach combines a literature-based assessment of automotive plastics, dismantling and recycling strategies with the complete dismantling of selected electric and plug-in hybrid vehicles. During dismantling, the installed materials, dismantling effort and joining technologies are systematically documented. The identified plastic components are then assessed along three recovery pathways: direct ReUse, reconditioning through Repair, Refurbish and Remanufacture processes, and recycling.

Initial results from a dismantling study of a Renault Kangoo build in 2011 show that plastics account for approximately 9% of the total vehicle mass. Polyolefin-based materials, particularly polyethylene and polypropylene, represent a significant share of the identified plastics. At the same time, a big proportion of components consists of composites or lacks clear material labelling, indicating the need for further material analysis. Ongoing dismantling work on a plug-in hybrid vehicle confirms the relevance of PP-based materials. The results provide a basis for developing recommendations for high-quality circular use of plastic components from electric vehicles.

Sensors, Data, Algorithms: Vision Pipelines for AI in Recycling

Alexander Eckert[1], Laurin Ginner[1], Nicole Brosch[1], Filip Hendrichovsky[1] & Rita Ebner[2]
1) AIT Austrian Institute of Technology, High-Performance Vision Systems, Vienna, Austria
2) AIT Austrian Institute of Technology, Center of Energy, Vienna, Austria

AI-based classification is becoming increasingly important in sorting, reuse and recycling processes. However, robust decisions in industrial recycling are not achieved by selecting a single classifier alone. They depend on an application-specific vision pipeline in which sensing, illumination, image acquisition, data volumes, annotation strategy and algorithmic evaluation are designed together. This contribution discusses this pipeline perspective using three examples from recycling-related applications. In the FFG project WattsOK, used photovoltaic modules are inspected by means of multimodal imaging, including front- and backside images, electroluminescence, UV fluorescence and transmitted-light images, combined with electrical measurements and product information. Defect-related key performance indicators and AI-based features are used to support reuse/recycling decisions. In the FFG project ReUseTex, static and inline image acquisition setups as well as application-specific acquisition and annotation tools are developed to create reproducible and usable training data for AI-supported textile sorting. The project highlights the importance of annotation quality, rare defects, class imbalance and variable object appearance for deformable post-consumer textiles. A third industrial sorting example investigates the recovery of coins from a mixture of metallic small parts. Here, photometric stereo is used to generate albedo and surface-normal information from different illumination directions, providing additional 2.5D information for classification. Across these examples, the central conclusion is that AI in recycling should be understood as an integrated vision system rather than an isolated model. Sensor and illumination selection, acquisition software, annotation workflows, preprocessing, feature extraction, data fusion and classification have to be matched to the material stream, the available data and the target decision. This system-oriented view is essential for transferring AI methods from controlled experiments to robust, traceable and real-time-capable sorting decisions in industrial recycling environments.

Digital Twin for Modular Sorting Plants: Particle-level Optimization for the Treatment of Waste Electrical and Electronic Equipment

Malte Vogelgesang[1], Alice do Carmo Precci Lopes[2,3], Emanuel Ionescu[4] & Liselotte Schebek[5]

[1)] Fraunhofer Research Institution for Materials Recycling and Resource Strategies IWKS, Digitalization of Resources, Alzenau, Germany

[2)] Hochschule Darmstadt, University of Applied Sciences, Chair Digitalization in Recycling Technology, Darmstadt, Germany

[3)] European University of Technology (EUt+), The European Sustainability Science Laboratory (ESSLab+), Darmstadt, Germany

[4)] TU Wien, Institute of Chemical Technologies and Analytics, Vienna, Austria

[5)] Technical University of Darmstadt, Institute IWAR, Chair Material Flow Management and Resource Economy, Darmstadt, Germany

The increasing heterogeneity of waste electrical and electronic equipment (WEEE) demands flexibly adaptable sorting processes. Modular sorting plants allow process sequences and machine settings to be reconfigured for specific input streams, but the resulting complexity exceeds conventional optimization approaches. This paper presents a particle-level digital twin of a modular pilot-scale WEEE sorting plant, developed to automatically identify optimized process sequences and machine settings for given input streams.

Machine learning models were trained from design-of-experiments-based sorting campaigns for six sorting units: magnetic separation, eddy-current separation, zig-zag air separation, and sensor-based sorting in three modes (inductive metal detection, NIR-based PCB sorting, NIR-based plastics sorting). The models predict ejection probabilities for individual particles as a function of their physical properties (material class, geometry, color, mass) and the respective machine settings. Random forest models were selected for their robustness and accuracy at both particle and experiment level. The trained models were integrated into a particle-based flowsheet simulation, where particle masses are fractionally split across eject and pass streams according to their predicted probabilities. A Shannon-entropy-based score quantifies the overall material separation across all output streams in a single metric, avoiding explicit weighting of purity and yield. A differential evolution algorithm optimizes machine settings per process step, and all feasible sequences up to three steps are systematically evaluated and ranked. Experimental validation with a previously unseen WEEE sample confirmed that the digital twin identifies effective process configurations. Measured separation performance exceeded predictions in all three validated sequences, with a median deviation of material mass shares of 1.6 percentage points. Model updating with additional sorting data improved prediction accuracy, demonstrating the bidirectional data exchange capability for the continuous improvement of the digital twin in operation.

In the next step, the approach will be transferred to automotive shredder light fractions to provide a plastics fraction optimized for chemical recycling, with the process portfolio being extended by X-ray fluorescence and AI-based RGB sorting to remove heteroatom-containing contaminants.

Object-Based Sorting of Post-Consumer-Textiles into Garment Categories Using AI-Based Models at Pilot Scale

Hannah Weber[1], Gerald Koinig[1], Verena Schmid[1], Felix Scheidl[1], Thomas Fink[2] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] REDWAVE, Competence Center of BT-Systems GmbH, Eggersdorf bei Graz, Austria

The increasing generation of textile waste and the EU-wide introduction of mandatory separate collection of post-consumer textiles require automated sorting systems capable of processing large and highly heterogeneous waste streams. Currently, manual sorting remains the predominant sorting method, however, it is costly, time-consuming, labor-intensive, and difficult to scale for large volume applications. While near-infrared spectroscopy has become an established technology for material-based textile identification, it provides only limited information on product-related characteristics, including garment category, style, condition, brand, and size. Computer vision therefore represents a promising and cost-effective complementary technology for product-specific sorting of post-consumer textiles.

This work investigates the applicability of AI-based object detection models for automated sorting of post-consumer textiles into predefined garment categories under pilot-scale conditions. Therefore, a representative adult clothing dataset was generated from approximately 2.5 t of untreated post-consumer textiles originating from Austrian collection systems. The final dataset consists of 65.329 RGB images across 35 garment categories. Furthermore, the dataset incorporates typical post-consumer influences, waste-related characteristics, and various garment arrangements on a conveyor belt, reflecting conditions encountered in industrial sorting applications.

Using this dataset, two state-of-the-art object detection architectures, a CNN-based YOLO11n model and a transformer-based RT-DETR-L architecture, were trained and evaluated through both offline and inline validation. Besides baseline model training, the model development pipeline included hyperparameter optimisation, dataset cleaning, and the reduction of class imbalance. First model performance was assessed using an independent test set and standard offline evaluation metrics. Subsequently, the two best-performing model architectures were validated under realistic sorting conditions on a pilot-scale sorting system at the Digital Waste Research Lab of Montanuniversität Leoben.

The results show that dataset refinement had a greater influence on model performance than hyperparameter optimisation alone. While the removal of incomplete garments from the dataset, resulting from data acquisition on the moving conveyor belt, initially reduced offline performance, subsequent class balancing substantially improved model performance. Overall, the transformer-based RT-DETR-L architecture achieved the highest offline performance and consistently outperformed YOLO11n during inline validation, demonstrating higher yields across most garment categories. The findings indicate that the transformer-based architecture is more robust under realistic sorting conditions. Furthermore, the results demonstrate its potential for automated garment category sorting and highlight computer vision as a promising, cost-effective complementary technology for product-specific sorting of post-consumer textiles.

AI-Based X-Ray Sorting System for the Detection of Lithium-Ion Batteries in Lightweight Packaging Waste Streams – Recent Findings from Field Trials

Johannes Leisner[1], Michael Kalb[1], Alexander Ennnen[1], Lara Jürgens[2] & Jochen Ebbbing[3]
[1)] Fraunhofer IIS, Development Center X-ray Technology, Fürth, Germany
[2)] Lobbe Umweltservice GmbH & Co KG, Brilon, Germany
[3)] Lobbe Industrieservice GmbH & Co KG, Iserlohn, Germany

Lithium-ion batteries (LIBs) that are incorrectly disposed of in municipal solid waste represent a major fire hazard for the waste management and recycling industry. Lightweight packaging waste sorting facilities are particularly affected, as mechanical processing can damage LIBs and trigger thermal runaway, making them a significant source of fire ignition.

To address this challenge, Fraunhofer IIS and Lobbe Umweltservice developed an AI-based X-ray sorting system within the K3I-Cycling research project. The system combines X-ray transmission (XRT) imaging with deep-learning-based object detection to identify and remove both loose LIBs and waste electrical and electronic equipment containing embedded LIBs from LPW streams.

Since June 2025, the prototype has been operated under industrial conditions at Lobbe Umweltservice's sorting facility in Iserlohn, Germany. During field operation, X-ray images and the corresponding sorting results were continuously recorded, semi-automatically annotated, and used for iterative retraining of the AI model.

Continuous optimization of the detection model resulted in a recovery rate of 92% for LIB-containing objects while reducing the proportion of false-positive ejections to 0.36 wt.% of the total plant feed. These results demonstrate the potential of AI-assisted XRT sorting to enhance fire safety in lightweight packaging waste recycling.

Kick it, pick it: AI-based battery sorting in mixed municipal waste with finger ejection unit and robotics

Nina Nowak[1], Michael Autischer[2] & Thomas Nigl[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] SAMsoric GmbH, Leoben, Austria

The growing number and diversity of batteries in municipal residual waste have become a major challenge for waste management, accompanied by a significant rise in fire incidents at waste treatment and recycling facilities. These events threaten worker safety, public health and the environment. A key driver is the rapid increase in lithium-based batteries (LiB), particularly from battery-powered consumer products such as disposable and recharge-able e-cigarettes, highlighting the need for continuously updated detection systems capable of recognizing emerging battery types. Project BaKIRoS (battery detection and ejection using artificial intelligence, robotics and sensor fusion) addresses these challenges by advancing AI-supported battery detection and automated sorting technologies. Building on previous re-search, the project expands an existing battery image database with images of free-falling batteries to improve model robustness under realistic waste-stream conditions. A dedicated experimental setup combines synchronized optical and thermal imaging, while additional datasets are generated through data augmentation to enhance detection performance. Annotated image data are used to train and validate AI models for reliable battery identification.

Beyond detection, the project investigates practical battery removal using a retrofit-compatible mechanical ejection system and evaluates the potential of robotic-assisted sorting to improve efficiency while reducing manual workload. Detection, sorting and robotic solutions are validated under pilot-scale conditions to assess their applicability in real waste treatment facilities. Overall, the project aims to enhance operational safety, reduce battery-related fire risks, improve battery recovery from mixed municipal waste and support the broader adoption of intelligent automation in waste management.

Devoid of value and meaning without context—battery recycling efficiency metrics: the gap between measurements, assumptions, and reality

Bettina Rutrecht[1] & Thomas Nigl[2]
[1)] K1-MET GmbH, Area Metallurgical Process Efficiency and Circularity, Leoben, Austria
[2)] Chair of Waste Treatment Technology and Waste Management, Technical University of Leoben, Leoben, Austria

Delegated Regulation (EU) 2025/606 has governed how the recycling efficiency (rRE) and material recovery rate (rRM) of waste batteries are calculated since 24 July 2025; first reporting year is 2026. Regulation (EU) 2023/1542 requires 65 % rRE for lithium-based batteries by 2025, 70 % by 2030, and rRM of 90 % for cobalt, copper and nickel and 50 % for lithium by 2027. Reporting is the duty of the first recycler for the entire chain, and competent authorities verify completeness, accuracy and consistency. Both formulas look simpler than they are. Between the weighed ton and the reported percentage lie system boundaries, element-level balance limits, downstream recovery rates and source assignments; each permissible, none neutral. Dismantled components count towards the input, black mass is an intermediate fraction rather than an output, and the rRM reference value covers only the cell interior. Until 2029, including oxygen, chlorine, sulphur and cell-level carbon, iron and phosphorus is optional; from 2030 the latter three are mandatory, so a comparison across that date contrasts accounting systems, not operating years. The data basis is equally fragile: battery passports will not reach recyclers for years and exclude portable batteries, so input compositions must be reconstructed from the analysis of all output streams, with sampling design governing how much the result can bear. A model calculation quantifies the effects: crediting pre-treatment fractions in full shifts the result by six percentage points and the assumed black mass recovery by 4.5—together twice the step from 65 % to 70 %—while one source-assignment decision moves rRM(Cu) by over 30 percentage points, more than any realistic process optimisation. A low rate may therefore indicate pre-treatment bottlenecks, irreversible losses or a missing market for a secondary material rather than a poorly run plant: rRE and rRM are diagnostic values, not performance ratings. The contribution argues for reporting every rate together with its system boundary, input composition, exercised element-level options, the origin of downstream recovery rates and the analytical uncertainty, and for harmonised, auditable calculation guidance. Transparently communicated assumptions are themselves a form of quality assurance; without them a percentage is neither comparable nor reliable—and devoid of value and meaning.

Optimized separation of separator foil in lithium-ion battery recycling – Revised TUBAF process

Simon Franz Bendl[1], Alexandra Kaas[1], Thomas Mütze[2] & Urs Alexander Peuker[1]
[1)] TU Bergakademie Freiberg Institute of Mechanical Process Engineering and Mineral Processing, Germany
[2)] BASF Battery Materials and Recycling Schwarzheide GmbH, Schwarzheide, Germany

For the recycling of lithium-ion batteries (LIB), it is imperative to identify and utilize optimal process conditions in order to achieve high yields. High yields are not just necessary because of economic reasons but also to meet the targets from the EU battery directive. This regulation requires a recycling efficiency up to 95 % in the year 2031 for specific elements like nickel, cobalt, manganese and lithium.

The battery recycling process used in this study combines an initial crushing and drying of battery cells under vacuum, further separating and sorting are applied as important sub-processes of the battery fragments. An optimized separator foil separation is developed. Therefore, the efficiency of sieving is compared with that of conventional zigzag air classification to separate the separator foil from other components.

Sieving improves the separation process by reducing the impurities in the separator fraction (90 % reduction of black mass impurities) while simultaneously achieving higher recovery rates for the separator. Additionally, this change increases the recycling rate of nickel in the so-called black mass (BM) by 2.8 % points. Furthermore, one process step can be eliminated, which reduces investment and operating costs. as well as dust losses.

Integration of Biohydrometallurgical Strategies into Hydrometallurgical Lithium-Ion Battery Recycling

Reinhard Lerchbammer[1], Matthias Mandl[2], Luca Kolonovits[2] & Eva Gerold[1]
[1)] CD Laboratory for Advanced Recycling of Lithium-Ion Batteries, Chair of Non-ferrous Metallurgy, Technical University of Leoben, Leoben, Austria
[2)] Technical University of Leoben, Chair of Non-ferrous Metallurgy, Leoben, Austria

The rapidly growing use of lithium-ion batteries in electric vehicles and stationary energy storage systems is increasing the demand for efficient and sustainable recycling processes. Pyro- and hydrometallurgical processes are currently considered state-of-the-art for recovering critical raw materials from end-of-life lithium-ion batteries; however, they are associated with comparatively high energy and chemical consumption as well as significant environmental impact. Therefore, alternative and complementary process concepts are needed to improve the sustainability and resource efficiency of future recycling routes. Against this backdrop, biohydrometallurgy represents a promising approach to complement conventional recycling methods. By utilizing microbial metabolic processes, it enables the selective mobilization of metals under mild process conditions. To evaluate this potential, the Chair of Nonferrous Metallurgy at the Technical University of Leoben conducted bioleaching experiments using Acidithiobacillus thiooxidans and Gluconobacter oxydans. In these experiments, direct “one-step bioleaching” and indirect “spent-medium bioleaching” were systematically investigated with regard to their suitability for leaching metals from lithium-ion battery black mass. The results of this work show that biohydrometallurgical processes have the potential to specifically complement hydrometallurgical recycling routes. Through a systematic comparison of “one-step” and “spent-medium bioleaching,” the respective advantages and disadvantages of both process concepts were identified, and their suitability for different applications was evaluated. From this, concrete approaches to process optimization as well as recommendations for integrating biohydrometallurgical process steps into future recycling routes can be derived.

Chemical characterisation of black mass resulted from crushing lithium-ion-batteries

Cornelia Rutkowski[1] & Thomas Nigl[1]
[1)] Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Technical University of Leoben, Leoben, Austria

The European Battery Regulation (EBR 2023) tightens requirements for recycling efficiency, material recovery and data quality, placing the reliable characterization of “black mass” to lithium-ion battery (LIB) recycling. Black mass is a highly heterogeneous mixture of electrode and cell components that challenges representative sampling and accurate, matrix-robust quantification of major and minor elements.

Because analytical results directly feed into the calculation of recycling efficiency (rRE) and target-material recovery rates (rRM), methodological choices in sample preparation, digestion and measurement critically affect regulatory compliance and comparability across recyclers. In a multi-partner interlaboratory comparison study involving industry and academia, we benchmarked commonly used analytical routes (XRF/pXRF, XRD, ICP-OES/MS, chromatography, elemental analysis) on identical black-mass samples.

The study highlights substantial interlaboratory variability driven by differences in sample preparation, digestion and data treatment, underscoring that methodological choices directly affect the calculation of recycling efficiency and recovery rates, as well as third-party verification. While rapid, low-infrastructure screening methods are attractive for operational reasons, they do not consistently meet user requirements for precision and regulatory compliance. In contrast, standardised wet-chemical digestion followed by ICP-OES provides a pathway toward results across laboratories. We therefore advocate the establishment of harmonised, fit-for-purpose protocols, covering sampling, digestion and measurement, as the analytical foundation for reporting under the EBR.

Developing TEO – advanced waste incineration and residual management for the municipality of Ljubljana

Nora Fricko[1], Dominik Gappmaier[1], Bernhard Kronberger[1], Franz Peter Walder[1] & Gregor Golja[2]
[1)] CONENGA Group, Vienna, Austria
[2)] Energetika Ljubljana, Ljubljana, Slovenia

The development of the TEO waste-to-energy (WtE) facility in Ljubljana represents a major step toward the decarbonization of district heating and the modernization of waste management infrastructure in Slovenia. Designed as a substitute for coal-fired heat generation, the project integrates advanced fluidized bed combustion technology with state-of-the-art flue gas cleaning and energy recovery systems. A key success factor lies in the structured, multidisciplinary project approach, which brings together technical, economic, legal, and environmental expertise. Through iterative validation of fundamental design parameters and continuous stakeholder alignment, interface risks are minimized, planning uncertainties are reduced, and overall system integration is significantly improved. The plant concept is based on optimized fuel preparation at the existing RCERO facility, where municipal solid waste is processed into high-quality refuse-derived fuel (RDF) and digestate streams. These fractions are transferred to the TEO facility and stored in a bunker system, ensuring both emission control and operational flexibility. Thermal treatment is carried out in two fluidized bed incineration lines with a combined throughput of approximately 130,000 tonnes per year. Compared to conventional grate-fired systems, fluidized bed technology enables superior energy efficiency, uniform temperature distribution, and reduced pollutant formation due to staged combustion conditions. The energy recovery process is designed as a combined heat and power (CHP) system based on a back-pressure turbine. Live steam is generated at approximately 64 bar and 420 °C and expanded to produce electricity while maintaining a pressure level suitable for district heating supply. The plant is therefore optimized for heat-driven operation, providing approximately 47 MW of thermal energy alongside around 12 MW of electricity under nominal conditions. A comprehensive multi-stage flue gas cleaning system is designed to consistently achieve emission levels at the lowest end of and below BAT limits. The system includes hot gas cyclones, fabric filters with activated coke injection, wet scrubbers for acid gas removal, and selective catalytic reduction for nitrogen oxide abatement. Complementary wastewater treatment and residual handling systems further minimize environmental impacts (also well below BAT limits) and ensure safe stabilization and disposal of by-products. In addition to the core design, optional enhancements such as sewage sludge integration and flue gas condensation are evaluated. These measures offer further potential for increased energy efficiency, improved resource recovery, and enhanced operational flexibility, particularly in the context of low-temperature district heating networks. Overall, the TEO project demonstrates how integrated engineering and structured project management can deliver a flexible, efficient, and environmentally compliant WtE facility with the potential to serve as a benchmark in Central and South-Eastern Europe.

Copper Speciation in Bottom Ash from Municipal Solid Waste Incineration

Philipp Hänggi[1], Gisela Weibel[1], Mirjam Wolffers[1], Alexander Weh[1], Rainer Dähn[2] & Sergey Churakov[1,2]

[1)] University of Bern, Competence Centre for Secondary Raw Materials, Switzerland

[2)] Paul Scherrer Institute PSI, Laboratory for Waste Management, Villigen, Switzerland

Copper is one of the environmentally relevant trace elements in municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash and its release is strongly controlled by its chemical speciation. While previous studies have mainly focused on the effects of combustion conditions and subsequent ageing, the influence of post-combustion processing on copper speciation remains poorly understood. In this study, five bottom ash samples from Swiss MSWI plants representing different discharge and processing routes were investigated. Mineralogical composition was determined by X-ray diffraction (XRD), while copper speciation was analyzed using synchrotron-based X-ray absorption spectroscopy (XAS). The results reveal pronounced differences in both mineralogy and copper speciation between the investigated bottom ash samples. Copper oxides, copper sulfides, and metallic copper were identified as the dominant Cu species. In contrast to the relatively constant proportion of metallic copper (10–15%), clear differences were observed for the oxide phases. CuO predominates in wet-discharged bottom ashes, whereas Cu_2O is the dominant oxide species in dry-discharged materials, indicating that contact with water during discharge and processing promotes the oxidation of Cu^{+} to Cu^{2+}. Furthermore, the bottom ash subjected to wet mechanical processing exhibited a substantially higher fraction of copper sulfides than the other samples, suggesting either preferential enrichment or possible secondary sulfide formation during processing. These findings demonstrate that post-combustion processing influences not only the total copper content but also its chemical speciation. Consequently, processing routes may affect the environmental behavior and release potential of copper from MSWI bottom ash and should therefore be considered when evaluating treatment strategies and resource recovery.

Securing raw materials through circularity: the potential and limitations of powder metallurgy recycling routes for high-speed steel and NdFeB magnets

Kathrin Greiff[1], Jacqueline Rosefort[1], Wiebke Hagedorn[1] & Anna-Caroline Assmann[1]
[1)] Chair of Anthropogenic Material Cycles, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

With the background of the EU Critical Raw Materials Act and growing geopolitical tensions, securing critical raw materials through circular value chain strategies is becoming increasingly important. At the same time, the question arises as to what extent innovative recycling routes contribute to an overall reduction in environmental impact, or whether they generate new environmental burdens, particularly through increased energy consumption. This paper presents key findings from the GENESIS research project (EnerGieeffizi-ENtE KreiSlaufwirtschaft kritischer RohStoffe), in which powder metallurgical recycling routes for high-speed steels (HSS) and neodymium-iron-boron permanent magnets (NdFeB) were investigated and compared with conventional production pathways. In addition to the technical feasibility analysis, a comprehensive environmental assessment was carried out using product demonstrators via life cycle analysis in accordance with DIN EN ISO 14040/44. The product demonstrators consist of a HSS cutting disk with a diameter of 120 mm and a mass of 150 g for the high-speed steel material stream, as well as two anisotropic NdFeB magnets weighing 20 g each and one isotropic NdFeB magnet weighing 40 g for the neodymium-iron-boron material stream. The project results demonstrate technical feasibility whilst also showing that circularity does not necessarily go hand in hand with lower environmental impacts. Whilst critical raw materials can be conserved in the HSS demonstrator, the powder metallurgy manufacturing process (Field-Assisted Sintering Technology / Spark Plasma Sintering (FAST/SPS)) results in high energy consumption. By contrast, the circular production of NdFeB magnets – based on demagnetisation, crushing, screening and electro-discharge sintering (EDS) – has a lower environmental impact across all impact categories. Savings of up to 50 % can be achieved at the level of total production, as primary raw material extraction dominates the overall impacts. The sensitivity analyses carried out demonstrate that process parameters in material production, processing and manufacturing are key control variables. The results illustrate that the environmental performance of circular production pathways is largely determined by energy consumption, and that optimising raw material use alone is not sufficient to realise environmental benefits. Against this background, this paper – complementing the findings of the assessment of circularity and environmental impacts – discusses the extent to which the production systems under consideration could benefit from renewable and smartly interconnected energy systems. In this way, it demonstrates how circular production pathways can make a substantial contribution to securing critical raw materials without undermining the European Union’s energy and climate policy objectives.

From Residue to Resource: Shear Sands as a Strategic Secondary Raw Material for Circular Steel Industry

Paul Demschar[1], Thomas Kremlicka[1] & Klaus Philipp Sedlazeck[1]
[1)] Technical University Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

The transition of the European steel industry towards climate neutrality is fundamentally altering the role of waste management within industrial value chains. As steel production increasingly shifts from primary ironmaking routes to electric arc furnace (EAF) technology, scrap is becoming a key raw material for steel production. Consequently, the availability and quality of secondary resources are emerging as critical factors for the successful decarbonization of the steel sector. While established collection and recycling systems have been extensively optimized over recent decades, treatment residues and fine fractions generated during waste processing remain largely overlooked despite their potential contribution to resource supply.

From a waste management perspective, these material streams represent a particularly important challenge. Fine fractions are commonly separated from recycling processes due to their heterogeneous composition, unfavorable physical properties, and limited recoverability using conventional technologies. As a result, they are frequently directed towards disposal and are largely excluded from circular material flows. However, increasing resource demand and more ambitious circular economy targets require a reassessment of such residues as potential secondary raw material sources.

One example is shear sand, a fine-grained residue generated during scrap cutting operations. Although shear sand occurs at approximately 2 % of the treated scrap mass, it has received little attention in research and industrial practice and is currently disposed of predominantly in landfilling. Within the Austrian research project *MeteoR* (*Mechanical-Thermochemical Process Combination for the Recycling of Fine Fractions from Waste Treatments*), a dedicated mechanical processing concept was developed to recover valuable constituents from this material stream. The investigations demonstrated that 27.4% of the original shear sand mass can be recovered as EAF-grade ferrous scrap. Based on Austrian material flow data, this corresponds to a potential recovery of approximately 11,000 tonnes of scrap per year.

These findings illustrate the broader significance of treatment residues within the ongoing transition towards a circular economy. Rather than being regarded solely as unavoidable outputs of recycling processes, such residues should increasingly be understood as strategic resource reservoirs. The example of shear sand highlights how waste management can contribute not only to environmental protection and disposal security but also to the provision of secondary raw materials required for industrial transformation. Integrating treatment residues into resource management strategies therefore represents an important step towards strengthening circularity, improving resource efficiency, and supporting the decarbonization of energy-intensive industries.

Innovative Process Concepts for Metal Recovery and Recycling of Spent Refractory Materials from Non-Ferrous Metallurgy

Simone Sedlazeck[1], Wolfgang Premm[2], Stefan Steinlechner[2], Alexander Leitner[1], Dean Gregurek[1] & Andreas Köck[1]
[1)] RHI Magnesita GmbH, Leoben, Austria
[2)] Technical University of Leoben, Christian Doppler Laboratory for Selective Recovery of Minor Metals Using Innovative Process Concepts, Leoben, Austria

Used refractory materials from non-ferrous metallurgy constitute an underutilized secondary resource despite containing valuable metals such as copper and nickel as well as energy-intensive refractory raw materials. This study presents the development of an integrated recycling concept for the selective recovery of metals and the valorization of the refractory matrix within a closed-loop framework. For this purpose, spent magnesia–chrome and alumina–chrome refractory materials from copper and nickel smelting operations were comprehensively characterized and subjected to both mechanical and hydrometallurgical processing routes. Material characterization by optical microscopy, X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and Scanning Electron Microscopy (SEM) with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) revealed pronounced heterogeneity and the formation of distinct infiltration zones containing varying concentrations of metallic and oxide phases. Hydrometallurgical treatment based on hydrochloric acid leaching enabled substantial removal of copper and nickel while enriching chromium-bearing spinel phases in the solid residue. Subsequent leachate purification through neutralization precipitation and multi-stage cementation resulted in the selective production of a copper-rich product containing more than 90 wt.% Cu and a nickel-bearing concentrate. In parallel, the process solution was conditioned for downstream acid recovery. The metal-depleted leaching residues were successfully utilized in the production of new magnesia–chrome refractory bricks. The resulting products exhibited chemical, mineralogical, and thermomechanical properties comparable to those of conventional refractory formulations. In addition, several mechanical beneficiation techniques, including crushing, screening, magnetic separation, eddy-current separation, and electrodynamic fragmentation, were evaluated. While direct reuse of the residual fractions was not yet feasible due to insufficient metal depletion, the investigations demonstrated significant potential for metal liberation and enrichment. Particularly promising was the identification of distinct infiltration zones within the refractory bricks. Preliminary sensor-based sorting experiments using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) demonstrated the feasibility of automatically separating copper-rich from copper-poor regions, enabling targeted pre-concentration prior to further recycling. Overall, the results highlight the potential of combining mechanical, hydrometallurgical, and sensor-based technologies to establish a sustainable recycling strategy for spent refractory materials and to contribute to closing material loops in non-ferrous metallurgy.

Recovery of Valuable Resources from Secondary Raw Materials via Bioleaching at Pilot Scale

Clemens Habermaier[1], Sabine Spiess[1], Erik Viertauer[1], Christoph Thaler[2], Ludwig Birklbauer[2], Nina Neuwirth[2] & Marianne Haberbauer[1]
[1)] K1-MET GmbH, Linz, Austria
[2)] voestalpine Stahl GmbH, Linz, Austria

The transition towards a circular economy poses significant challenges for the steel industry, particularly due to the generation of large quantities of metallurgical dusts. These by-products contain valuable iron phases but are often enriched with zinc, which inhibits their direct recycling in blast furnace operations due to operational disturbances caused by zinc volatilization and deposition. Conventional metal separation processes are typically energy-intensive or environmentally burdensome, highlighting the need for alternative approaches. Bioleaching, based on the metabolic activity of acidophilic microorganisms, represents a promising and more sustainable solution for selective metal recovery.

The objective of this study was to develop an efficient bioleaching process for the selective removal of zinc from cast house dust and to investigate its transferability from laboratory to pilot scale. Laboratory experiments were conducted using acidophilic bacteria, with particular focus on optimizing key process parameters such as aeration rate, agitation intensity, and medium composition. Among the tested microorganisms, *Acidithiobacillus thiooxidans* exhibited superior performance due to its high sulfur oxidation rate and associated acid production, resulting in favorable leaching conditions.

Based on the experimental findings, a scale-up concept was developed for a stirred tank reactor with a working volume of 1,000 L, corresponding to a treatment capacity of approximately 125 kg of dust per batch. The scale-up strategy maintained geometric similarity and considered dimensionless parameters such as Reynolds number and power number to ensure comparable hydrodynamic conditions. Special emphasis was placed on oxygen transfer, described by the volumetric mass transfer coefficient (k_La), as it is critical for microbial activity. An appropriate combination of aeration (approximately 0.5 vvm) and agitation was identified to ensure sufficient oxygen supply while minimizing shear stress. The reactor design incorporated a dual-impeller system to achieve efficient mixing and gas dispersion.

Laboratory results demonstrate that bioleaching enables significant zinc removal, with leaching efficiencies of approximately 50% and residual zinc contents below 0.9 wt.% in the solid phase, while iron largely remains in the residue. Higher efficiencies of over 60% were achieved for dusts with elevated zinc contents. Initial pilot-scale experiments confirmed successful sulfur oxidation, with almost complete conversion of 10 g L^{-1} sulfur within seven days.

In conclusion, the study demonstrates the technical feasibility of scaling up a bioleaching process for metallurgical dust treatment. The findings highlight the importance of oxygen transfer and hydrodynamic conditions for process performance and confirm the potential of bioleaching as a sustainable approach for resource recovery in the steel industry and beyond.

Preparation of Secondary Fine-Grained Metallurgical Intermediate Products – From Feasibility Study to Plant Concept and Commissioning

Stefan Jäckel[1] & Justus Ihle[2]
[1)] POWPRO GmbH, Managing Director, Dresden, Germany
[2)] Feinhütte Halsbrücke GmbH, Head of Metallurgy, Halsbrücke, Germany

Feinhütte Halsbrücke GmbH operates one of the world's oldest non-ferrous metallurgical plants still in operation, with a history of more than 400 years at its current site. Today, the company produces high-quality tin and lead metals and alloys in a wide range of compositions, formats, and purity grades. In addition, advanced metallurgical expertise enables the sustainable and economically efficient recycling of almost all types of tin- and lead-bearing secondary materials.

To achieve the required product quality while minimizing energy and resource consumption, both primary and secondary raw materials must undergo suitable pre-treatment before smelting. A key factor for stable furnace operation is the preparation of an optimized furnace charge consisting of primary materials, slag-forming additives, reducing agents, and recycled process residues.

In the conventional process, most charge materials are mixed directly inside the rotary furnace. Only fine dusts recovered from the off-gas cleaning system are separately mixed with water and recyclable suspensions before being granulated. The resulting granules exhibit good handling properties and can be fed to the furnace with minimal dust formation.

As part of a major modernization project, a new preparation process was developed in which secondary materials from refining, reducing agents, and recovered dusts are mixed and granulated prior to charging the furnace. This improves the contact between carbon and oxidic materials, resulting in more efficient reduction reactions. The optimized process reduces carbon and energy consumption, shortens reaction times, increases furnace productivity, and significantly lowers dust emissions during material handling.

Because of the wide variety of feed materials and production batches, the granulated material must be stored for up to eight weeks. To improve storage stability and prevent segregation during handling, the process was extended by a downstream briquetting step, producing mechanically stable briquettes with improved handling characteristics.

The presentation provides an overview of one of the largest modernization projects at Feinhütte Halsbrücke GmbH, covering the development from the initial feasibility study and plant concept to the successful commissioning of the new preparation plant in 2024.

Zinc flexible RecoDust process

Wolfgang Reiter[1], Klaus Doschek-Held[2] & Christoph Thaler[3]
[1)] K1-MET GmbH, Area 1, Leoben, Austria
[2)] Technical University of Leoben, Chair of Thermal Processing Technology, Leoben, Austria
[3)] voestalpine Stahl GmbH, Linz, Austria

Future steel plants will generate dust with widely varying zinc contents, driven by differing electric arc furnace (EAF) feedstocks such as scrap blends, hot briquetted iron (HBI), or direct reduced iron (DRI). The RecoDust process is engineered to manage this variability by processing dusts of mixed composition and, contingent upon the specific settings of the Flash-Reactor (including temperature, residence time, and gas atmosphere), attaining zinc extraction efficiencies greater than 99%. The first product, RecoDust Slag (RDS), is low in zinc and can be recycled internally as a synthetic iron ore, replacing part of the burden in sinter, pellet, or direct-charge routes. Its consistent chemistry helps stabilise furnace operations while reducing the need for primary ore and minimising landfilling of EAF dusts. The second product, Crude Zinc Oxide (CZO), features a high ZnO content, making it a viable secondary raw material for zinc production and suitable for established routes such as Waelz processing or hydrometallurgical refining, with impurity levels manageable through downstream treatment. By decoupling iron and zinc cycles, RecoDust enhances circularity, cuts waste disposal, and increases flexibility in sourcing and operating conditions, allowing steelmakers to adapt to changing feedstock markets without sacrificing metal recovery or environmental performance.

This research is supported by K1-MET within the COMET framework and co-financed by industrial and scientific partners, including voestalpine Stahl GmbH and the Technical University of Leoben.

WattsOK? Reuse and Recycling of PV Modules – A Technological and Environmental Basis for Decision-Making

Simon Prüller[1], Therese Bouvier-Schwarz[2] & Thomas Nigl[2]
[1)] 2nd Cycle FlexCo, Amstetten, Austria
[2)] Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Technical University of Leoben, Leoben, Austria

The global expansion of photovoltaics is shifting the central question from building new capacity towards managing an ageing installed base. In Austria, gross electricity generation reached almost 81,900 GWh in 2024, of which 7,645 GWh were supplied by photovoltaics – an increase of 47.4 % over the previous year. With every module generation, the volume of modules removed during repowering, dismantling, damage events or technical upgrades grows, and for each of them a decision is required: reuse or high-quality recycling.

This paper argues that the actual bottleneck of a circular photovoltaic system is not recycling at end of life, but the quality of the decision taken at module level. A robust decision requires industrial throughput, standardised diagnostics, documented test results and complete traceability. In practice, modules are still frequently assessed using simple criteria such as residual power output or visible damage. Safety- and ageing-related defects – backsheet damage, delamination, cell cracks, potential-induced degradation, hotspots or defective bypass diodes – cannot be detected reliably in this way. At the same time, the authors' own test data indicate that the power degradation of defect-free crystalline silicon modules is often lower than commonly assumed. The critical issue is therefore not ageing as such, but individual defective modules within a fleet.

The regulatory framework increasingly addresses PV modules as a waste and resource stream, yet a structural tension remains, described here as the reuse paradox: reuse is beneficial only where technical safety, residual performance, traceability and a secured end-of-life pathway are ensured. Otherwise, modules are withdrawn from controlled collection and treatment, which hampers the build-up of specialised recycling capacity. Reuse and recycling are consequently not opposites – both depend on the same prerequisite, a standardised, scalable and documented decision at module level.

Using the example of 2nd Cycle FlexCo, the paper describes an automated testing and treatment platform that characterises used modules at laboratory quality but with industrial throughput, and then assigns each module to a reuse or recycling pathway on a data basis. The system comprises a standardised logistics and automation interface (SolarBox), a reuse line combining AI-supported visual inspection, electroluminescence, dark I–V and flash measurement, UV fluorescence, bypass diode testing, spectrometry and automated insulation and leakage testing at a cycle time of 40 seconds per module, and a modular high-quality recycling line focused on low-stress deframing and controlled interface separation of the glass–laminate composite.

For the ecological assessment within the research project *WattsOK?*, scenario-based energy payback times (EPBT) were calculated largely on the basis of primary end-of-life data. A first assessment yields an EPBT of 0.78 years for the first life and 0.13 years for the second life, underlining the ecological benefit of PV reuse.

Holistic Assessment of Innovative Recycling Technologies for Photovoltaic Modules Compared to the State of the Art – Development of an Integrated Assessment Methodology within the PVReValue Research Project

Ferozan Azizi[1], Sonja Feldbacher[2] & Thomas Nigl[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] Polymer Competence Center Leoben, Leoben, Austria

The increasing deployment of photovoltaic (PV) systems is expected to result in a significant increase in the number of end-of-life (EoL) PV modules in the coming decades. In addition to complying with regulatory requirements, recovering valuable and critical raw materials such as silicon, silver and copper is becoming increasingly important in supporting a circular economy. While conventional recycling processes primarily involve mechanical size reduction and achieve high recovery rates for glass and aluminium, innovative separation technologies have the potential to recover higher-quality material fractions and enhance resource efficiency.

Within the Austrian research project PVReValue, a holistic assessment methodology is being developed to systematically compare innovative recycling technologies for crystalline silicon PV modules. This methodology considers the entire recycling process, including delamination, material upgrading and potential recovery pathways. Technologies are evaluated using an integrated framework comprising economic, technological, and environmental criteria. This approach enables transparent comparisons to be made between established and emerging recycling technologies, considering the interactions between individual process steps.

The proposed methodology provides a scientific basis for evaluating future recycling concepts and supports the identification of resource-efficient process chains for industrial applications. Furthermore, the flexible framework can be adapted to emerging recycling technologies and future PV module designs, thereby contributing to the advancement of sustainable photovoltaic recycling and circular resource management.

Feasibility Study for a Photovoltaic Installation on a Closed Municipal Landfill under Aftercare

Gernot Kreindl[1], Arne Ragossnig[2], Alois Kraußler[3], Marlies Hrad[4] & Michael Obriejetan[5]
[1)] Municipality of Leoben, Waste Management, Sewage Network & Environmental Management, Leoben, Austria
[2)] RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Vienna, Austria
[3)] 4ward Energy Research GmbH, Graz, Austria
[4)] University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria
[5)] University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Institute of Soil Bioengineering and Landscape Construction, Vienna, Austria

The increasing demand for electricity and the transition towards renewable energy sources are driving the search for suitable areas for large-scale photovoltaic (PV) installations. Brownfields, like closed municipal landfills, represent a promising opportunity for sustainable energy production while avoiding additional land consumption. This paper presents the feasibility assessment of a planned 4 MW_{peak} PV system on the former Seegraben municipal landfill in Leoben, Austria. The interdisciplinary study addresses technical, geotechnical, environmental, legal, and socio-economic challenges associated with the reuse of a landfill currently in the aftercare phase. Key issues include foundation concepts that preserve the landfill cap, landfill gas management, biodiversity enhancement, erosion control, grid integration, and public acceptance. Preliminary investigations indicate that landfill gas emissions are significantly lower than previously predicted and that the project is technically feasible under defined regulatory conditions. The study will deliver a detailed implementation concept, an economic assessment, and recommendations for the sustainable redevelopment of brownfields as well as former landfill sites as renewable energy hubs. The findings are expected to provide transferable knowledge for similar brownfield PV projects in Austria and beyond.

Circulyzer Technology – The Journey from University Lab to Factory Floor

Daniel Schwabl[1] & Markus Bauer[1]
[1)] Circulyzer GmbH, Leoben, Austria

This paper describes the development of the Circulyzer technology, illustrating its transition from fundamental university research to a commercially available industrial separation system. The technology was originally conceived to address one of the key challenges in plastic recycling: the efficient recovery of polyolefin-rich fractions from heterogeneous post-consumer plastic waste streams for chemical recycling. Its development was initiated within the framework of the Research Studios Austria (RSA) Plastic Reborn project at Montanuniversität Leoben, where research focused on identifying suitable waste streams, assessing their recycling potential, and developing an economically viable wet mechanical separation process.

The core of the technology is density separation with a centrifugal force separator operating with water as the separation medium. By exploiting density differences under enhanced centrifugal forces, the process enables the efficient separation of polyolefins from heavier plastics and inorganic contaminants. Laboratory and pilot-scale investigations demonstrated that the process is capable of producing high-purity polyolefin concentrates with high recovery rates from various industrial waste streams. These promising results formed the basis for patenting the technology and establishing Circulyzer GmbH as a university spin-off in 2020.

Following commercialization, the separator underwent several engineering improvements to meet industrial requirements. The design was optimized for modular integration into existing recycling facilities, while modifications to the separator geometry, process control, and maintenance accessibility increased operational reliability and reduced downtime. Industrial experience confirmed the robustness of the technology but also revealed that its most successful applications differed from the original expectations. Rather than primarily serving chemical recycling, the Circulyzer demonstrated very good performance in mechanical recycling processes, particularly for producing high-purity PET fractions from packaging waste.

In addition to conventional plastic recycling, ongoing research has identified several emerging application areas, including the recycling of synthetic textile fibers, the separation of materials from end-of-life photovoltaic modules, and the washing of metal chips using centrifugal cleaning principles. These results demonstrate the versatility of the technology and its adaptability to different material streams and industrial requirements.

The development of the Circulyzer technology highlights the successful transfer of scientific research into industrial practice through close collaboration between academia and industry. Furthermore, it demonstrates that technological innovation often evolves beyond its initial objectives, with market demands and operational experience guiding the identification of new application fields and creating additional opportunities for sustainable resource recovery and circular economy solutions.

Friction Washing of PP Flakes: Optimization of Water Consumption, Temperature, and Wash Water Reuse in Pilot Scale

Theresa Plesch[1], Mauricio Pane[1], Vipul Verma[1,2], Stefani Ozi[1], Moritz Mager[2], Jörg Fischer[2] & Bettina Muster-Slawitsch[1]
[1)] AEE INTEC, Wasser und Prozesstechnologien, Gleisdorf, Austria
[2)] JKU, Institute of Polymeric Materials and Testing, Linz, Austria

Friction washing is a key unit operation in mechanical plastics recycling, enabling the removal of surface contaminants from plastic flakes prior to further processing. However, operating conditions are often selected empirically, while quantitative information on the influence of water consumption, temperature, and wash-water recirculation remains limited. This study investigates the resource-efficient friction washing of polypropylene (PP) flakes at pilot scale. PP-flakes exhibiting low, medium, and high initial surface contamination were processed in a pilot-scale friction washing system. Surface contamination was quantified using a chemical oxygen demand (COD)-based analytical method. A design of experiments was conducted to evaluate the influence of water-to-plastic ratio and water temperature on cleaning performance. In addition, repetitive washing experiments and the reuse of treated process water were assessed. The results show that friction washing substantially reduces surface contamination within a single washing stage. For both low- and highly contaminated materials, contamination reductions exceeding 50% were achieved under ambient-temperature conditions. Increasing water input or temperature provided only limited additional benefits, indicating that efficient cleaning can be achieved under moderate operating conditions. Repetitive washing experiments demonstrated that the majority of removable contamination is eliminated within two washing stages, while additional stages yielded only marginal improvements. To enable process-water recirculation, an integrated ultrafiltration–nanofiltration treatment pilot plant was investigated. The treated permeate achieved cleaning performances comparable to, and in some cases better than those obtained with fresh water. These findings highlight the potential for reducing freshwater consumption and wastewater generation in mechanical plastics recycling. Overall, the study identifies ambient-temperature operation at a water-to-plastic ratio of approximately 1.0 as a robust and resource-efficient operating strategy. The results provide practical guidance for the optimization of industrial friction washing processes and support the development of more sustainable and circular recycling systems for polyolefin packaging waste.

Technology-Optimized Wet Processing in Plastic Recycling: Membrane Processes for Closed-Loop Wash Water Management

Eva Moritz[1], Jürgen Müller[1], Jasmin Schluz[1] & Alexander Rinderhofer[2]
[1)] Osmo Membrane Systems GmbH, Leonberg, Germany
[2)] GAW technologies GmbH, Graz, Austria

Within the work of the FFG research project circPLAST-mr – “Mechanisches Recycling von Kunststoffen: Von Abfall-Kunststoffen zu hochwertigen, spezifikationsgerechten Rezyklaten”, knowledge and expertise are being developed along the entire mechanical plastic recycling process. The aim was to identify, combine, and modify the required process steps in order to significantly improve the properties of recycled materials from both a technical and economic perspective. Together with research and industry partners, the washing process of plastic waste was investigated in detail, with a particular focus on optimization and the application of innovative technologies for efficient water treatment.

In existing recycling plants, wash water is often reused over multiple cycles, partially treated using conventional water treatment technologies (e.g., precipitation, flocculation, flotation), and fully replaced only after a significant decrease in quality. The continuous accumulation of contaminants in the washing medium negatively affects the cleaning efficiency of the washing process and leads to increased fresh water demand and disposal efforts. Therefore, the objective of this work was the treatment of wash water for reuse within a closed-loop system, as well as the improvement of cleaning performance through targeted control of water quality.

As an innovative approach, membrane-based water treatment processes are investigated, offering significant advantages compared to conventional technologies, including minimal chemical consumption, the absence of sludge generation, stable product water quality, and compact, easily scalable system concepts. In particular, multi-stage process combinations consisting of mechanical pre-filtration, ultrafiltration (for the removal dissolved components), and nanofiltration or reverse osmosis (for further partial or complete desalination of the wash water) were evaluated.

The work performed included laboratory-scale experiments using industrial wash waters to assess technical feasibility and determine relevant operating parameters. Based on these results, pilot-scale trials were conducted on a plastic washing line under semi-industrial conditions with varying operating parameters and water qualities. Different contaminated wash waters were treated using membrane-based processes.

The results obtained demonstrate the high potential of membrane-based treatment concepts for application in wet processing and wash water management in plastic recycling. The combination of different filtration stages enabled promising results regarding separation and purification performance, process stability, economically relevant operating parameters, and system robustness. Furthermore, a high-quality product water was generated, which contributed to improved washing efficiency during the recycling process. The research demonstrates that membrane technologies represent a promising, resource-efficient solution for the further development of future washing processes in plastics recycling.

Shaping the Future of Recycling: Innovations in Smart Plants and Emerging Material Streams

Sabine Schlögl[1], Wolfgang Köser[2], Tom Schmitt[3], Bastian Küppers[4], Xiaozheng Chen[5] & Nils Kroell[5]
[1)] STADLER Anlagenbau GmbH, Vertrieb DACH, Graz, Austria
[2)] STADLER Anlagenbau GmbH, Vertrieb DACH, Althausen, Germany
[3)] STADLER Anlagenbau GmbH, Vertrieb DACH, Leipzig, Germany
[4)] STADLER Anlagenbau GmbH, Verfahrenstechnik, Aachen, Germany
[5)] STADLER Anlagenbau GmbH, Digital Solutions, Altshausen, Germany

The circular economy is undergoing rapid transformation due to changing waste streams, evolving regulatory frameworks, and dynamic market conditions, creating a growing demand for innovation in waste sorting and recycling technologies. This paper presents STADLER's integrated approach to addressing these challenges through application-oriented research, continuous technological development, and digitalization. Emerging material streams, including textiles, household batteries, and construction and demolition waste, require the adaptation of established sorting technologies as well as the development of new technologies and plant concepts. Industrial-scale testing and close collaboration with both universities and customers enable the validation of innovative solutions under realistic operating conditions.

One important sector for innovations is digitalization, which has become a key enabler for increasing plant efficiency, transparency, and operational reliability. Intelligent sorting facilities reduce personnel requirements through automation, improve process stability, and ensure consistently high product quality. STADLER's digital platform, STADLERconnect, combines machine and material data to support adaptive process control, quality assurance, and predictive maintenance. Practical applications such as the "Downtime Tracker", "Blockage Detection", and "Predictive Maintenance" demonstrate how sensor-based monitoring can identify the root causes of disruptions to plant operation, detect developing failures at an early stage, and optimize maintenance strategies. Furthermore, the systematic evaluation of operational data provides valuable feedback for the continuous improvement of machine design and plant engineering.

This article presents examples of successful innovations in mechanical engineering and digital solution to address challenges arising from evolving waste streams, dynamic market demands, and changing customer requirements. These innovations enable more resilient and efficient waste processing plants while reducing operating costs through minimized downtime, optimized maintenance, lower personnel requirements, and stable product quality. As waste streams continue to evolve and regulatory requirements become more demanding, integrating digital intelligence into sorting plants will play an increasingly important role in ensuring the long-term competitiveness and sustainability of the recycling industry.

Recovery of Glass from Municipal Solid Waste Incineration Ash for the Container Glass Industry

Christoph Schipfer[1], Gerhard Stockinger[1] & Benedikt Sonnweber[1]
[1] Brantner green solutions, R&D, Krems, Austria

In Austria, the collection rate for waste glass reaches approximately 80–85%, leaving a significant share disposed of in residual waste streams. Particularly in urban areas, collection rates are substantially lower. When residual waste is treated in incineration facilities, the behavior of glass depends on the furnace technology. In fluidized bed incinerators, glass remains largely intact due to temperatures below its softening point, resulting in bottom ash containing up to 30% glass.

Brantner green solutions has operated wet ash treatment plants for over 15 years, producing a glass-rich fraction with a purity of approximately 90–93%. However, this material has not met the quality requirements for reuse in the container glass industry due to remaining contaminants such as ceramics, stones, porcelain (KSP), and trace metals. Conventional processing approaches achieve purities of 97–98%, suitable only for applications such as foam glass production, which do not support true circular material reuse.

To enable high-quality recycling, a novel processing concept was developed to upgrade this glass fraction into a furnace-ready secondary raw material for container glass production. Based on extensive material analyses and supported by research from the Christian Doppler Laboratory for Circular Economy, a new plant was designed and constructed. The process integrates multi-stage optical sorting, X-ray sorting, and complementary separation technologies to remove critical contaminants, including lead glass, ceramics, metal wires, and natural stones.

A key innovation is the implementation of an AI-based quality assurance system derived from the proprietary “HawkEye” technology. Using camera-based detection, the system automatically identifies glass fragments and residual impurities in real time and provides feedback to the process control system, enabling largely autonomous operation, including during nights and weekends.

The plant, commissioned in 2025, achieves a glass purity of up to 99.999%, meeting the stringent requirements of container glass manufacturers, where contamination limits are in the ppm range. Elevated lead content, a characteristic challenge of waste-derived glass, is effectively reduced to below 100 ppm. Approximately 80–85% of the input glass fraction is recovered as high-quality product, while all remaining fractions are valorized, ensuring zero non-utilizable waste streams.

The resulting product has achieved “end-of-waste” status and can be directly used in glass melting furnaces. This represents the first industrial-scale solution worldwide capable of converting glass from municipal solid waste incineration ash into a closed-loop material for container glass production.

The technology significantly contributes to increasing glass recycling rates, particularly in urban environments where collection deficits are most pronounced. Future challenges include regulatory alignment for attributing recovered glass quantities to official recycling rates. Overall, the developed process demonstrates a major advancement toward closing material cycles in the waste management and glass industries.

From Pilot-Scale Insights to Plant-Level Validation: Factors Influencing Ballistic Separator Performance

Alena Maria Spies[1], Annika Datko[1], Peter Bardenheuer[1], Abtin Maghmoumi[1], Karoline Raulf[1] & Kathrin Greiff[1]
[1)] Chair of Anthropogenic Material Cycles (ANTS), RWTH Aachen University, Aachen, Germany

Ballistic separators play a key role in the (pre)conditioning of lightweight packaging waste (LWP) by separating materials based on their physical properties. However, they are typically operated with fixed settings, so that the rotational speed of the paddles remains unchanged despite input variations, such as changes in material composition or varying throughputs. Adjusting the rotational speed of ballistic separators provides a potential approach for responding to such variations in LWP sorting plants.

This study investigates whether changes in material composition, particularly changes in the film content of the input, and variations in throughput can be addressed by adjusting the rotational speed of ballistic separators. For this purpose, large-scale technical trials were first conducted, and the results were subsequently validated in an operational LWP sorting plant. Trends observed at the technical-center scale were successfully reproduced at the plant scale. In addition, the results demonstrate that rotational speed is a suitable operating parameter for adjusting separator performance under varying input conditions, while material composition appears to affect process performance more strongly than throughput variations within the tested parameter range. In the long term, these findings may support the development of adaptive operating strategies for ballistic separators. Such strategies can contribute to improved circularity of packaging waste and help meet the more stringent requirements arising from current legislative frameworks.

Optimizing Preprocessing Pipelines for Near-infrared Hyperspectral Images to Enhance Classification Accuracy in Post Consumer Lightweight Plastic Packaging Waste Stream

Abtin Maghmoumi[1], Luz Alejo Alvarez[1], Alexander Feil[1] & Kathrin Greiff[1]
[1)] Department of Anthropogenic Material Cycles, RWTH Aachen University, Aachen, Germany

Near-infrared (NIR) spectroscopy has emerged as a key non-contact analytical tool across multiple industries, such as agriculture, food, textiles and recycling (especially plastic recycling). In plastic recycling, raw recorded data from an NIR sensor/camera can rarely be used directly for analysis. Several factors inherent to NIR spectroscopy, which are also intensified in plastic recycling settings undermine NIR sensor effectiveness, such as scattering, sensor noise or overlapping absorption bands. To resolve these effects the data is often preprocessed in a pipeline consisting of steps like standard normal variate (SNV) for baseline correction, Savitzky-Golay (SG) filter for smoothing and derivation. However, defining this pipeline is not straightforward as identifying the errors for correction in the raw data can be challenging. A good example is the postconsumer plastic packaging waste stream. Due to its heterogenous nature, determining the best preprocessing pipeline is demanding. Previous research tackled this problem with using the classification model performance as the objective of the optimization, however training hundreds of models to find the best preprocessing pipeline is intensive and can exhaust the resources rapidly. In this work we present a framework that selects an interpretable preprocessing pipeline by optimizing a dataset intrinsic class separability, the idea here to achieve same level of performance boost but with more efficient approach, in this case calculating the separability of classes in the dataset based on well established metrics. This approach was validated with different machine learning models, this is, after separability score was maximized, the models were trained on both raw and optimally pre-processed data to evaluate performance of this approach. The results indicate that optimized preprocessing improves classification accuracy of the model pool by up to 12% percentage points compared to no pre-processed data. We also observed that the optimized preprocessing will lead to lower false classification of challenging classes like differentiating between High-density polyethylene (HDPE) and Low-density polyethylene (LDPE) or Polyethylene terephthalate (PET) bottle and PET tray. Which is a substantial improvement and will lead to more accurate classification of the post-consumer plastic packaging waste stream.

Quality monitoring of recycled plastics – automatic inline prediction of plastics composition using Near-infrared spectroscopy

Jutta Geier[1,2], Katarina Marković[1,2], Márton Bredács[1], Mithun Goswami[3], Elisabeth Dippold[3], Juan Torres[3], Michael Jerabek[3] & Gernot Oreski[1,2]
[1)] Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, Austria
[2)] Chair of Materials Science and Testing of Polymers, Technical University of Leoben, Leoben, Austria
[3)] Science and Engineering, Borouge International, Linz, Austria

The performance and use of recycled plastics are often limited by reduced material quality compared to virgin materials. One major reason is the presence of residual contaminants, which can originate from heterogeneous waste streams and insufficient removal during the recycling process. Even low concentrations of foreign materials, such as foreign plastics or non-polymeric materials, can negatively affect the processing behavior, mechanical properties or long-term performance. Reliable quality assessment methods for recyclates are therefore required to support the production of higher-quality recyclates and products thereof.

Conventional offline or at-line analytical methods are often too slow or impractical for continuous monitoring of contaminant levels during recyclate production. Inline monitoring would enable material quality to be assessed directly during processing and would allow immediate corrective actions to be taken. This study investigates the feasibility of using a contactless near-infrared (NIR) analyzer for inline detection and quantification of low contaminant concentrations in polypropylene (PP) pellets. For this purpose, virgin PP was compounded with seven selected contaminants at defined concentrations. The formulations included both single contaminants and mixtures of multiple contaminants, with a focus on concentrations below 5 wt.%. Spectral data were acquired from the produced pellets using the NIR analyzer and evaluated using partial least squares regression.

The developed models showed high prediction accuracy, even at contaminant concentrations below 1 wt.%. Importantly, the approach enabled the simultaneous prediction of several contaminant concentrations within the PP matrix. These results demonstrate the potential of NIR spectroscopy for real-time quality monitoring, process optimization and future inline assessment of recycled PP material streams.

Fast on-site asbestos detection for construction and demolition waste using a miniaturized handheld near-infrared sensor

Felix Kronenwett[1], Georg Maier[1], Thomas Längle[1], Norbert Leiss[2] & Volker Thome[2]
[1)] Fraunhofer IOSB, Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation, Karlsruhe, Germany
[2)] Fraunhofer IBP, Institute for Building Physics, Valley, Germany

With the enforcement of the German Substitute Building Materials Ordinance, the responsibility for certifying recycled aggregates as “asbestos-free” has shifted to the processing companies. However, conventional laboratory methods (SEM/PLM) are time-consuming, costly and unsuitable for frequent on-site testing. This paper presents a sensor-based rapid screening method based on near-infrared (NIR) spectroscopy that has been implemented in a mobile, miniaturized handheld spectrometer. Through laboratory-based SWIR hyperspectral imaging of real and reference samples, two characteristic asbestos absorption bands were identified at approximately 1385 nm and 2320 nm. To adapt this to a cost-effective handheld point spectrometer, the measurement range was limited to the region around 1370 nm. Automated signal analysis is performed via a knowledge-based pipeline and integrated into a mobile app. In initial tests, all asbestos-free reference materials were correctly classified (true-negative rate of 100%). The detection limit for real samples depends heavily on the fiber content (with limitations at concentrations below 0.5%), the surface condition and the sample preparation. The system thus shows great potential as a fast, cost-effective quality assurance tool that can be used directly at the demolition site.

Detection and Sensor-Based Sorting of Tar containing Road Debris using Mid-Wave-Infrared Hyperspectral Imaging

Paul Bäcker[1], Georg Maier[1] & Thomas Längle[1]
[1)] Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation (IOSB), Karlsruhe, Germany

Tar-containing road debris can contain high concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and must therefore be separated from recyclable mineral material. However, PAH-contaminated fractions are often only sparsely characterized by chemical laboratory analysis, which makes selective sorting difficult. In this work, we investigate whether mid-wave infrared (MWIR) hyperspectral imaging can be used for sensor-based sorting of PAH-contaminated road debris. Since destructive chemical analysis is not available for each individual particle, we use the reaction of a PAH indicator spray as a proxy label. Samples are measured before and after spray application using aligned visual and near infrared (VNIR) and MWIR hyperspectral imaging. From the VNIR data, we derive a yellowness-change metric representing the spray response and train a lightweight multilayer perceptron to predict this response from MWIR spectra. Spectral analysis shows pronounced differences between high and low spray-response pixels, particularly around 3300 nm. The trained model is deployed on a real-time sensor-based sorting system and evaluated in sorting experiments with subsequent chemical laboratory analysis of the output fractions. The results show that MWIR-based sorting can substantially reduce the PAH concentration in the accepted material fraction, demonstrating the practical potential of the proposed approach for recycling road debris.

Detection of Wood Preservatives Using XRF Sensor Line – Implication for Inline Sorting of Waste Wood Streams

Moritz Ottenweller
Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS, Development Center X-ray Technology, Fürth, Germany

This study investigates the use of X-ray fluorescence analysis (XRF) for sensor-based sorting of waste wood. The objective is to reliably detect wood fractions contaminated with wood preservatives prior to energy recovery. For this purpose, a laboratory setup consisting of an X-ray tube, three energy-dispersive SDD detectors, and a conveyor belt system was established. The measurement geometry, including angles and distances, was systematically varied to evaluate its influence on signal intensity and scattering processes. Prepared wood samples with defined concentrations of copper, chromium, lead, cadmium, and chlorine, as well as untreated reference wood, were used as test materials. Static measurements with integration times of up to 1 s and dynamic measurements with an integration time of 20 ms on a moving conveyor belt were performed. In the static measurements, the Kα peaks of copper, chromium, and cadmium, as well as the Lα peaks of lead, were clearly detected and distinguished from untreated wood. In the fast inline measurements, these signals remained detectable for most concentrations, whereas chlorine could only be reliably detected under the most favorable geometrical conditions. Overall, the results demonstrate that XRF is generally suitable for inline sorting of waste wood, but requires a robust measurement geometry and powerful evaluation algorithms.

Sensor data alignment for sensor fusion in real-time waste analytics and sensor-based sorting

Karim Khodier[1] & Martin Leitgeb[2]
[1)] axtesys GmbH, Process Digitization, Graz, Austria
[2)] axtesys GmbH, System Integration, Graz, Austria

The digital transformation of waste management is a key driver for improving mechanical processing and ensuring quality-assured material concentrates, thereby contributing to the increased recycling rates mandated by the European Union. A fundamental component of digitally optimized, intelligent waste processing is the provision of high-quality sensor data regarding heterogeneous waste streams. This work addresses the challenge of fusing multimodal data from diverse sensors characterized by varying physical positions, spatial resolutions, and sampling rates. The system under investigation integrates optical RGB sensors, Near-Infrared (NIR) spectroscopy, 3D depth sensoric, and inductive metal sensors. Because these sensors are physically offset due to distinct technical and lighting requirements, and vary in frequency and resolition, an individual waste particle appears across data streams as multiple discrete entities with mismatched geometries and arrival times. In the investigation at hand, a sensor fusion architecture based on the approach of elliptical approximation was examined. Rather than relying on conventional bounding boxes, the spatial distribution and orientation of each particle are mathematically described using its covariance matrix. Utilizing algorithms such as Principal Component Analysis and Extended Kalman Filters, unstructured sensor inputs are transformed into elliptical models where the semi-axes correspond to the directional variances of positional measurements. Data association across different sensor modalities is subsequently executed by utilizing the Mahalanobis distance, which accounts for the geometric shape and orientation of the ellipses. This methodology allows sensor data points to be mapped onto the physical geometry of individual waste particles.

Field-Scale PFAS Elimination Using a Combined process of Flotation and Electrochemical Oxidation

Josefine Pfeiffer[1], Peter Müller[1], Robert Mischitz[1], Florian Klapal[2] & Mark Hlawitschka[2]
[1)] ferroDECONT GmbH, Leoben/Niklasdorf, Österreich
[2)] JKU Linz, Institut für Verfahrenstechnik, Linz, Österreich

Before the toxicity risks associated with PFAS were recognized and became a matter of public and regulatory concern, these substances were widely used in numerous industrial applications and firefighting agents due to their versatile physicochemical properties. As a result, PFAS were released into the environment and groundwater through various pathways, including major fire events and firefighting training exercises. One designated PFAS-contaminated site in Austria is located in Lebring, Styria, where repeated firefighting training exercises using aqueous film-forming foam (AFFF) resulted in the formation of an approximately 5 km long contaminant plume. Activated carbon is commonly applied for the remediation of PFAS-contaminated water. However, once saturated, it must either be regenerated through complex processes or disposed of in landfills. Moreover, PFAS remediation often involves the treatment of large water volumes with comparatively low contaminant concentrations, which can reduce the overall efficiency of conventional treatment approaches. Within the KPC-funded project “PFASolve”, ferroDECONT GmbH developed an innovative combined treatment process that links a concentrating step with a destructive treatment step. As project partners, the chair of process technology at Johannes Kepler University Linz (JKU) contributes its experience in the design and operation of the reactor geometry, while RM Umweltkonsulenten ZT GmbH provides expertise in sampling and groundwater monitoring. In this approach, PFAS are first concentrated by flotation and subsequently degraded by electrochemical oxidation. Without the addition of additives or foaming agents, concentration of up to 3,000 was achieved. Subsequent electrochemical treatment reduced the contaminant concentration by approximately 99.1%.

Microbial remediation of groundwater contaminated with volatile organic compounds using food-grade biosurfactants

Roman Prantl[1], Daniel Ruech[2] & Thomas Reichenauer[3]
[1)] blp GeoServices GmbH, Vienna, Austria
[2)] Sensatec GmbH, Ulm, Germany
[3)] AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Tulln, Austria

The primary objective of this research project was to investigate the use of food-grade surfactants as solubilizers for the microbial degradation of chlorinated hydrocarbons (CHCs). Since microorganisms can usually metabolize these contaminants only when they are in dissolved form, the solubilization of the contaminants represents a rate-limiting step in microbial degradation. Therefore, the anaerobic microbial degradation of chlorinated hydrocarbons in groundwater is to be accelerated and enhanced through the use of surfactants. The surfactants are intended to act both as solubilizers for the contaminants and as co-substrates for the microorganisms that reduce chlorinated hydrocarbons.

To achieve the project objectives, potential sites for conducting a field trial were first identified and evaluated, and extensive laboratory tests were carried out to investigate the effects of adding surfactants on the solubilization and microbial degradation of LHKW, as well as to determine suitable surfactants and their appropriate concentrations. Building on the laboratory studies and site surveys, a field trial was conducted at the site of a former dry cleaner during the final phase of the project.

In the laboratory tests, researchers investigated not only the mobilizing effect of the surfactants but also whether - and at what concentrations - the surfactants exert an inhibitory effect on the microorganisms. Based on these findings, suitable surfactants and their concentrations were identified. Furthermore, laboratory degradation tests using the enriched Dehalococcoides culture from the specific site, soil material from the surrounding area, and the selected surfactant Faliten demonstrated complete dechlorination of tetrachloroethene, via cis-1,2-dichloroethene and vinyl chloride, to ethene.

These findings led to a field trial conducted at a dry-cleaning facility. In the contaminated area, molasses was first added to adjust the environmental conditions; subsequently, a solution containing the surfactant “Faliten” was added to mobilize the existing LCKW contamination and make it available for degradation. As a result of these additions, the LCKW concentrations in the groundwater were increased in some cases by a factor of 10, and microbial degradation down to cis-1,2-dichloroethene was demonstrated. However, the microbial activity caused operational disruptions at the remediation facility due to heavily clogged filters. Therefore, bioaugmentation was discontinued, and complete degradation down to ethene and ethane could only be demonstrated in laboratory experiments. Nevertheless, the mobilizing effect of the chemical additions was also very evident in the field trial.

PFAS – removal in landfill leachate – experience from the field

Frank Natau[1] & Matthias Berg[1]
[1)] OVIVE GmbH, German Agency, Emmendingen, Germany

Despite the realisation of advanced concepts of waste minimization, waste prevention and waste reutilisation sanitary landfilling is still an important element for disposal of waste and residues. For the control of occurring liquid emissions landfill operators are able to use a variety of long term proven technologies – often a combination of eliminating and/or separating and/or adsorbing processes. These modular systems allow required removal of critical water substances from leachate arising from organic fractions, ammonia, heavy metals, AOX, salts etc. for final disposal of pre-treated waste water to sewer or surface water.

Global environmental discussions brought additional PFAS on the board. It describes a huge variety of synthetical produced chemicals, which appear in many different variations. They are in general persistent to the environment. Due to its widespread use in all sections of societies since mid of last century PFAS can be found in a lot of day to day products globally. As a consequence every landfill is supposed to be a Hot Spot for PFAS - emissions with higher concentrations in leachate - and this will continue for many years to come. Due to this increasing risks EU - regulated discharge conditions for PFAS with very low effluent limitations are currently under discussion.

PFAS removal rates from different full scale leachate treatment installation in EU will be presented – in total and partly in single process steps. Even the results show some single general “PFAS behaviour” the detailed analysis require that individual substances show individual behaviour. This indicates that the removal of PFAS from leachates is not a simple task and will involve advanced processes – with all their pros and cons. Selectivity is an important topic – so called long chain PFAS can be removed far more easy than short chain PFAS. This requires lab testing upfront, piloting in the field incl. detailed studies of local situation on each individual landfill. It is possible to achieve “ZERO – PFAS” emission in case needed. Finaly the importance of remaining residues will be highlighted – incl. its impact on commercial figures for full scale operation of a leachate treatment plant for decades.

Environmental and Life Cycle Assessment of DK0 Landfill Mining

Lea Hoffmann[1], Daniel Vollprecht[1] & Jan Paul Lindner[1]
[1)] University of Augsburg, Institute for Materials Resource Management, Augsburg, Germany

In the past, mineral waste was primarily landfilled. Today, the resulting resource potential of existing landfills is receiving increasing attention, driven by resource scarcity, growing land-use conflicts, and the limited availability of landfill capacity. Against this backdrop, the concept of landfill mining, defined as the systematic excavation of landfills for the recovery of reusable materials, is becoming increasingly relevant. In recent years, this approach has been intensively studied as part of national and international research projects such as LAMIS and NEW-MINE. However, the focus has been predominantly on municipal waste landfills, while mineral DK0 landfills, where excavated soil, construction and demolition waste, and industrial mineral residues such as coal fly ash or steel mill slag are deposited, have thus far received little systematic attention. This is where the collaborative research project RueBe is situated. The aim of the project is to reintroduce already landfilled or planned-to-be-landfilled mineral waste into sustainable construction material cycles. For this purpose, materials are processed using wet mechanical treatment to remove contaminants and impurities, separated into coarse and fine fractions, and, after quality control, made available as secondary raw materials. This conference presentation will introduce concepts and initial results regarding the environmental and ecological assessment of the processes studied and the secondary raw materials obtained.

Optimized Conditioning of Incineration Residues for Landfill Space Conservation and Emission Reduction

Alexander Weh[1], Gisela Weibel[1], Philipp Hänggi[1] & Patrick Kämpfer[1]
[1)] University of Bern, Competence Center Secondary Raw Materials, Bern, Switzerland

Current disposal practices for combustion residues in Switzerland vary considerably between individual landfills. While some sites rely on mono-compartment disposal, others deposit the different combustion residues in layers. Dedicated mixing plants that enable homogeneous blending of combustion residues under controlled water addition, however, are not yet in operation anywhere. In addition, combining emitting waste streams with adsorbing materials - such as biochar or other binders - is increasingly being discussed as a means of retaining potential leachate emissions within the landfill body itself, thereby achieving both structural and emission-reducing effects.

The results of the SENKATO project series show that improved conditioning and adapted installation practice offer clear advantages for both installation and emissions. Through effective mixing and an optimal water content of combustion residues on landfills, leachate emissions are reduced, thereby lowering environmental burdens and reducing aftercare costs. At the same time, landfill space can be used more efficiently, reducing the need for new landfill construction and the associated impacts on nature and landscape. Adapted installation practice also results in lower dust emissions, thereby improving working conditions for landfill personnel.

Landfill-on-Landfill: Planning, Construction and Operation of a Class I Landfill on a Closed Class II Landfill

Detlef Löwe[1] & Roland Haubrichs[2]
[1)] AGR Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet mbH, Herten, Germany
[2)] LAMBDA Gesellschaft für Klimaschutz und regenerative Energien mbH, Herten, Germany

The project at Zentraldeponie Datteln demonstrates how a closed Class II landfill can be safely reactivated and upgraded by constructing a new Class I landfill section on top of the existing landfill body. The concept creates urgently needed disposal capacity for mineral and non-recyclable waste while avoiding additional land take.

PROJECT BACKGROUND: The Landfill Zentraldeponie Datteln had been operated since 1974 and originally received municipal solid waste corresponding to today's Class II landfill classification and entered its first closure phase in 2008. Due to the growing shortage of Class I landfill capacity, AGR decided in 2015 to reactivate part of the site. The project followed the principle of "landfill-on-landfill": existing landfill structures were reused instead of developing a new greenfield landfill site.

TECHNICAL CONCEPT: The decisive engineering element is a bifunctional liner system. It separates the old Class II landfill body from the new Class I landfill. The system includes levelling and support layers, mineral sealing layers, a geomembrane, protective layers and a drainage layer. A key design challenge was long-term deformation. The old Class II landfill body acts as the foundation of the new Class I landfill. Therefore, slope stability, settlement of the natural subsoil, compression of the old waste body and residual biological subsidence were essential for permitting and for proving the long-term serviceability of the liner and drainage system.

PERMITTING, CONSTRUCTION AND OPERATION: The project was approved through a formal planning approval procedure. The application submitted in 2016 included several studies. After public participation, consultation with authorities and an official hearing, the planning approval was issued in August 2017. Construction started shortly afterwards and was implemented in several phases, enabling early commissioning while allowing operational experience from the first sections to be incorporated into later construction stages. Waste placement is supported by GPS-based machine control, enabling accurate shaping of the landfill body without traditional staking. Regular UAV surveys provide digital terrain models. Separate leachate collection for the old Class II body and the new Class I landfill section ensures controlled treatment of both water streams. Existing landfill gas systems were adapted and supplemented to maintain gas collection, reduce methane emissions and support the project's climate protection objectives.

CONCLUSIONS: The Datteln project shows that landfill-on-landfill can be a technically sound and resource-efficient approach. It is not a solution that can be copied blindly: each site requires its own stability checks, settlement prognosis, drainage verification and assessment of gas and leachate infrastructure. Where these requirements are met, the concept can contribute significantly to disposal security, land conservation and climate protection. The project therefore represents a strong practical example of how existing landfill sites can be developed further instead of being treated only as closed assets.

RE-LAND Research Project: Contaminated Sites and Brownfields as a Resource

Daniela Sager[1], Christian Blothe[2] & Soraya Heuss-Aßbichler[2]
[1)] GEOCONSULT ZT GmbH, Puch bei Hallein, Austria
[2)] Ludwig-Maximilians-Universität München, Chair of Geology, Munich, Germany

Land recycling of contaminated sites and brownfields is a key objective of environmental policy and sustainable land management. Risk-based and site-specific remediation approaches are widely applied. However, limited data availability and the lack of harmonized assessment criteria can create uncertainties and hinder the comparability of land recycling projects. Transparent evaluation frameworks are therefore essential for effective decision-making.

The RE-LAND research project addresses this challenge by considering contaminated sites and brownfields as a resource in terms of land and soil rather than solely as environmental burdens. To support this perspective, the project adapts the United Nations Framework Classification for Resources (UNFC) to contaminated land management. Based on the UNFC dimensions of environmental-socio-economic viability (E-axis), technical feasibility (F-axis), and confidence in available information (G-axis), a multidimensional assessment and classification framework will be developed for land recycling projects. It enables the systematic evaluation of project maturity, feasibility, uncertainty, and risk. Unlike conventional approaches focused primarily on contamination and remediation requirements, the RE-LAND framework also considers project development and value creation through land recycling. Relevant factors include social acceptance, legal conditions, and the long-term reintegration of land into the economic cycle. For anthropogenic resources, the SARA*4*UNFC methodology (Structured Anthropogenic Resource Assessment for UNFC) was developed within the Horizon Europe project FutuRaM as a structured assessment approach that forms the basis for subsequent classification. Within RE-LAND, this methodology will be adapted as SALAR*4*UNFC (Structured Assessment for Land as a Resource within the UNFC framework), transferring the SARA*4*UNFC architecture to land and soil. This improves transparency, supports decision-making, and provides a common basis for communication among authorities, landowners, planning teams, investors, and the public.

The practical applicability of the assessment developed within the project is initially demonstrated through a retrospective assessment of the historical contaminated site “Sattler” in Germany. The case study highlights the potential of UNFC to assess land recycling projects from a resource-oriented perspective rather than solely as environmental burdens. It also shows that the project’s assessment criteria provide an initial basis for identifying project-specific weaknesses and implementation challenges at an early stage.

In-situ remediation of a chromate-contaminated groundwater site at the former Schoch industrial area in Stuttgart using an innovative injection technology

Daniel Ruech[1], Kristina Schenk[2] & Thomas Ertel[3]
[1)] Sensatec GmbH, NL Ulm, Ulm, Germany
[2)] Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umwelt 36-3.51, Stuttgart, Germany
[3)] et environment and technology Dr. Thomas Ertel, Esslingen, Germany

Despite extensive soil excavation measures, the former Schoch site in Stuttgart-Feuerbach still exhibits groundwater contamination requiring remediation, primarily due to hexavalent chromium (Cr(VI)) and chlorinated hydrocarbons (CHCs). As part of the site's redevelopment into a residential district, the Stuttgart Environmental Protection Agency initiated an evaluation of innovative in-situ remediation technologies in 2024 to further reduce the remaining contamination. A laboratory study conducted by Sensatec GmbH compared three remediation agents and identified the combination of MetaFix® and the iron-based Geoform® product as the most effective solution. Due to its positive impact on Cr(VI) reduction and its potential to enhance CHC degradation, a two-stage remediation approach consisting of a pilot test followed by a full-scale application was selected.

The pilot application was carried out in 2025 using TSE® (Targeted Solids Emplacement) technology via sleeve pipes to depths of up to 20 m below ground level. Performance monitoring confirmed the effectiveness of the treatment, leading to the implementation of the full-scale remediation in October 2025, during which approximately 26 tonnes of remedial material were injected. Current monitoring results demonstrate significant contaminant reductions, with Cr(VI) concentrations partly falling below detection limits and total chromium concentrations decreasing by more than 90%. The remediation program remains under ongoing monitoring and is being technically supervised by Klinger und Partner GmbH. Despite occasional weather-related challenges, the results obtained to date clearly demonstrate the considerable potential of in-situ remediation technologies for heavy-metal contamination under demanding project schedules.

Enabling the purification of PFAS-contaminated fine fractions: Lab scale experiments on soil washing

Samuel Griza[1], Benjamin Faigle[2], Jamie Afghani[3], Nico Mumm[1], Clarissa Kellner[2], Martin Draws[1], Marcellus Birkenmeier[1,2], Jan Paul Lindner[1], Ferhat Kaya[1], Claudia Traidl-Hoffmann[3] & Daniel Vollprecht[1]

[1)] University of Augsburg, Institute of Materials Resource Management, Augsburg, Germany
[2)] Züblin Umwelttechnik GmbH, Zweigstelle Nürnberg, Schwaig, Germany
[3)] University of Augsburg, Institute of Environmental Medicine and Integrative Health, Augsburg, Germany

Contamination of soils by per- and polyfluorinated alkyl substances (PFAS) has raised increasing attention in the last years. Soil washing regularly succeeds in cleaning the sand and gravel fraction of contaminated soils allowing their on-site reutilisation. However, the silt and clay fraction can often not be cleaned sufficiently. Consequently, the project BoReF addresses this challenge by improving existing washing processes and introducing novel technologies based on fundamental studies on PFAS bonding in soils using Tessier sequential extraction and scenario analyses by life cycle assessment (LCA).

PFAS determination by LC-MS was conducted according to DIN 38407-43:2011-03. For PFAS analyses and sequential extraction, samples from three locations in Germany, HG, DG and DR were chosen, PFOS was the dominant PFAS with concentrations of 8.6 µg/kg dry matter (DM) in HG, 8.4 µg/kg DM in DG and 28 µg/kg DM in DR. Furthermore, significant concentrations of perfluoroundecanoic acid (PFUnDA), perfluorohexanesulfonic acid (PFHxS) and perfluorononanoic acid (PFNA) were identified.

Preliminary results of sequential extraction indicate that the extraction steps using an acetic buffers solution and the one using hydroxylamine in 96°C acetic acid released the largest fraction of the PFAS present. This suggests a strong affinity of PFAS to carbonates and iron and manganese (hydr)oxides which may open the route to tailored mineral processing methods for PFAS removal.

LCA results indicate that transport to landfill is the main cause for CO_2 emissions, whereas the environmental impact of soil washing is strongly affected by the electricity sources used. Using the current electricity mix, 63 % of the total environmental impact of soil washing results from the electricity consumption and 22 % from the use and disposal of activated carbon. Assuming a transport distance of 450 km to landfill, the impact on global warming could be decreased by a factor of seven, if the fine fraction which is currently landfilled, could also be cleaned to an extent that allows on-site reutilisation.

In summary, the project BoReF aims to extend the applicability of soil washing for PFAS removal to finer fractions by improving existing washing processes and introducing novel technologies such as froth flotation. To tailor these technologies, studies on PFAS mobility were conducted whose preliminary results suggest a strong affinity of PFAS to carbonates and (hydr)oxides.

Long-term effects of in-situ aeration in landfill aftercare: An Austrian case study

Marlies Hrad[1] & Marion Huber-Humer [1]
[1)] BOKU University, Department of Landscape, Water and Infrastructure, Institute of Waste Management & Circularity, Vienna, Austria

In-situ aeration is a widely recognized method for stabilizing waste in old landfill sites, aiming to reduce the aftercare phase, lower greenhouse gas emissions (especially methane), and mitigate environmental risks. While its immediate effects are well documented, robust evidence on long-term performance years after aeration shut-down remains scarce. This Austrian case study addresses that gap by analyzing the long-term impacts of in-situ aeration at an Austrian landfill site, utilizing monitoring data collected over a decade after the cessation of the aeration process and following the implementation of a final cover. We evaluated leachate quality and quantity (2007-2024) and surface methane concentrations (2018-2024) to assess sustained stabilization and implications for aftercare. The results indicate ongoing stabilization: Contaminant concentrations in the leachate—particularly NH_4-N, BOD_5, and the BOD_5/COD ratio—meet the stability criteria proposed in the literature for ending landfill aftercare. Annual pollutant loads also remain consistently within stable ranges, largely due to the final cover installed in 2016, which limits water infiltration, reduces leachate generation, and effectively retains residual emissions. Methane emission assessments—based on surface methane concentrations—show minimal emissions; no significant values were detected in the most recent monitoring rounds, underscoring the sustained impact on greenhouse gas mitigation. Overall, the study shows that in-situ aeration, combined with appropriate aftercare measures (particularly a final cover), is an effective strategy for transitioning legacy waste deposits to a low-emission state. Nonetheless, the absence of solid-phase investigations, settlement observations, and direct flux measurements limits comprehensive system appraisal; additional multi-metric, long-term datasets are needed to validate stabilization effects and refine evidence-based criteria for ending aftercare.

Current approaches for determining landfill gas potentials and the practical assessment of landfill gas collection – a follow-up article

Jürgen Forsting[1], Melina Simon[1] & Konstantin Meier[1]
[1)] CDM Smith SE, Bochum, Germany

Although many municipal solid waste landfills have been closed for decades, significant methane generation often continues due to the ongoing degradation of biodegradable organic matter. Reliable assessment of the remaining landfill gas potential and the actual performance of landfill gas collection systems is therefore essential for climate protection, emission mitigation, and the optimization of gas utilization and treatment technologies. However, conventional landfill gas forecasts based on First-Order Decay (FOD) models, such as the IPCC methodology and related national standards, are frequently associated with considerable uncertainties arising from incomplete waste inventories, heterogeneous waste compositions, site-specific degradation processes, and simplified model assumptions. This contribution follows up on recent developments, methodologies, and practical tools for the determination of realistic landfill gas potentials and actual gas collection efficiencies. The study combines established landfill gas forecasting methods with a comprehensive empirical investigation strategy designed to assess site-specific gas generation and collection performance. A multi-stage investigation concept is presented, comprising baseline assessments, individual well extraction tests, extraction system analyses, long-term gas extraction trials, camera-based inspections of gas infrastructure, and supplementary monitoring methods. These investigations provide a robust empirical database for evaluating the technical condition of gas collection systems, identifying deficiencies, and quantifying technically recoverable landfill gas resources. A major focus of the paper is the determination of landfill gas collection efficiency. Conventional approaches define collection efficiency as the ratio between collected methane and modelled methane generation. In practice, however, calculated efficiencies frequently exceed 100%, particularly at older landfill sites. Such values indicate shortcomings in the underlying gas forecast rather than exceptionally efficient gas collection. The paper demonstrates how empirical investigation results can be used to derive a calibrated collection efficiency and subsequently adjust landfill gas forecasts to better reflect real site conditions. The proposed calibration approach incorporates measured gas extraction performance, infrastructure condition assessments, and observed site behaviour. By introducing a site-specific temporal adjustment of the gas generation forecast, discrepancies between modelled and observed methane production can be reduced substantially. The resulting calibrated landfill gas model provides a more realistic representation of remaining gas resources, future methane emissions, and achievable gas recovery rates. Experience gained from numerous landfill projects demonstrates that the combination of empirical investigations and calibrated gas forecasting significantly improves the reliability of landfill gas assessments. The methodology supports the optimization of gas collection systems, improves the design of gas treatment facilities, enhances long-term emission forecasting, and contributes to the achievement of greenhouse gas reduction targets.

Determination of the gas formation rate in landfills to determine the degree of coverage

Gerhard Rettenberger
Trier University of Applied Sciences, Trier, Germany

According to the Landfill Gas 10-1 quality standard in Germany, the degree of collection is to be determined by the landfill operator. If this is too low, the operator must develop and implement measures to improve the coverage rate. As a basis for the determination, the modelling of the gas development in relation to the actually derived gas mass flow is used as standard. Especially with small mass flows, this quotient becomes inaccurate. Therefore, other techniques must be used to determine gas formation. This includes, in particular, the execution of an extraction test in accordance with the VDI rule.

An extraction experiment is the systematic extraction of different mass flows with parallel observation of the gas composition. If carried out and evaluated appropriately, it is possible to conclude that gas formation occurred. In practice, however, various errors are made, so that the determined values must be discarded.

The proposed article will present the background of the detection degree determination on the one hand and the execution of extraction tests according to VDI regulations on the other. The question of other alternatives is also to be answered.

Sleeves – Insights on the consumer disposal behaviour of sleeved packaging

Naruporn Wootthikanokkhan[1], Manuel Pfitzner[1], Martin Novak[1], Alexia Tischberger-Aldrian[2], Vasiliki-Maria Archodoulaki[3], Norbert Fenkart[4], Julia Lettner[5], Manuel Seifert[6] & Viktoria Helene Gabriel[1]

[1)] Hochschule Campus Wien, Packaging and Resource Management, Vienna, Austria
[2)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[3)] TU Wien, Institute of Materials Science and Technology, Vienna, Austria
[4)] CCL Label GmbH, Research & Development, Dornbirn, Austria
[5)] SPAR AG, Sustainable Packaging, Salzburg, Austria
[6)] Circular Analytics TK GmbH, Vienna, Austria

The establishment of a packaging industry characterised by circular processes is a prerequisite for achieving a high recycling rate of high-quality recycled materials. At present, packaging that contains sleeves is only considered to be partially recyclable. This is due to the fact that the sleeve can impede the accurate detection of the primary packaging body. The present conference paper explores the potential of consumer behaviour, a topic that has been the subject of limited research to date. The present study aims to address this research gap by investigating the consumers' behaviour in relation to the separation of paper and plastic sleeves by employing a mixed-method approach. The findings of the quantitative study suggest that a considerable proportion of respondents, amounting to 82 %, engage in the practice of separating paper sleeves from plastic packaging. In contrast, only 54 % of respondents separate a plastic sleeve from plastic packaging. Furthermore, regional disparities in separation behaviour have been observed. The underlying causes of this separation behaviour are attributable to a number of factors which were identified through qualitative research methods. Firstly, the utilisation of diverse packaging materials has the potential to influence consumer behaviour with regard to the separation of sleeves. Secondly, the design of the packaging, particularly the various separation instructions and applicable perforations for separation, has the potential to influence the consumer’s awareness of sleeve separation. Subsequent investigations into actual separation behaviour, grounded in empirical experimentation, are scheduled to occur in autumn 2026.

Studies on lab-scale separation processes for material-specific recycling of resin-bonded abrasive tools

Claudia Maurer[1], Samuel Griza[1] & Daniel Vollprecht[1]
[1)] Augsburg University, Institute of Material Resource Management, Chair of Resource and Chemical Engineering. Augsburg, Germany

Resin-bonded grinding tools contain valuable abrasive grains whose production is associated with considerable energy and resource consumption. Owing to their incorporation into the resin matrix, spent grinding tools are currently disposed of or utilized in low-value applications. However, the recovered abrasive grains represent a potential secondary raw material for the manufacture of new grinding tools, provided that a sufficiently selective separation of the individual grain types can be achieved. Grinding tools commonly contain mixtures of silicon carbide, zirconia alumina and different alumina abrasives with distinct hardness, toughness and wear characteristics. While density differences between silicon carbide, zirconia alumina and conventional alumina abrasives generally permit physical separation, individual alumina varieties exhibit only minor differences in their material properties, making selective separation considerably more challenging.

The present study evaluates different separation principles for recycled abrasive grain mixtures, including density separation, electrostatic separation, magnetic separation and froth flotation. Target values of at least 70 % yield and 95 % product purity were defined for a successful separation. The abrasive materials were characterized with respect to their density by gas pycnometry, while selected products were further analyzed by light and electron microscopy. Laboratory-scale sink-float tests using heavy liquids were conducted on mixtures of silicon carbide, coated alumina and zirconia alumina.

The results demonstrate that density separation is highly effective for the investigated material combinations. Yields exceeding 70 % were achieved for all mixtures, while product purities above 95 % were obtained in all fractions except one sink product, which reached a purity of 93 %. For mixtures of silicon carbide and coated alumina, recoveries and purities of up to 99 % were achieved. Electrostatic and magnetic separation showed only limited separation effects under the investigated conditions. Flotation experiments, however, indicated promising potential for high-purity alumina grades. The results demonstrate the feasibility of selectively separating abrasive grain mixtures and provide a basis for the development of process concepts for the material recycling of resin-bonded grinding tools.

Circular Economy in Practice: The Example of Solvent Recycling in the Semiconductor Industry

Roman Pöltner[1] & Jonathan Welte[2]
[1)] Infineon Technologies Austria AG, Business Continuity & Sustainability, Villach, Austria
[2)] Infineon Technologies Austria AG, Environment and Safety, Villach, Austria

Infineon Technologies Austria AG is a subsidiary of Infineon Technologies AG, a leading global provider of semiconductor solutions for power systems and the IoT. Semiconductors are essential for overcoming the energy-related challenges of our time and helping to shape the digital transformation. Infineon's microelectronics drives decarbonization and digitalization, enabling groundbreaking solutions for green and efficient energy, clean and safe mobility, and a smart and secure IoT. Infineon Austria brings together expertise in research and development, production, and global business management. Sustainability is an integral part of Infineon's strategy and is anchored in the action area "sustainability at all levels." Infineon contributes to sustainability through its "products, processes, and conduct."

The semiconductor manufacturing process involves complex steps. It requires highly specialized production equipment, a substrate - the so-called wafer - as well as many other materials and consumables. High-purity solvents are particularly important in this context. They are essential for chip production, ensure precise processes, prevent particle contamination, and influence the reliability of electronic components. As part of a targeted recycling program, solvent waste from specific production processes is collected and sent for professional recycling. The recycled solvent thus replaces virgin material and makes a valuable contribution to resource conservation.

The Path to Carbon-Neutral Cement Clinker Production: From Laboratory Experiments to Industrial Implementation

Wolfram Waldl[1], Cornelia Bauer[2], Florian Gomernik[3] & Helmut Flachberger[1]
[1)] Chair of Mineral Processing, Department Mineral Resources Engineering, Technical University of Leoben, Austria
[2)] Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, Vienna, Austria
[3)] Alpacem Zement Austria GmbH, Klein St Paul, Austria

The European cement industry faces major challenges due to increasing CO_2 costs and increasingly stringent environmental regulations. In line with the Roadmap 2050 of the Austrian Cement Industry Association (VÖZ), the systematic use of alternative raw materials (ARMs) represents a key strategy for reducing the carbon footprint of clinker production. Within this project, a comprehensive raw material database was established, and potential alternative raw materials were identified, evaluated, and validated from laboratory investigations through pilot-scale testing to full-scale industrial trials.

For the first time, a CEM I 52.5 cement (Portland cement) with a significantly lower CO_2 footprint than the current Austrian average was successfully produced. The developed clinker exhibited mechanical performance comparable to that of conventional reference clinker despite high substitution rates of alternative raw materials. The conformity assessment according to EN 197-1 is still ongoing.

Pilot-scale investigations proved valuable for process development but were not sufficient to replace full-scale industrial trials. Although measurable strength development was achieved, the pilot rotary kiln was unable to produce a stable, alite-rich clinker meeting the required quality specifications. This was mainly due to inherent limitations of the pilot facility, including simplified process conditions, natural gas firing, the absence of alternative fuels, and the lack of internal material recirculation. Consequently, the project focus shifted towards industrial-scale clinker production supported by laboratory investigations.

A major outcome of the project is the successful production of a low-carbon clinker with specific process-related fossil CO_2 emissions of only 355 kg CO_2/t clinker, representing a reduction of approximately 30 % compared with the current Austrian average. Ongoing mortar and concrete investigations, including mechanical, durability, and microstructural analyses, will be reported after completion of the required testing periods. Two additional industrial-scale trials are planned: one focusing on the production of a sulfate-resistant (SR) clinker to enable increased utilization of BOF slag from the steel industry, and a second targeting a conventional Portland clinker with the maximum feasible share of alternative raw materials to further exploit the technical and environmental potential of the developed concept.

Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as Aggregate for Concrete Applications

Gisela Weibel[1], Alexander Weh[1], Philipp Hänggi[1] & Patrick Kämpfer[1]
[1)] University of Bern, Competence Centre for Secondary Raw Materials, Bern, Switzerland

Municipal solid waste incineration (MSWI) generates approximately 700,000 tons of bottom ash annually in Switzerland. While ferrous and non-ferrous metals are routinely recovered, the remaining mineral fraction is still predominantly landfilled despite its potential as a secondary raw material. Increasing resource scarcity and the transition towards a circular economy have intensified interest in the high-value utilization of this mineral fraction in construction materials. This study investigates the suitability of differently processed Swiss MSWI bottom ashes as alternative aggregates for precast concrete products. Various treatment technologies, including conventional dry processing, wet processing and sensor-based sorting, were evaluated with respect to their influence on aggregate quality. The characterization comprised physical, mechanical and chemical properties, including particle size distribution, density, water absorption, Los Angeles abrasion resistance, total sulphur, metallic aluminium, soluble chlorides and sulphates, as well as electrical conductivity of the eluate. Laboratory concrete mixtures were produced by partially replacing natural aggregates with processed bottom ash and assessed for fresh and hardened concrete properties. The preliminary investigations demonstrate that all bottom ash fractions exhibit significantly higher water absorption than natural aggregates due to their porous microstructure. Without appropriate pre-saturation, the aggregates absorb mixing water, resulting in reduced workability and local hydration deficiencies. Nevertheless, the processing technology strongly influences aggregate performance. Wet-processed and intensively washed fractions showed a more homogeneous particle structure, lower concentrations of soluble constituents and improved mechanical behaviour compared with conventionally processed materials. Laboratory concrete containing these optimized fractions achieved fresh and hardened concrete properties comparable to those of high-quality recycled aggregate concrete. The results indicate that porosity, water absorption and particle stability are the governing parameters for successful utilization, whereas the investigated glass and ceramic contents showed only a minor influence on concrete performance. For selected precast concrete applications, replacement levels of approximately 10–20 wt.% appear technically feasible, provided that appropriate quality requirements are fulfilled.

Based on these findings, large-scale industrial tests are currently being conducted with a national precast concrete manufacturer. Concrete pipes produced by the dry-cast process and concrete blocks manufactured by the wet-cast process are being produced with 10 and 20 wt.% substitution of natural aggregates by optimized bottom ash. In parallel, comprehensive testing of mechanical performance, durability, environmental compatibility and long-term recyclability is being carried out under practical production conditions. The project is expected to continue until autumn 2026.

The study demonstrates that optimized processing of MSWI bottom ash considerably enhances its potential as a secondary aggregate for concrete production. The ongoing large-scale investigations will provide the basis for establishing quality criteria and supporting the future implementation of MSWI bottom ash as a sustainable construction material within a circular economy.

Effects of Thermochemically Treated Mineral Wool Waste as a Supplementary Cementitious Material on Concrete Performance

Sarah Steiner[1], Anna Krammer[2], Gerold Schnedl[3], Klaus Doschek-Held[2], Martin Billes[4] & Theresa Sattler[4]

1) Graz University of Technology, Institute of Technology and Testing of Building Materials, Graz, Austria
2) Technical University of Leoben, Chair of Thermal Processing Technology, Leoben, Austria
3) Holcim CTEC GmbH, Austria
4) Rohrdorfer Umwelttechnik GmbH, Austria

This study investigates the use of thermochemically treated mineral wool waste as a substitute for granulated blast furnace slag in concrete. Mineral wool waste and CaO-rich correction material (paper incineration ash) were combined in calculated mix proportions to produce amorphous slags with chemical and hydraulic properties similar to conventional blast furnace slag. The mixtures were processed at pilot scale in an electric arc furnace and an induction crucible furnace. After chemical, mineralogical, and hydraulic characterization, the slags were used in CEM II/B-M (S-LL) and CEM II/C-M (S-LL) cements. The main focus was on the performance of concretes produced with these cements. Compressive strength was determined after 1, 7, and 28 days, while durability was assessed through carbonation, freeze-thaw, and chloride-resistance tests. Concrete containing electric-arc-furnace slag achieved the highest 28-day compressive strengths, reaching 62.2 MPa with CEM II/B and 50.4 MPa with CEM II/C. Both values exceeded those of the corresponding reference concretes containing conventional blast furnace slag. These concretes also showed equal or improved carbonation and freeze-thaw resistance. The induction-furnace slags were less reactive because the intended chemical composition was not fully achieved. Nevertheless, the better-performing induction-furnace slag (ITO-HP) provided comparable strength in CEM II/B concrete and showed advantages in chloride resistance. Overall, the results demonstrate that thermochemically treated mineral wool waste can provide concrete properties comparable to or superior to concretes made from cement with conventional blast furnace slag. However, their performance depends strongly on the slag chemistry.

Sustainable construction through the systematic use of recycled building materials, using the Harrislee waste management center as an example

Peter Riegl[1] & Holger Bratz[2]
[1)] GEO-POLYMER Trading e.U., Bad Hall, Austria
[2)] Balzersen GmbH&Co.KG., Harrislee, Germany

In the most northern part of Germany, near the city of Flensburg, a private owned company operates a fully integrated waste management system on an area of 54 hectares. Mineral and biogenic building materials (e.g.concrete, wood etc.) are taken from demolition, separated, cleaned and reprocessed. In total, more than 50 different natural building materials are recycled and put to a new use, such as concrete gravel, road construction materials to sandpit filling, filter materials, filling gravel or topsoil. Residual materials and non-recyclable materials are deposited in a landfill of about 2 million cubic metres, which is planned, built and operated in accordance with the highest standards applicable in Germany (BAM regulations). Additional another so-called "class 0-landfill" has been operated since 2014 to remove low-contaminated soils. Large-scale PV systems and its own wind power plant contributes CO_2-neutral energy.

Investigation of the thermal stability of waste-based geopolymers for high-temperature applications

Klaus Doschek-Held[1], Anna Krammer[1], Christina Atzenhofer[2] & Cyrill Grengg[3]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Thermal Processing Technology, Leoben, Austria
[2)] Technical University of Leoben, Chair of Ceramics, Leoben, Austria
[3)] Christian Doppler Laboratory for Waste-based Geopolymer Construction Materials in the CO_2-Neutral Circular Economy, Graz University of Technology, Institute of Applied Geosciences, Graz, Austria

This investigation explores the thermal stability of waste-based geopolymers for high-temperature applications, thereby contributing to resource efficiency and reducing CO_2 emissions in energy-intensive industries. Three metakaolin-based formulations, using potassium water glass with specified residual material contents, were evaluated: basic oxygen furnace slag (LD), brick rubble (ZB), and a system comprising artificial mineral fiber and furnace dust (KMF/MAS). Characteristic temperatures were determined through thermo-optical analysis (TOA), and the corresponding mass and heat events were analyzed via simultaneous thermal analysis (STA). The findings indicate consistent thermal stability across the samples. ZB exhibits the highest stability, followed by KMF/MAS, whereas LD demonstrates earlier softening but a comparatively smaller change in surface area. Additional STA performed on the ZB sample powder validated typical event windows for metakaolin-based systems. Future measurements identical to those conducted on LD and KMF/MAS are planned to enhance the understanding of the correlation between thermo-optical parameters and thermal signatures. Preliminary laboratory-scale experiments confirm the potential of residue-based geopolymers as binder or matrix systems for high-temperature applications, contingent upon the careful formulation and alignment with the intended use.

Circular Production of Soluble Alkali Silicates from SiO_2-Rich Waste

Cyrill Grengg[1], Florian R. Steindl[1,2], Sara Raič[1] & Martin Dietzel[1]
[1)] CD-Laboratory for waste-based Geopolymer construction materials GECCO$_2$, Institute of Applied Geosciences, Graz University of Technology, Austria
[2)] Institute of Technology and Testing of Construction Materials, Graz University of Technology, Austria

The production of soluble alkali silicates from silicate-rich mineral residues represents a promising approach for high-value circular utilization of mineral waste and the development of energy-efficient production processes for alkaline activators. This study investigates two low-energy synthesis routes for producing residue-derived alkali silicates – namely, the hydrothermal synthesis of waterglass solutions and the thermochemical synthesis of powdered sodium silicates – using a silicate-rich refractory waste as a representative raw material.

The results demonstrate that the mineralogical composition of the SiO_2-bearing component in the respective residue largely governs hydrothermal silica dissolution, whereas phase formation during thermochemical synthesis is additionally controlled by the molar SiO_2/Na_2O ratio (silica modulus, Ms). Owing to the high chemical reactivity of the high-temperature SiO_2 polymorphs present, activator solutions with Ms values ranging from 1.5 to 1.7 and solids contents of up to 44 wt.% could be produced under moderate hydrothermal conditions (140 °C, 3 bar). Their properties are comparable to those of commercial sodium waterglass solutions.

During thermochemical synthesis, the highest proportions of reactive sodium metasilicate phases and nearly complete conversion of the high-temperature SiO_2 polymorphs were achieved at Ms values between 0.9 and 1.0. Preliminary application tests in alkali-activated binder systems confirmed the general suitability of the developed activators as substitutes for commercial waterglass solutions.

New Process Approaches for the Recycling of Steel Mill Slag

Sebastian Keber
[1)] TU Clausthal, Institute of Geotechnology and Mineral Resources, Clausthal-Zellerfeld, Germany

Against the backdrop of the steel industry's decarbonization and the associated transition to sustainable production processes, the recycling of steelworks slag is increasingly coming into focus. In Germany, a total of 11.9 million metric tons of steel mill slag was generated in 2024, most of which is currently used as low-grade construction materials or sent to landfills. In addition to the dominant Ca/Si fraction, this slag contains significant amounts of iron, chromium, manganese, and, in some cases, vanadium. Vanadium, in particular—which is present in significant concentrations in various iron ores and slags—represents a resource potential that has not yet been sufficiently tapped. At the same time, new regulatory frameworks, particularly the Substitute Construction Materials Ordinance in effect since 2023, are tightening the requirements for permissible recycling.

At Clausthal University of Technology, various approaches to improving the recycling of steel mill slag are currently being investigated. The goal is, on the one hand, to recover iron for reuse in steel production and, on the other hand, to produce concentrates with higher concentrations of chromium, manganese, and vanadium for further metallurgical or hydrometallurgical processing. In addition, the goal is to produce a low-pollutant mineral fraction suitable for use as a feedstock in the cement industry or as a substitute construction material. Achieving these objectives is complicated by the often fine-grained distribution and the high degree of intergrowth between valuable and unwanted materials.

Three process approaches are being pursued: (1) direct processing of existing slags, provided that the mineralogy and particle sizes allow for sufficient separability; (2) the reduction of metal-rich slag fractions followed by separation of the products; and (3) the concept of Engineering of Artificial Minerals (EnAM), in which the slag composition and solidification behavior in the liquid state are specifically controlled. EnAM appears particularly promising for large-scale implementation, as targeted phase formation could significantly improve subsequent mechanical processing and the recovery of vanadium. However, it also poses a significant process engineering challenge.

In particular, the targeted control of slag formation opens up new prospects for the recovery of critical metals and the production of usable mineral fractions.

CreeS – enabling the use of chromium-rich slags in the cement industry!

Florian Feucht[1], Anna Krammer[2], Alexander Halwax[3], Klaus Doschek-Held[2] & Philipp Sedlazeck[1]

[1)] Technical University Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

[2)] Technical University Leoben, Chair of Thermal Processing Technology, Leoben, Austria

[3)] K1-MET GmbH, Linz, Austria

In a functional circular and resource-efficient economy, the use of recycled raw materials is of utmost importance. Beyond conserving natural resources, their use substantially reduces product carbon footprints by lowering demand for primary raw materials and the associated emissions from mining and processing. With this environmental and climate objective in mind, the cement industry is seeking alternative secondary raw materials (SRM) for clinker production and supplementary cementitious materials (SCM). Slags from iron and steelmaking, particularly stainless-steel slags (StS), are considered promising material streams, however, their utilisation is often constrained by elevated concentrations of heavy metals, particularly chromium (Cr).

The CreeS project aims to develop a technology concept for producing “Cr-free” slag, using electric arc furnace slag from stainless steel production as a model system. Whereas prior research has focused on adjusting steelmaking parameters to immobilise heavy metals in stable, poorly soluble mineral phases and thereby minimise leaching, CreeS adopts a contrasting strategy. The existing slag is thermochemically conditioned to form more readily soluble mineral phases. Subsequent leaching is intended to yield, on the one hand, a “Cr-free” slag and, on the other hand, an Fe/Cr-rich hydroxide sludge as a leaching residue. The former will be assessed for suitability in cement production, while the latter is targeted as an Fe/Cr source for reintroduction into stainless-steel making. This approach requires a detailed understanding of the chemical, mineralogical, and thermochemical properties of StS. Following an extensive sampling campaign, the material was characterised accordingly. This contribution presents initial results that provide the basis for forthcoming conditioning trials.

The examined StS are chemically dominated by Fe_2O_3 and CaO, with SiO_2, Al_2O_3, and Cr_2O_3 each occurring at approximately 6 – 8%. Mineralogically, the untreated samples comprise calcium–aluminum–iron and calcium-silicate phases, along with wüstite and spinel. Chromite ($FeCr_2O_4$) constitutes the dominant chromium-bearing phase, whereas eskolaite (Cr_2O_3) occurs only as a subordinate component. Experimental investigations and thermodynamic modelling indicate that, under the conditions studied, complete melting could not be achieved up to 1600 °C. Future work will therefore focus on evaluating suitable flux additions to lower the liquidus temperature and improve melting behaviour. Both the literature and performed calculations suggest the potential formation of $CaCr(VI)O_4$ during oxidising cooling. Accordingly, forthcoming pilot-scale experiments will examine the influence of controlled cooling protocols on Cr(VI) formation. When interpreting the thermodynamic results, it should be noted that the employed databases do not include Cr(VI) species in the liquid phase. The formation of dissolved Cr(VI) in the melt is thus considered thermodynamically unlikely but cannot be ruled out given current data limitations.

Phosphorus recovery from thermally treated sewage sludge for application in an inductively heated packed bed reactor

Christoph Gatschlhofer[1], Zlatko Raonic[1], Florian Steindl[2, 3], Michael Meyer[1], Anna Christine Krammer[1], Harald Raupenstrauch[1] & Klaus Doschek-Held[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Thermal Processing Technology, Leoben, Austria
[2)] Graz University of Technology, Institute of Applied Geosciences, Graz, Austria
[3)] Graz University of Technology, Institute for Technology and Testing of Building, Graz, Austria

Phosphorus is classified as a Critical Raw Material by the European Commission. As Europe possesses only negligible phosphate rock reserves, it is highly dependent on imports to meet its phosphorus demand. In contrast, sewage sludge represents a continuously available secondary phosphorus resource with considerable recovery potential. With the revision of the Austrian Waste Incineration Ordinance, the direct disposal or conventional utilization of sewage sludge will be significantly restricted from 1 January 2033 onwards. Wastewater treatment plants with a capacity of 20.000 population equivalents or more will be required to recover phosphorus from sewage sludge in order to comply with legally defined recovery targets. However, no established large-scale technology is currently available to process the anticipated quantities of sewage sludge and recover phosphorus efficiently. To address this challenge, the collaborative research project PHOBOS, “Phosphorus Recovery and Binder Production”, involving both industrial and academic partners, is developing an innovative thermochemical recovery process based on an inductively heated packed bed reactor. The project aims to quantitatively characterize the thermochemical reactions occurring within the system, define optimal operating windows for stable reactor performance, and evaluate the recovered material streams with respect to their suitability for industrial applications. Ultimately, the generated knowledge will establish the scientific and technological basis for scaling up the process towards industrial implementation.

Initial Findings on the Implementation of the “PFAS Strategy for Contaminated Sites”

Gernot Döberl[1], Hanna Kobald[1], Birgit Moser[1], Markus Ausserleitner[1], Melanie Maltschnig[1] & Martin Weisgram[1]
[1)] Environment Agency Austria, Contaminated Sites Team, Vienna, Austria

The widespread use of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the past means that numerous contaminated sites and waste deposits, as defined by the Contaminated Sites Remediation Act (ALSAG), are considered potential sources of PFAS. To ensure that the identification and investigation of PFAS sources can be carried out as quickly and efficiently as possible, a strategy for managing sites potentially contaminated with PFAS was developed on behalf of the Austrian Ministry of the Environment and published in May 2023. This strategy outlines the most important measures to be implemented in the short and medium term as part of the enforcement of the Contaminated Sites Remediation Act. This article presents, by way of example, preliminary results and findings from the systematic survey and investigation of firefighting training grounds in the Leibnitz district, the investigation of a large tank farm in Styria, large municipal solid waste landfills in Lower Austria, and a textile processing plant in Vorarlberg.

Development of a Fully Automated Online-SPE-LC-MS/MS Method for the Determination of PFAS in Aqueous Samples: Challenges and Pitfalls

Oliver Mann[1], Lilit Ispyrian[2], Daniel Tomsik[1], Oskar Schlesinger[1] & Werner Wruss[1]
[1)] ESW Consulting Wruss ZT GesmbH, Vienna, Austria
[2)] Trajan Scientific and Medical / Axel Semrau GmbH, Sprockhovel, Germany

Per- and polyfluorinated alkyl substances (PFAS) are among the most analytically and regulatory challenging groups of substances in water analysis due to their extreme environmental persistence, mobility, and, in some cases, bioaccumulative and toxic properties. Under the EU Drinking Water Directive 20 individual substances - perfluorocarboxylic acids and perfluorosulfonic acids with 4 to 13 carbon atoms - must be mandatorily monitored with low limits of quantification. High-performance liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS) has established itself as the state-of-the-art method for analyzing most PFAS. For the determination of PFAS at trace levels, enrichment via solid-phase extraction (SPE) is usually necessary as part of sample preparation. This work describes an automated workflow using online SPE-LC-MS/MS in a closed system. This makes sample preparation and analysis more efficient, more reliable, and less susceptible to contamination than with manual SPE. A major challenge in PFAS analysis are blank values, as PFAS are present in numerous materials, resulting in a wide range of potential contamination sources throughout the entire process from sampling to measurement. This risk is minimized through the use of fluoropolymer-free components, trap columns for the separation of system-borne PFAS, and regular blank value checks. Another difficulty arises from strong wall adsorption, particularly of long-chain PFAS. To stabilize the analytes, methanol is added to the samples directly after sampling. However, the high methanol content impairs both the enrichment on the SPE cartridge and the chromatographic separation, particularly for short-chain PFAS. In the CHRONECT system, this conflict of objectives is resolved through co-solvation combined with elution in peak-focusing mode. This method thus enables fully automated sample preparation and the injection of large sample volumes, thereby increasing detection sensitivity, particularly for low PFAS concentrations, while simultaneously reducing solvent consumption.

PFAS as a Pathfinder—The Long Road from Damage Assessment to Remediation

Kai-Uwe Ulrich[1] & Dieter Poetke[1]
[1)] GICON® Resources GmbH, Water Division, Dresden, Germany

This multidisciplinary case study of a former military airfield demonstrates how an iterative approach—guided by meticulous research and a continuous accumulation of findings, supported by uniform guidelines like the Federal Technical Guidelines for Soil and Groundwater Protection, and coupled with pragmatic, situation-specific concepts, can lead to reliable results and actions appropriate to the risk situation. Based on Phase I (Data Collection and Initial Assessment) and supported by site research, sources of contamination were successively identified. The pathways of contamination were traced through a drainage system and into the downstream groundwater flow. DirectPush probing revealed that a contaminant plume several hundred meters long had spread beyond the property boundaries. PFAS were detected at depths of up to 30 m, due to the glacial unconsolidated rock aquifer. As an initial risk mitigation measure of Phase II (Investigations and Risk Assessment), cattle grazing on the affected areas was discontinued.

As the detailed investigation of the PFAS contamination plume currently shows, delineation toward the west and into the subsurface is not yet complete, and new aspects of the contamination hypothesis must be examined. A major conclusion after 10 years of contaminant assessment is that the complexity of contaminant presence and distribution identified at the site under investigation is likely not atypical for other military sites as well. From this, recommendations can be derived for long-term action plans, site-specific investigation strategies, and targeted, sustainable, and proportionate remediation measures.

To prevent PFAS discharge into surface waters, a remediation plan (Phase IIIa) was developed, which progressed from preliminary planning and a baseline assessment to the design phase for a treatment plant to remove PFAS end-of-pipe (at the outlets of the drainage lines). This article also outlines the concept and design of this water treatment plant (WTP), which is intended to remove the locally relevant PFAS substances (PFOS, PFHxS, and PFNA) using activated carbon. The next steps to be put into practice will cover remediation implementation (Phase IIIb) and follow-up care (Phase IIIc).

Permeable Reactive Contaminant Barriers for PFAS-Contaminated Soils: Applications in Landfills and Beyond

Christoph Schmüdderich[1], Herbert Lassnig[2] & Stefan Niewerth[3]
[1)] HUESKER Synthetic GmbH, Application Technology, Gescher, Germany
[2)] HUESKER Synthetic GmbH, Sales GEO DACH, Austria
[3)] Taberg Ingenieure GmbH, Project Management, Lünen, Germany

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) represent a growing challenge for soil and waste management due to their high persistence, mobility, and toxicity. Many PFAS compounds are water-soluble and can migrate from contaminated soil into groundwater, significantly complicating the safe disposal or reuse of such materials. Conventional landfill liner systems are effective against many contaminants; however, they cannot fully prevent the long-term migration of PFAS. At the same time, stationary leachate treatment systems are complex, costly, and energy intensive.

To address this challenge, a permeable reactive geosynthetic contaminant barrier (PR-GBR) has been developed that can be directly integrated as an active composite into landfill and remediation systems. The PR-GBR combines the separation and filtration functions of geotextiles with an adsorptive active layer consisting of specially engineered ion-exchange materials and activated carbon. These materials selectively and permanently bind PFAS from percolating leachate. Laboratory and field investigations, including both small- and large-scale column experiments, have demonstrated a high retention capacity for a broad spectrum of short- and long-chain PFAS, achieving removal efficiencies of up to 99.7%.

In addition to its application as an enhanced component of landfill sealing systems, the technology also enables on-site containment of PFAS-contaminated soils, for example during the backfilling of civil engineering structures. The PR-GBR therefore offers a practical, energy-efficient, and economically viable solution for minimizing the spread of PFAS in the environment. Considering increasingly stringent regulatory requirements, the PR-GBR represents a promising approach for the sustainable and safe management of PFAS-contaminated materials.

Treatment of PFAS-Contaminated Groundwater, Landfill Leachate, and Soil Washing Water Using an Innovative Hybrid Treatment Process

Robert Mischitz[1], Peter Müller[1], Martin Nagy[1], Josefine Pfeiffer[1], Lukas Sitz[1] & Florian Sommerauer[1]
[1)] ferroDECONT GmbH, Leoben, Austria

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are among the most persistent and challenging contaminants in aquatic environments, requiring efficient technologies for both removal and destruction. This study presents an innovative treatment concept combining foam fractionation with electrochemical oxidation using boron-doped diamond (BDD) electrodes. Foam fractionation exploits the surface-active properties of PFAS to selectively remove and concentrate them from contaminated water, thereby significantly reducing the volume requiring subsequent electrochemical treatment. The process was initially developed and optimized at pilot scale by investigating the influence of key operating parameters. Based on these findings, the process was successfully scaled up to a mobile containerized treatment plant and further extended by a pre-treatment container designed for flow rates of up to 36 m³/h. Representative experiments with PFAS-contaminated groundwater and soil washing water demonstrated high removal efficiencies and comparable treatment performance at both pilot and industrial scales. The subsequent BDD electrochemical oxidation reliably degraded the concentrated PFAS, confirming its suitability as a destructive treatment technology. Overall, the results demonstrate the technical feasibility and scalability of the combined process and highlight its potential for the treatment of PFAS-contaminated groundwater, landfill leachate, and soil washing water. Further investigations are currently being conducted to validate the performance of the newly developed pre-treatment container under field conditions.

In-situ Remediation of PFAS Contaminated Top Soil Using Biopolymer Elution

Anja Wilken[1] & Miriam Kunz[1]
[1)] Sensatec GmbH, Kiel, Germany

A former military site is impacted by a significant per- and polyfluoroalkyl substance (PFAS) contamination in soil and groundwater, originating from historical use of fluorinated firefighting foams. Due to multiple source inputs, heterogeneous contamination zones are present, with hotspot concentrations in soil exceeding 100,000 ng/L. The ongoing remediation strategy investigates a combined approach consisting of a biopolymer-based in-situ soil elution for hotspot treatment and a downgradient sorption barrier to prevent further migration into uncontaminated aquifers and adjacent surface waters. The hotspot treatment is intended to reduce contaminant mass flux and enhance the long-term efficiency of the reactive barrier by lowering influent concentrations.

A laboratory feasibility study was conducted to evaluate the effectiveness of biopolymer-enhanced PFAS elution using a two-stage column experiment with homogenized hotspot soil material. Perfluorononanoic acid (PFNA) and perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) were identified as dominant compounds. The selected biopolymer achieved PFAS reductions of up to 96.7%, significantly outperforming sole water flushing (38%). An optimized flushing regime combining water and biopolymer phases was developed and transferred to field scale.

A field-scale in-situ test was performed on a 12 × 12 m test field equipped with an infiltration system, groundwater extraction, and hydraulic circulation unit including activated carbon filtration and controlled reinfiltration. The field test comprised sequential water and biopolymer flushing, and subsequent groundwater extraction phases (pump & treat & discharge). Comprehensive hydraulic and chemical monitoring, including soil and groundwater sampling and high-resolution groundwater level measurements, was implemented throughout the field test.

Results demonstrate substantial PFAS reduction in the unsaturated zone, with up to 99% removal for PFNA and 61–91% for PFOS depending on matrix and sampling phase. The findings confirm the effectiveness of biopolymer-enhanced in-situ elution for PFAS mobilization and demonstrate its potential to significantly improve the performance and longevity of downstream containment systems. The study highlights the applicability of the combined remediation approach and supports further evaluation of standalone or integrated treatment strategies.

Remediation of a PFAS-contaminated site at Salzburg Airport

Hartwig Kraiger[1] & Hans Christian Haslauer[1]
[1)] GWU Geologie-Wasser-Umwelt GmbH, Salzburg, Austria

A section of the Salzburg Airport was designated as contaminated site S23 with priority 1 in 12/ 2022. Based on extensive preliminary investigations, significant contamination of the subsoil with per- and polyfluorinated alkyl substances (PFAS) was detected in a section of the site used for firefighting training purposes. The use of firefighting foams is also the source of an approximately 3.5 km long contaminant plume in the groundwater outflow. The experience gained over the past more than 5 years, provides an overview of the complex development of investigation and remediation measures in a field that was, at the outset, largely unknown.

To rapidly prevent the further release of pollutants, several barrier wells were commissioned in the initial phase. The pumped water (up to 25 l/s) is treated in a multi-stage groundwater treatment plant using activated carbon and then re-injected into the ground. In course of a detailed groundwater investigation, it became apparent that the area of the contaminated site originally identified needed to be significantly expanded.

Detailed grid-based investigations in 2025 have now enabled a precise delimitation. The final remediation measures provide for:

- Reduction of pumping volumes by diverting inflowing uncontaminated groundwater by means of a guide wall
- Construction of 6 wells with a total extraction rate of no more than 15 l/s; the design as twin wells serves to maintain pumping operations in the event of maintenance
- Surface sealing of all currently unsealed contaminated sites
- Treatment of pumped water using an adapted groundwater treatment plant and linear re-infiltration outside the guide wall

The timing of the measure's implementation depends primarily on the provisions of the planned amendment of the "DeponieVO" and the subsequent response of the waste management sector to the new PFAS limit values.

PFAS Contamination at the Styrian Firefighting Training School in Lebring – A Case Study

Elisabeth Winkler[1], Jürgen Maier[2] & Sara Lang[2]
[1)] Amt der Steiermärkischen Landesregierung / Office oft he Styrian Government, Waste and Wastewater Engineering, Chemistry, Graz, Austria
[2)] RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Frohnleiten, Austria

The ST37 contaminated site, the Styrian Firefighting Training School in Lebring (Austria), was contaminated by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) as a result of firefighting training activities using aqueous film forming foam (AFFF) since 1975. Site investigations revealed extensive PFAS contamination of the soil and groundwater, with perfluorooctane sulfonate (PFOS) as the dominant compound. Due to the high hydraulic conductivity of the aquifer, the groundwater contamination plume extends approximately 6.5 km downstream and has affected both public water supplies and private drinking water wells.

To achieve the defined remediation objective, a remediation options assessment was carried out. Following a systematic screening of 24 remediation technologies, eight remediation options were selected for detailed evaluation. The options were compared using a modified cost-effectiveness analysis, considering remediation effectiveness, technical feasibility, project stability and project costs.

The selected remediation option combines hydraulic plume containment using remediation wells and cutoff walls with groundwater treatment by an activated carbon filter. A portion of the treated groundwater is discharged to the river „Mur“, while the remaining treated groundwater is reinfiltrated into the source area to increase PFAS mobilisation and recovery. Among the eight remediation options, this concept achieved the best balance between remediation effectiveness and project costs and was therefore selected for implementation.

The transparent hospital: Waste management research in healthcare

Jörg Woidasky[1], Anton Vielsack[1], Franziska Zecha[1], Tobias Viere[1] & Anne-Kathrin Cassier-Woidasky[2]
[1)] Pforzheim University, Research Center for Circularity in Healthcare – Institute for Industrial Ecology, Pforzheim, Germany
[2)] Trier University, Chair of the Department of Nursing Science I, Trier, Germany

The healthcare sector in Germany is among the five largest national consumers of raw materials and emitters of greenhouse gases. Health professionals are increasingly concerned not only about the effects of climate change on their patients, but also about healthcare being the cause of negative climate effects. More than 80% of the healthcare systems' climate impact are Scope 3 emissions, showing the relevance of purchased goods and services, and of waste generation. Some circularity measures such as waste prevention training, or separate collection and recycling schemes for few medical products have yet been implemented. Unfortunately recycling schemes are mostly manufacturer-specific, and pilot scale, so their impact is limited, and re-use of single use products is as well. A lack of data is one of the key research gaps for the advancement of circularity in this sector. Moreover, strict legal requirements have been set up for healthcare waste handling and disposal, to ensure the patients' and staff health and safety, but these regulations disregard sustainability and climate protection. Research has recently provided key circularity performance indicators, such as the annual total waste generation of about 1.5 metric tons/bed in German hospitals, but healthcare is still far from transparent material flows. Operating theatres and the emergency department can be recommended to start with circularity improvements though, as they are very waste intensive. Besides technical aspects, an interdisciplinary approach to circular economy issues is a key prerequisite for the further development of the circular economy in healthcare.

A new component made from old rotor blades – is that possible? Component recycling of wind turbine rotor blades

Ina-Marie Orawiec[1], Lina-Sophie Achilles[2], Matthias Oppe[3] & Andreas Büter[4]
[1)] OX2architekten gmbh, Aachen, Germany
[2)] University of Applied Sciences, Fachbereich für Bau- und Umweltingenieurwesen, Darmstadt, Germany
[3)] knippershelbig, Stuttgart, Germany
[4)] University of Applied Sciences, Fachbereich für Maschinenbau und Kunststofftechnik, Darmstadt, Germany

The research project ‘power*stage, inspired by rethink*rotor’ aims to prove that reusing disused rotor blades from wind turbines to roof an open-air stage represents a further use of the product-related ‘engineering art’ and the material in the sense of a sustainable circular economy. This novel and previously unexplored approach is necessary because, due to legal requirements based on linear economic concepts, there is currently no alternative to disposal (e.g. thermal recycling) for large GRP components. The power supply is to be ensured independently via solar sails and recycled vehicle batteries from the company Voltfang, which are integrated into the rotor blades.

The project investigates how disused wind turbine rotor blades and other secondary materials can be reused as durable, modular and resource-efficient infrastructure for cultural events. The focus is on whether constructive reuse, second-life energy storage and energy-self-sufficient concepts can measurably reduce the ecological impact of the construction and event industry. These effects are evaluated using a life cycle assessment and life cycle analysis and compared with conventional disposal and new construction scenarios. At the same time, the project examines the extent to which such solutions can be transferred to other locations and act as a catalyst for sustainable event concepts, acceptance of the energy transition and regional structural change.
Another important question that arises during implementation is: How can it be ensured that the ‘power stage’ meets all strength requirements when reusing rotor blades? Due to the reuse of components, the publication deals with the characterization of recycled or reused composites. Based on the operational strength of fiber-reinforced plastics and their failure behavior, an initial concept will be presented here, starting at the component level, which makes it possible to qualify old rotor blades or FRP for reuse.

Ten Years of Social Urban Mining with BauKarussell – Impacts, Conclusions and Lessons Learnt

Markus Meissner[1], Thomas Romm[2], Sonja Zumpfe[3], Andreea Crudici[2] & Jasmin Bermadinger[3]
[1)] Austrian Institute of Ecology, Vienna, Austria
[2)] Romm ZT, Vienna, Austria
[3)] BauKarussell e.Gen., Vienna, Austria

Social Urban Mining has emerged as a key circular-economy strategy within the construction sector, which is responsible for a significant share of Austria's total waste. The approach links selective, manual dismantling with the social economy, enabling both resource recovery and employment for disadvantaged groups. Ten representative projects were analyzed using detailed records such as material quantities, working hours, invoices, and reuse data. On average, each project removed around 101,000 kg of materials from buildings prior to renovation or demolition. These included hazardous substances, valuable fractions like metals, and large quantities of reusable products. Social enterprises contributed roughly 2,800 working hours per project and involved an average of 16 workers, providing qualification and employment opportunities. Economically, the recovered materials and reuse revenues financed about 56% of project costs, though results varied depending on building condition and project context.

The conclusions highlight that Social Urban Mining generates substantial ecological benefits by enabling high-quality, fraction-pure separation of materials, reducing disposal needs, and supporting high-value recycling. More than 32,000 kg of products per project are diverted from waste streams through reuse. Economically, the approach creates an added value of around 1.5 EUR/m² of gross floor area, with reuse revenues often exceeding the associated costs. However, profitability depends on building condition, available time windows, and market demand for reused components. Socially, the model provides nearly 2,800 hours of training and employment per project for long-term unemployed individuals, while strengthening local reuse markets and offering affordable second-hand building components. Additional qualitative benefits include reduced transport emissions, faster demolition processes due to pre-dismantling, and increased public awareness through formats such as Re-Use boxes and Open-mine days. Overall, Social Urban Mining combines ecological, economic, and social value creation and represents a promising pathway for circular construction practices

Implementation and operational experience of Austria's first gypsum recycling plant

Monika Döll
Saint-Gobain Austria, Business Development, Bad Aussee, Austria

GzG Gypsum Recycling GmbH is a joint venture between Saint-Gobain Austria, PORR, and Saubermacher, established with the goal of creating a closed-loop recycling system for gypsum plasterboards in Austria. The commissioning of the gypsum recycling plant in Stockerau in 2025 marks an important milestone for circular construction in Austria. As the country's first dedicated gypsum plasterboard recycling facility, the plant enables the recovery of gypsum from construction and demolition waste and its reuse in the production of new plasterboards. The introduction of the Austrian Recycling Gypsum Ordinance and the landfill ban for gypsum plasterboards, effective since January 2026, have significantly increased recycling activities and material inflows. Operational experience has shown that successful recycling depends largely on proper source separation at construction sites. Contamination by other construction materials remains one of the main challenges. The recycling process includes weighing, quality control, shredding, metal separation, screening, sorting, and cleaning. The resulting recycled gypsum meets regulatory quality requirements, achieves end-of-waste status, and can be reused as a secondary raw material. A key highlight of the project is the closed-loop recycling system: recycled gypsum is transported by rail to the Saint-Gobain plasterboard plant in Bad Aussee, where it is incorporated into new products with recycled content of up to 40%. The first year of operation demonstrates that appropriate legislation, recycling infrastructure, and industry collaboration can successfully establish a circular gypsum value chain, contributing to resource conservation, landfill reduction, and lower CO_2 emissions.

Assessment of gypsum-board waste in the context of the landfill ban – a first field report

Arne M. Ragossnig[1]
[1)] RM eco consultants ZT GmbH, Vienna, Austria

Construction and demolition waste is the most important waste stream in terms of mass. Circular economy approaches can therefore have a significant lever. The challenge is to ensure clean material cycles while avoiding unintentional contaminant carry-over into new products and securing safety at work.

This article discusses this aspect on the basis of the implementation of a gypsum-board cycle in Austria against the background of contamination by asbestos-containing fillers that have been historically used among others also for dry gypsum walls.

This topic is discussed in the light of the current attempts to establish a closed-loop recycling of gypsum-board waste in Austria in the context with an accompanying landfill ban for gypsum board waste as well as exemptions from that ban.

Pragmatic and implementable approaches must be found and agreed upon, to effectively differentiate non-recyclable dry gypsum boards containing historically, intentionally added asbestos fillers, from current dry gypsum walls containing minor concentrations of un-intentionally naturally contained geogenic asbestos. This differentiation is crucial to prevent the extensive use of loopholes caused by higher waste management costs due to following the recycling route.

A way forward to achieving the said goal is presented in this contribution.

AI-based identification of the relationship between the chemical composition and leachability of mineral by-products and waste

Kai Ernst[1] & Daniel Vollprecht[1]
[1)] University Augsburg, MRM, Chair for Ressource and Chemical Engineering, Augsburg, Germany

The feasibility of recovering recyclables from mineral by-products and waste depends significantly on their environmental behavior. This behavior is defined by factors such as the solid-phase content of contaminants and the leachability of pollutants resulting from interactions with aqueous solutions. Analyses of solid materials - and specifically elution tests to characterize leachability - are costly and time-consuming; consequently, many batches are sent to landfills as a precaution rather than being considered for material recovery as alternative construction materials. Furthermore, industrial process data regarding material properties have not yet been systematically utilized to identify the precise mechanisms governing the leachability of mineral materials. The KIA project (AI-based identification of the relationship between chemical composition and leachability in mineral by-products and waste) experimentally investigates the leachability of three mineral material streams and uses AI-assisted data analysis to identify correlations with their chemical composition and mineralogy. Additionally, Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) is employed as a novel method to analyze the elemental composition of these mineral streams and - leveraging the identified correlations - to predict their environmental behavior based on chemical composition using AI. The mineral material streams examined in the KIA project include electric arc furnace slags, fractions from construction and demolition waste processing, and a fraction derived from excavated soil processing. Utilizing material data and AI-based analysis to establish the precise relationships between chemical composition, mineralogy, and environmental behavior lays the foundation for sensor-based quality monitoring and offers the potential for massive savings in primary raw materials and other resources.

Circular Construction: Preserving Existing Structures, Closing Loops

Christina Dornack[1,2], Claudia Kemfert[1,3], Mechthild Baron[1], Leonie Dahlmann[1,2], Hermann Keßler[1], Julia Michaelis[1], Eva-Maria Schatz[1], Ina Sieber[1,3,4] & Bendix Vogel[1,5]
[1)] German Advisory Council on the Environment, Berlin, Germany
[2)] Dresden University of Technology, Institute of Waste Management and Circular Economy, Germany
[3)] German Institute for Economic Research (DIW), Germany
[4)] University of Kassel, Institute for Sustainability, Germany
[5)] Potsdam Institute for Climate Impact research (PIK) e. V., Germany

The environmental damage associated with construction can and must be reduced. Environmental impacts extend throughout the entire process—from raw material extraction, construction, operation, and maintenance of buildings, all the way to demolition and the disposal of construction waste. More than one-third of Germany's raw material demand stems from building construction and civil engineering. The construction and building sector accounts for more than half of annual waste generation and a large portion of land use. Domestic building material production accounts for 8% of Germany's greenhouse gas emissions. Thanks to efficiency improvements, building energy consumption and the associated emissions are already declining at an increasing rate. Circular construction can also reduce "gray emissions" that occur outside the operational phase.

Life cycle assessments can support decisions regarding the preservation and demolition of buildings. Increased use of secondary construction products reduces raw material demand and waste volume. Circular construction can also be profitable in the long term, as maintenance and renovation costs are lower than with conventional construction methods. New business models bring valuable raw materials from disused buildings back into the market. Digital tools for planning and documentation, as well as digital marketplaces, are essential in this regard. Circular construction can become a powerful driver of innovation and modernization in the construction sector.

The built environment must adapt to dynamic societal developments. Demographic change is leading to rising demand for accessible, flexible housing and for living spaces for small households. At the same time, the need for additional living space is growing, particularly in expanding cities and metropolitan areas. Buildings or renovations designed with circularity in mind offer adaptability, for example through modular construction. When building products are designed to be free of harmful substances so they can be reused to a high standard, this also has a positive impact on indoor air quality and, consequently, on human health. Furthermore, the existing building stock holds great significance for architectural culture and shapes people's identities. Circular construction supports the preservation of existing buildings and revives long-established—and in some cases forgotten—practices of architectural culture.

Policymakers can and should support the emerging paradigm shift toward circularity in the construction and building sectors. This requires a range of instruments that address the various stakeholders. The German Advisory Council on the Environment has identified five key areas of focus: digitization, capacity building, incentives, regulatory guidance, and the public sector as a pioneer. These are explored in this article.

From Mineral Signals to automated Rock Classification: Circular Use of excavated Materials using multimodal Raman Spectroscopy

Martin J. Findl[1], Sai P.R. Gottam[2], Daniel Schneider[3], Daniel E. Sandu[4], Elmar Rueckert[2], Robert Galler[3], Roland Pomberger[1] & Klaus P. Sedlazeck[1]

[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

[2)] Technical University of Leoben, Chair of Cyber-Physical-Systems, Leoben, Austria

[3)] Technical University of Leoben, Chair of Subsurface Engineering, Leoben, Austria

[4)] AiDEXA GmbH, Graz, Austria

Austria generates around 38 million tonnes of excavated material annually, a considerable share of which is still landfilled despite its utilization potential. Automated material identification is a key prerequisite for increasing the use of excavated materials within a circular economy. This paper presents the methodological framework of a Raman-based approach developed within the NNATT project for automated mineral and rock identification. The method combines complementary spectral similarity measures with a multi-stage threshold optimization and a statistical estimation of the minimum number of Raman measurements required for reliable rock confirmation. In addition, a multimodal Raman approach is introduced that jointly evaluates one-dimensional spectra and two-dimensional Raman image data acquired at the same measurement point. Further, a preliminary benchmarking of several machine and deep learning architectures on laboratory Raman data further indicates that both spectral and spatial representations, and in particular their multimodal combination, are suitable to this classification task. The proposed methodology and data-driven models provide a robust foundation for automated, reliable, and efficient sensor-based classification of tunnel spoil and excavated soil materials under conveyor belt conditions, thereby enabling more accurate material characterization and supporting improved decision-making in on-line and in-line tunneling operations.

Analysis of Vienna's biowaste management system, taking into account sociological, legal, economic and technical factors

Wojciech Rogalski[1]
[1)] University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Vienna, Austria

This contribution shows how separate biowaste collection can be effectively designed and optmised under dense urban conditions. An important finding is, that the purity of the separately collected biowaste is a key determinant of biowaste recycling later on. Based on long-term empirical evidence of the City of Vienna, realistic potentials of the separate collection of high quality biowaste were quantified, indicating a maximum achievable collection rate of approximately 24 kg per capita and year under dense urban conditions. The results presented and the conclusions formulated in the present contribution are the upshot of more than 35 years of profession-al experience in municipal waste management in Vienna substantiated by the outcomes of numerous studies conducted over the years under the supervision and leadership of the author of this article. Data derived from the conducted studies were interlinked, supplemented with demographic and socio-economic information and with additional own created knowledge. The analysis places also specific emphasis on identifying recurrent errors and suboptimal decision-making patterns in urban biowaste management. By systematically examining such deficiencies, the article provides transferable insights that support early risk identification and avoidance in other cities. This article presents methods that have been practically tested in the city of Vienna and that can subsequently be applied in successful introduction and long-term continuation of a modern biowaste management system even in large metropolitan areas with more than 500,000 inhabitants

Food Waste Prevention in School Food Services

Gudrun Obersteiner[1], Katharina Hofer[1], Sandra Luck[1], Reinhold Ottner[1] & Elisabeth Schmied[1]
[1)] BOKU University, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

Food waste is a multifaceted phenomenon influenced by individual, collective, and systemic behavioral patterns. It affects various social contexts and thus represents a central element of the sustainability of food systems. In this context, school cafeterias and canteens play a key role, as they exert a significant influence on eating habits and dietary choices. For this reason, school food service facilities represent key areas for action in the prevention of food waste.

As part of the foodCIRCUS project, funded by Interreg Central Europe, the implementation of waste prevention measures in school food services focuses on the two Austrian regions of Vienna and Lower Austria in order to account for both urban and rural conditions.

At the participating schools, waste sorting analyses were conducted on two dates coordinated with the educational institutions. The goal of these surveys was to collect and systematically evaluate quantitative and qualitative data on the volume, composition, and sources of food waste in order to subsequently develop and implement waste prevention measures. As part of the waste sorting analyses, which took place during meal service, the food waste generated was categorized by composition and quantified.

As part of the initial surveys, food waste was examined during the period from February to June 2025. The focus was on both the type of meal service and the catering method. A total of 23 facilities were surveyed, all of which are supplied by different providers. Eleven facilities were supplied via the “Cook & Chill” method, and twelve others either used “Cook & Hold” or operated their own kitchens based on the “Cook & Serve” principle. The serving systems at the facilities varied from buffet-style systems (with or without staff assistance), self-service lines, cafeteria-style lines, and communal dining.

The initial surveys revealed an average loss rate of 44%. The loss rate—that is, the ratio of food waste to the food delivered to the facilities—ranged between 27% and 59%. On average across all school types, 544 g of food were delivered per child, but only 310 g per child were consumed. Furthermore, the results illustrate that, in particular, leftover food from serving (24%) and the quantities delivered represent a key focus for future measures to reduce food loss, while leftovers on plates (9%) and unserved food (7% and 3%, respectively) offer comparatively smaller but still relevant potential for reduction. Overall, it is evident that the main course, accounting for an average of 28%, constitutes the largest share of total losses in nearly all facilities. When measured against the quantities delivered per course, particularly high loss rates were observed for soups (48%) and salads (63%).

In the next step, various waste-reduction measures will be tested in the schools. These include different approaches such as optimizing portion sizes, donating surplus food, or using “nudging” techniques—for example, by serving soup and/or salads at the table.

New Technical and Psychological Methods in Waste Collection and Their Impact on Sorting

Martin Wellacher
Engineering Firm Wellacher e.U., Graz, Austria

Smart methods for collecting waste from individual bins are designed to help eliminate problems in the waste sorting process. First, an assessment (0/1 or graded evaluations) or measurement (scalable readings) must be conducted. This reveals the nature of a bin's contents. Based on this, measures can then be taken precisely where the contents do not meet the requirements for waste separation. Currently, digital methods of surface analysis are the talk of the town. These allow for automated image capture and object detection. This creates the impression that digital analyses are being performed with the help of AI, which alone are sufficient to encourage waste generators to sort their waste more effectively. Well-known and successful methods for improving waste separation include container design (functionality, color), fee structures, and the available collection capacity (keyword: collection frequencies). New methods worth testing include, for example, digital surface analysis, new types of collection bins, or enhanced bin cleaning. Changes in waste separation behavior - the goal of both old and new methods - must be tested for effectiveness. If no testing takes place, the impact remains unclear. To bring about a change in behavior here, local governments and municipal administrations need to communicate effectively with citizens, because the starting point for individual waste generators is that their trash bins have always been picked up until now. Ultimately, cost-effectiveness for the municipality is crucial for achieving a sustainable impact.

EU Biochar LIFE “Screen Overflow as a Carbon Store in the Composting Cycle”

Daniela Meitner[1], Gerald Dunst[2], Thorsten Groeneveld[3] & Patrick Stumm[4]
[1)] Next Generation Elements GmbH, R&D, Feldkirchen an der Donau, Austria
[2)] Sonnenerde GmbH, Managing Director, Riedlingsdorf, Austria
[3)] CarStorCon Technologies GmbH, Managing Director, Marienfeld, Germany
[4)] Pastu Green SRL, Managing Director, Brussels, Belgium

The Biochar LIFE project demonstrates a circular, scalable solution for converting woody screening residues from composting facilities into high-quality plant-based biochar. Screening residues represent a persistent challenge in compost operations: in Austria they are typically incinerated due to contamination and handling issues, closing no material loop. The project addresses this gap by integrating drying and pyrolysis into the composting cycle using a modular PyroDry system. Main objectives were: (1) demonstrate a replicable, circular production pathway for EBC Agro–grade biochar from organic waste; (2) develop marketable end-products (soil improvers, biochar-enhanced concrete/asphalt additives); (3) prove reproducibility for European composting plants; and (4) contribute to EU climate neutrality through durable carbon sequestration and improved waste management.

The project was implemented at Sonnenerde GmbH’s composting site in Riedlingsdorf, Austria. A PyroDry demonstrator built in 2023 was expanded during the LIFE project. Feedstock for pyrolysis are screening overflows — a predominantly woody biomass stream with roughly 5% plastic contamination — kept separate from sewage sludge. The high-temperature pyrolysis fully decomposes plastics and mineral-associated residues, producing stable biochar and surplus thermal energy. Excess heat from two pyrolysis units (~1 MW over >8,000 operating hours per year) is recovered to dry three municipal sewage sludge energy-neutrally (raising solids from ~25% to ~90% TS), integrating energy flows and increasing overall system efficiency.

Operational data over the first 15 project months show successful integration of a second PyroDry line and stable continuous processing of screening overflows without technical issues despite high mineral content. Annual input of approximately 5,320 t of screening overflows is processed to produce ≥1,200 t/year of high-quality, PAH-free biochar, certified EBC Agro by Carbon Standard International. The process replaces prior incineration disposal, avoiding disposal costs and converting a waste stream into valuable product. The produced biochar demonstrates favorable properties for soil amendment and building-material applications; The system’s mass–energy balance indicates that surplus pyrolysis heat is sufficient to operate three sludge dryers, enabling integration with municipal sludge drying. Estimated permanent carbon sequestration is ~2,500 t CO_2 equivalent annually stored in the produced biochar.

The Biochar LIFE project validates the technical and economic feasibility of a modular PyroDry approach for converting problematic compost-screening residues into marketable biochar while delivering energy integration and durable carbon storage. Planned next activities include development, approval, and market introduction of a CO_2-reduced cement additive, broader dissemination of the screening-overflow pyrolysis concept across Europe, and facilitation of replication in other composting facilities.

Plastic-Free Compost: A Circular Economy Approach to Improving Compost Quality

Josef Adam[1], Martin Wellacher[2], Gernot Kreindl[3], Andreas Kunter[4], Alexandra Loidl[5], Franz Poschacher[6], Georg Weingrill[7] & Andreas Zöscher[8]

[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] Engineering Firm Wellacher e.U., Graz, Austria
[3)] Komptech GmbH, Austria
[4)] Leoben Waste Management Association, Austria
[5)] Holding Graz - Kommunale Dienstleistungen GmbH, Austria
[6)] Poschacher Kompost GmbH, Austria
[7)] Binder+Co, Austria
[8)] Mürzverband Waste Management Association, Austria

To ensure the production of quality-assured compost in the future, the Plastic-Free-Compost project focused on the various stages of the composting cycle. The background to this is the growing problem of contaminants—particularly plastics—in compost. For compost producers, it is virtually impossible to mechanically produce quality-assured compost from biowaste with a contaminant content exceeding 3 m% of the wet weight (FW). Legally, a limit of 2 m% for contaminants in biowaste prior to composting is expected to be implemented in the future. New findings were obtained from both scientific and practical perspectives throughout the composting cycle. Collection: The measures implemented result in a continuous reduction in the contaminant content of collected biogenic waste of up to 67%. Contaminant measurement: The rapid measurement method developed reduces the labor and time required by approximately 80–90% compared to manual sorting. Pre-treatment: The process configuration studied produces an input material for composting of < 2% and serves as the basis for a pre-treatment plant operated by Holding Graz. Sensor-based sorting: The suitability of sensor-based sorting for pre- and post-treatment has been demonstrated. Plastic Transformation: Results were obtained regarding the degradation and proliferation behavior of various types of plastic using different processing methods during composting.

Soil Manufacturing Facilities (Vererdungsanlagen) in Austria

Antonia Bernhardt[1], Christian Neubauer[1], Maria Tesar[1] & Vincent Wörndl[1]
[1)] Environment Agency Austria, Waste Management & Prevention, Vienna, Austria

Soil manufacturing facilities (Vererdungsanlagen) are a specialised segment of Austria's waste management sector and circular economy. They produce soils from mineral and organic waste materials and are relevant for the conservation of resources, landfill recultivation, and the recovery of excavated materials. However, the term „soil manufacturing facility" is used inconsistently in practice and in regulatory contexts. This study aims to establish a clear definition for these facilities, assess their status in Austria, and provide a clear distinction from other facility types for soil production from waste.

A multi-stage methodology was applied using reported waste data from the Austrian electronical data management system (EDM) from the reference year 2024, complemented by plausibility checks, online research, consultations with experts from the Austrian federal provinces, and on-site inspections of selected facilities. Across Austria five facilities were identified as soil manufacturing facilities meeting the criteria as defined in the study. To improve systematic classification, the broader category "facilities for the production of soils from waste materials" ("Anlagen zur Herstellung von Erden unter Einsatz von Abfällen") was introduced. This comprises the different types of soil production facilities as there are „soil manufacturing facilities (Vererdungsanlagen), "compost-based soil production facilities" (Erdenwerke), "sewage sludge reed-bed treatment facilities" (Klärschlammvererdungsanlagen), and "screening and mixing facilities for excavated materials" (Sieb- und Mischanlagen für Aushubmaterialien).

The results of the study reveal considerable heterogeneity in the technical processes and operational practices of soil manufacturing facilities in Austria. While conventional soil manufacturing facilities are characterised by biological stabilisation and soil organic-mineral complex formation, current practice in many facilities relies predominantly on mechanical processing and blending. Deliberate soil organic-mineral complex formation processes were observed only in a minority of facilities. Although soil manufacturing facilities represent only a small segment of Austria's waste management sector, they play an important role in the production of landfill cover materials and the recovery of suitable mineral and organic waste streams. The findings underline the need for clearer technical and regulatory distinctions between soil manufacturing facilities and other types of facilities for soil manufacturing from waste to improve legal certainty, statistical consistency, and future policy development.

Between Nutrient Recovery and Contaminant Risks: PFAS in Biowaste and Sewage Sludge within a Circular Economy Framework

Anke Bockreis[1] & Lívia Hökl[1]
[1]University of Innsbruck, Institute of Infrastructure, Unit of Environmental Engineering, Innsbruck, Austria

The recovery of nutrients and organic matter from biowaste and sewage sludge is a key element of the circular economy. However, the presence of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) poses significant challenges due to their persistence, mobility, and potential risks to human health and the environment. As PFAS are widely used in consumer and industrial products, they enter organic waste streams through contaminated food, packaging materials, and green waste.

Conventional biological treatment processes, including composting and anaerobic digestion, are largely ineffective in degrading PFAS. As a result, these substances remain in recycled products and may subsequently be transferred to agricultural soils, crops, and food chains. To estimate the relevance of this pathway, PFAS concentrations reported for selected biowaste fractions were combined with Austrian waste generation data. The assessment indicates a minimum annual PFAS load of approximately 40 kg in Austrian biowaste. Assuming that half of the resulting compost products are applied to agricultural land, around 20 kg PFAS per year could potentially enter soils. Due to limited data availability and methodological inconsistencies, actual loads are likely higher. In comparison, sewage sludge is supported by a more comprehensive monitoring framework. Estimated annual PFAS emissions from agricultural sludge application range between 0,1 and 1,5 kg. The comparison highlights substantial differences in data quality and uncertainty between the two waste streams.

The findings demonstrate that PFAS represent a growing challenge for the circular use of organic waste resources. Improved monitoring, harmonised analytical methods, source-control measures, and targeted regulations are essential to reduce PFAS inputs while preserving the environmental benefits of nutrient recycling and organic waste recovery.

The UNFC Resource Classification as an Evaluation Framework for Phosphorus Recovery Projects from Sewage Sludge

Soraya Heuss-Aßbichler[1], Ludwig Hermann[2] & Juan Antonio Munizaga-Plaza[1,3]
[1)] Department of Earth and Environmental Sciences, Ludwig-Maximilians-Universität München, Munich, Germany
[2)] Proman Consulting, Vienna, Austria
[3)] Institute of Environmental Sciences (CML), Leiden University, Leiden, The Netherlands

Phosphorus is a nutrient element that is both essential and irreplaceable. It has been classified as a critical raw material by the European Union since 2014. In Germany from 2029, and in Austria from 2032, the recovery of phosphorus from sewage sludge becomes a legal obligation. Operators of wastewater treatment plants therefore face the challenge of selecting the technology best suited to their site from a large number of options, only few of which have been tested at industrial scale. This study applies the SARA*4*UNFC methodology, a structured assessment approach built on the United Nations Framework Classification for Resources (UNFC) and developed within the Horizon Europe project FutuRaM, to evaluate recovery projects in an integrated way and to provide a robust, transparent, and comparable basis for decision-making. Two phosphorus recovery processes are examined as illustrative cases: R-Rhenania, a thermochemical process based on the AshDec principle, and Phos4Life, a wet-chemical process for the production of phosphoric acid. The UNFC classification yields E2 F2.1 G1 for R-Rhenania and E3.3 F2.2 G2 for Phos4Life. The comparison illustrates the complementary strengths and weaknesses of the two projects. It also demonstrates that, alongside technology and regulatory frameworks, further factors such as sewage sludge composition, product quality, market access are decisive for successful implementation.

The study demonstrates that for a well-founded site comparison, meeting the minimum permitting requirements (Basic-ROD) is not sufficient; rather, it is necessary to broaden the context of evaluation - *the realm of discourse* ROD - to include factors relevant for the circular economy (CE-ROD) and sustainability (SDG-ROD). The phosphorus recovery case clearly demonstrates that, beyond the individual project, a coordinated material supply at the regional level is crucial for the implementation of such complex process. It underscores the need to link project-level assessment with regional and national supply structures. The Integrated UNFC-MFA Framework developed within the FutuRaM project combines the project classification using SARA4UNFC with material flow analysis (MFA) at the regional and national levels, thereby addressing the questions “which technology at which site?” and “what quantities are processed where, and which supply gaps remain?”. Broadening the perspective to the meso level is essential for coordinating the various stakeholders, such as plant operators, regulatory agencies, off-takers, consumers and municipalities, and thereby promoting the development of optimal solutions that reconcile national recovery obligations with local needs.

Feasibility study on the retrofitting of a thermochemical phosphorus recycling process for existing mono-sewage sludge incineration plants

Jakob Hirsch
CONENGA Group, Vienna, Austria

Due to upcoming legal requirements in Austria regarding phosphorus recovery from municipal sewage sludge, the development of technically and economically viable recycling processes is becoming increasingly important. The aim of this thesis was to investigate the technical and economic feasibility of retrofitting existing sewage sludge mono-incineration plants with the P-XTRACT phosphorus recovery process. For this purpose, the process was analysed based on the pilot plant of the Staufener Bucht Wastewater Association and transferred to an existing sewage sludge mono-incineration plant with a stationary fluidized bed combustion system in Europe, hereinafter referred to as the example plant. The technical assessment was based on a preliminary design of the required plant components. The economic assessment was carried out in accordance with ÖNORM EN 17463:2021 (VALERI) using the net present value (NPV) method.

The P-XTRACT process aims to enable the direct use of phosphorus-rich sewage sludge ash as a fertilizer. For this purpose, the additive sodium carbonate is added to the fuel, where it reacts with phosphorus compounds during combustion to form plant-available phosphate minerals. To separate the phosphorus-rich fly ash from the flue gas stream, in which many heavy metals remain in the gaseous phase, a hot gas cyclone is installed immediately downstream of the combustion chamber.

The results of the study show that technical implementation of the process is generally feasible without requiring modifications to the existing fluidized bed combustion system or the flue gas cleaning system. However, retrofitting the phosphorus recovery process requires additional plant components, including a hot gas cyclone with an ash conveying system and intermediate storage for the cyclone ash, as well as an additive dosing unit including additive storage.

For the economic assessment, the benefits and costs associated with the investment were determined in accordance with ÖNORM EN 17463:2021 and evaluated using the net present value method. Subsequently, the net present value was calculated for the most likely scenario. Under the assumptions made, the resulting net present value exceeds €17 million. A sensitivity analysis was performed by varying individual parameters and evaluating their influence on the net present value. The results indicate that the market price of the phosphorus-rich cyclone ash, the project lifetime, the calculation interest rate, and the savings in ash disposal costs have the greatest influence on the net present value.

The technical and economic assessment demonstrates the feasibility of the proposed retrofit. Key factors influencing the implementation of the P-XTRACT process include the approval and marketing of the phosphorus-rich ash as a fertilizer or as a raw material for fertilizer production. Furthermore, since each plant has its own technical characteristics, a site-specific detailed engineering design and assessment of the technical and economic impacts are required before implementing such a retrofit.

Innovating Circular Business Models through Collaboration and Digital Technologies to extend Product Life Cycles

Romana Rauter[1] & Anika Schmitt[1]
[1)] Department of Environmental Systems Sciences, University of Graz, Graz, Austria

Businesses' dependence on finite natural resources and tightening European Union regulations are pushing firms toward circularity and circular business model innovation (CBMI) at the industry and firm level. However, market failures, such as information asymmetries, coordination problems, and incomplete markets for secondary materials continue to impede progress. We argue that digital platforms can help overcoming these barriers by coordinating actors, resources, and information across organizational boundaries, thereby stimulating CBMI. Drawing on four illustrative cases we distinguish between platforms as intermediaries, which facilitate exchanges of surplus resources and secondary materials, and software-as-a-service platforms, which enable resource tracking, data sharing, and value-chain coordination. We demonstrate that digital platforms can reduce transaction costs, enhance transparency and traceability, and create new opportunities for value creation and capture. However, their impact depends on the ability to generate network effects, manage governance tensions, and satisfy data and infrastructure requirements. Ultimately, scaling CBMI depends not only on technological sophistication but equally on firms' willingness to collaborate and share data, and on how deeply platform-enabled circularity becomes embedded within their business model portfolio.

Innovative and Sustainable Business Models for Waste Management Machinery: The Case of Komptech

Jochen Mandl[1], Ewald Konrad[2] & Bernd Walter[3]
[1)] Komptech, Internal Sales Management, Frohnleiten, Austria
[2)] Komptech, Management, Frohnleiten, Austria
[3)] Komptech, Marketing & Communications, Frohnleiten, Austria

Due to high energy and production costs, as well as an economically uncertain situation, machinery manufacturers in the waste management and environmental technology sectors have been experiencing declining demand and reduced willingness to invest since 2023. Sustainable and innovative business models that offer customers greater flexibility and lower costs are therefore in greater demand than ever. A pioneer in this field is the Austrian company Komptech, a leading technology and expertise partner for mechanical and biological waste recycling as well as the processing of woody Biomass. Komptech offers various business models that cover all customer needs, ranging from long-term ownership to short-term and flexible solutions.

The traditional business model for machinery manufacturers remains the sale of machines, whereby the customer adds the new machine as a permanent fixture to its fleet. However, this is associated with high investment costs and low flexibility in the face of fluctuations in utilization rates. A more cost-effective option is to purchase a used machine. To avoid the risk of poor quality with used machines, it's worth choosing providers like Komptech, which recondition the used machine and offer it for sale again with the "Certified Used" quality guarantee.

Another option is to rent machines instead of buying them. The steadily rising demand for rental models is primarily due to their appeal to customers with fluctuating needs and limited liquidity, as there are no high investment costs and the total costs remain predictable.

Since spring 2026, Komptech has also been offering the pay-per-use model in Austria and Germany. Under this business model, costs are tied to actual usage; the customer pays per actual operating hour. This results in automatic cost scaling: Monthly costs rise only if monthly revenue also increases due to higher load. This enables the highest possible flexibility and cost control.

Due to rising recycling rates and increasingly stringent environmental regulations, the environmental technology and waste management industry will experience a new upswing in the long term. Innovative models that go beyond the traditional purchase option are already laying the foundation for this while simultaneously incorporating the principles of the circular economy.

The EU Circular Economy Act – A Long-Awaited Restart for Europe's Resource Policy

Gregor Biley[1]
[1)] Niederhuber & Partner Rechtsanwälte GmbH, Graz/Vienna, Austria

The European Union is preparing the "Circular Economy Act" (CEA), a new legal instrument to fundamentally reorganize the internal market for waste, secondary raw materials, and secondary products. Unlike previous action plans in this field, the CEA is explicitly positioned as competition and industrial policy.

While initial progress is visible—recycling rates have increased and employment in the circular sector has grown—significant challenges remain. The circular material use rate has stagnated at around 11.8% in 2023. Additionally, growing dependence on imports of strategic and critical raw materials poses challenges, with near 100% import dependency for heavy rare earths. The CEA responds to this situation. As a regulation based on Article 114 TFEU, it aims to harmonize the internal market for waste, secondary raw materials, and products derived from them, explicitly anchoring circular economy as a competition and security instrument. It builds on existing legal acts but addresses market and governance questions in particular. A broad public consultation in 2025 formed the empirical basis for the impact assessment.

The CEA aims to significantly accelerate the transition to a circular economy and create a functioning internal market for waste and secondary raw materials. The Commission identifies two central areas of action: waste electrical and electronic equipment (WEEE) and the internal market for waste and secondary raw materials. In the WEEE area, the CEA aims to improve collection and recycling and create demand for critical secondary raw materials from these devices. Horizontal measures aim to harmonize fundamental legal concepts and instruments, particularly end-of-waste criteria and the definition of by-products. Currently, 27 national regimes with different requirements exist regarding when a substance loses waste status. This fragmentation leads to legal uncertainty, hinders cross-border trade in secondary raw materials, and prevents economies of scale.

Another focus is the reform of Extended Producer Responsibility (EPR). The Commission sees structural governance problems here: EPR systems are strongly oriented toward cost minimization for producers and little toward circular outcomes. The textile sector shows that reuse and collection are underfinanced and burdened by declining quality of collected goods. The CEA aims to simplify, harmonize, and digitalize EPR systems, for example through EU-wide online platforms for registration, more transparency on fees, and minimum requirements for the use of funds. Public procurement is seen as a lever to promote demand for secondary raw materials. The CEA aims to define criteria for tenders that consider circular aspects such as durability, reparability, recyclability, and recycled content.

At present, no official texts for legislative acts have been published or are under review; therefore, as of the time of this article’s publication, it is not yet possible to provide a precise legal assessment of the Commission’s proposals.

NETZWERKEN MIT 260 PARTNERN

Der Cleantech-Cluster der oberösterreichischen Standortagentur Business Upper Austria ist die Plattform der Umwelttechnik- und Energietechnologie-Unternehmen in Oberösterreich. Wir bringen Lösungsanbieter und Lösungsanwender in der Umwelt- und Energietechnologie zusammen. In branchenübergreifenden nationalen und internationalen Wertschöpfungsnetzwerken entwickeln wir gemeinsam innovative Lösungen, um die Ressourceneffizienz zu steigern, Emissionen zu reduzieren und eine saubere Umwelt zu fördern.

Unsere Schwerpunkte

- Kreislaufwirtschaft
- Defossilisierung und Dekarbonisierung
- Nachhaltigkeitsmanagement
- Reinhaltung von Boden, Luft und Wasser

Unsere Leistungen

- Begleitung von Kooperationsprojekten von der Idee bis zur erfolgreichen Umsetzung
- Vernetzung von Unternehmen, Forschungs- und Bildungseinrichtungen
- Zugang zu aktuellem Know-how und Erfahrungsaustausch
- Neutrale Plattform für branchenübergreifende Zusammenarbeit
- Mehr Sichtbarkeit, Reichweite und Marktchancen für unsere Partner

Code scannen für Newsletter Anmeldung

www.cleantech-cluster.at

Sichern Sie sich den Wissens- und Informationsvorsprung, der den Unterschied macht.

CTC CLEANTECH CLUSTER

business upper austria

International Solid Waste Association (ISWA-Austria)

ISWA Austria stellt als nationale Plattform der ISWA in Österreich für Ihre Mitglieder eine Schnittstelle zur weltweiten Abfallwirtschaft dar und schafft die



Austria ISWA



Möglichkeit zur Kooperation und internationalen Präsentation sowie zum Know-how-Transfer von und nach Österreich.

www.iswa.at

Autorenverzeichnis

A

Aberger Julian ... 317
Achilles Lina-Sophie ... 781
Adam Josef ... 843
Adami Cornelia ... 313
Afghani Jamie ... 637
Aguirre Martinez Gabriela Veronica ... 247
Alejo Alvarez Luz ... 307, 553
Allesch Astrid ... 225
Ammerer Wolfgang ... 327
Angerler Theresa ... 237
Archodoulaki Vasiliki-Maria ... 661
Assmann Anna-Caroline ... 465
Atzenhofer Christina ... 697
Ausserleitner Markus ... 725
Autischer Michael ... 427
Azizi Ferozan ... 503

B

Baacke Lina ... 267
Bäcker Paul ... 571
Ballüer Simon ... 173
Bardenheuer Peter ... 547
Baron Mechthild ... 809
Bartl Andreas ... 195, 201, 225, 247
Bauer Cornelia ... 675
Bauer Markus ... 517
Bauer Werner ... 111
Beigl Peter ... 167, 225
Bendl Simon Franz ... 439
Berg Matthias ... 599
Bermadinger Jasmin ... 787
Bernhardt Antonia ... 849
Bertl Christine ... 155
Biley Gregor ... 879
Billes Martin ... 685
Binner Erwin ... 187
Birkenmeier Marcellus ... 637
Birklbauer Ludwig ... 483
Blothe Christian ... 623
Bockreis Anke ... 853
Bouvier-Schwarz Therese ... 495
Brandner Lea A. ... 393
Bratz Holger ... 691
Bredács Márton ... 561
Brosch Nicole ... 405
Brüning Ralf ... 365
Buchegger Leo ... 263

Burgstaller Christoph 387
Büter Andreas 781

C
Cassier-Woidasky Anne-Kathrin 775
Chang Yuwei 173
Chen Xiaozheng 537
Chettouh Chaimae 333
Churakov Sergey 461
Crudici Andreea 787
Cudlik Christoph 129
Czaker Sandra 355

D
Dahlmann Leonie 809
Dähn Rainer 461
Datko Annika 547
Demschar Paul 471
Depope Nika 201
Dietl Tobias 213
Dietzel Martin 703
Dippold Elisabeth 561
do Carmo Precci Lopes Alice 411
Döberl Gernot 725
Döll Monika 793
Dornack Christina 809
Doschek-Held Klaus 237, 491, 685, 697, 713, 719
Draws Martin 637
Drew David 181
Dunst Gerald 839

E
Ebbbing Jochen 423
Ebner Rita 405
Eckert Alexander 405
Egan Jeannie 201
Egger Florian 301
Eisenberger Martin 117
Enderlein Thomas 103
Ennis Bernard 301
Ennnen Alexander 423
Ernst Kai 803
Ertel Thomas 629

F
Faigle Benjamin 637
Feil Alexander 307, 553
Feldbacher Sonja 503
Felgel-Farnholz Alexander 355, 371
Fenkart Norbert 661
Feucht Florian 713
Fiala Monika 141
Findl Martin J. 815
Fink Thomas 417

Fischer Jörg 343, 355, 359, 371, 523
Flachberger Helmut 675
Flamme Sabine 399
Forsting Jürgen 647
Fricko Nora 455
Fritz Gerhard 167
Frühwirth Matthias 375

G

Gabriel Viktoria Helene 661
Galler Robert 815
Gappmaier Dominik 455
Gäth Stefan 229
Gatschlhofer Christoph 719
Gehrmann Hans-Joachim 67
Geier Jutta 561
Gelbmann Ulrike 161
Gerold Eva 445
Gessner Constantin 323
Ginner Laurin 405
Ginzinger Lukas 273
Göbbels Lieve 307
Goetjes Victoria 333
Golja Gregor 455
Gomernik Florian 675
Goswami Mithun 561
Gottam Sai P.R. 815
Graf Julia 237
Gregurek Dean 477
Greiff Kathrin 307, 465, 547, 553
Grengg Cyrill 697, 703
Gries Thomas 207
Griza Samuel 637, 667
Groeneveld Thorsten 839
Grünfelder Agnes 201
Gübitz Georg M 201

H

Haberbauer Marianne 483
Habermaier Clemens 483
Hagedorn Wiebke 465
Halwax Alexander 713
Hänggi Philipp 461, 611, 679
Haslauer Hans Christian 761
Haubrichs Roland 617
Hauer Walter 147
Heim Hans-Peter 333
Hendrichovsky Filip 405
Herbinger Birgit 201
Hermann Ludwig 859
Heuss-Aßbichler Soraya 623, 859
Hirsch Jakob 865
Hlawitschka Mark 587
Hodecek Peter 123

Hofer Katharina ... 825
Hoffmann Lea ... 605
Hökl Lívia ... 853
Holfelder Anna ... 67
Hrad Marlies ... 511, 641
Huber-Humer Marion ... 225, 641

I
Ihle Justus ... 489
Ionescu Emanuel ... 411
Ispyrian Lilit ... 729

J
Jäckel Stefan ... 489
Jandric Aleksander ... 273
Jerabek Michael ... 561
Jürgens Lara ... 423

K
Kaas Alexandra ... 439
Kadu Sangit ... 173
Kalb Michael ... 423
Kämpfer Patrick ... 611, 679
Kanzler Veronika ... 393
Kappelt Niklas ... 267
Katalan Tatjana ... 89
Kaya Ferhat ... 637
Keber Sebastian ... 709
Kellner Clarissa ... 637
Kemfert Claudia ... 809
Kern Stephan ... 141
Keßler Hermann ... 809
Khodier Karim ... 583
Kitazume Christian ... 365
Klapal Florian ... 587
Klett Wolfgang ... 95
Kobald Hanna ... 725
Köck Andreas ... 477
Koinig Gerald ... 283, 295, 359, 417
Kolonovits Luca ... 445
Konrad Ewald ... 875
Köser Wolfgang ... 537
Kraffczyk Torben ... 151
Kraiger Hartwig ... 761
Krammer Anna Christine ... 685, 697, 713, 719
Kraußler Alois ... 511
Kreindl Gernot ... 511, 843
Kremlicka Thomas ... 471
Krempl Nina ... 375
Kroell Nils ... 537
Kronberger Bernhard ... 455
Kronenwett Felix ... 565
Kuchta Kerstin ... 61
Kuhn Nikolai ... 359, 371

Kunter Andreas 843
Kunz Miriam 757
Küppers Bastian 213, 537

L
Lackner Maximilian 181
Laner David 333
Lang Sara 767
Längle Thomas 565, 571
Langwieser Johanna 349
Lassnig Herbert 743
Lehner Markus 259, 263
Leisner Johannes 423
Leiss Norbert 565
Leitgeb Martin 583
Leitner Alexander 477
Lerchbammer Reinhard 445
Lettner Julia 661
Lilek David 201
Lindner Jan Paul 605, 637
Loidl Alexandra 843
Löwe Detlef 617
Luck Sandra 825
Ludes Annika 213

M
Mager Moritz 359, 371, 523
Maghmoumi Abtin 547, 553
Maier Georg 565, 571
Maier Jürgen 767
Malli Sreekar Babu 173
Maltschnig Melanie 725
Mandl Jochen 875
Mandl Matthias 445
Mann Oliver 729
Marković Katarina 561
Martinelli Walter 283
Maurer Claudia 667
Mautner Andreas 201
Mayer Barbara 317
Meier Konstantin 647
Meissner Markus 787
Meitner Daniela 839
Melcher Frank 81
Menedetter Victoria 167, 255
Meyer Michael 719
Michaelis Julia 809
Mischitz Robert 587, 749
Mittermayr David 355
Moritz Charles 181
Moritz Eva 531
Moroz Uliana 135, 795
Moser Birgit 725
Müller Jürgen 531

Müller Peter 587, 749
Mumm Nico 637
Munizaga-Plaza Juan Antonio 859
Muralt Simon 135
Muster-Slawitsch Bettina 523
Mütze Thomas 439

N
Nagy Martin 749
Natau Frank 599
Neubauer Christian 849
Neuwirth Nina 483
Niewerth Stefan 743
Nigl Thomas 381, 393, 427, 435, 451, 495, 503
Novak Martin 661
Nowak Nina 427
Nti Richard Yaw 393

O
Obersteiner Gudrun 167, 243, 825
Obriejetan Michael 511
Oppe Matthias 781
Orawiec Ina-Marie 781
Oreski Gernot 561
Ottenweller Moritz 577
Ottner Reinhold 825
Ozi Stefani 523

P
Pane Mauricio 523
Pardametz Verena 349
Petschinka Patrick 129
Peuker Urs Alexander 439
Pfeiffer Herwig 219
Pfeiffer Josefine 587, 749
Pfitzner Manuel 661
Pfund Elias 213
Pladerer Christian 167, 255
Plesch Theresa 523
Poetke Dieter 735
Pöltner Roman 671
Pomberger Roland 81, 815
Poschacher Franz 843
Prantl Roman 593
Premm Wolfgang 477
Prüller Simon 495
Purgleitner Bianca 387

Q
Quartinello Felice 201
Quicker Peter 67

R
Radmann Yves 283
Ragossnig Arne M. 135, 511, 795
Raič Sara 703
Raonic Zlatko 719
Raulf Karoline 307, 547
Raupenstrauch Harald 719
Rauter Romana 869
Rechberger Helmut 251
Reichenauer Thomas 593
Reiter Sarah 263
Reiter Wolfgang 491
Rettenberger Gerhard 657
Reuck Katharina 141
Riegl Peter 691
Rinderhofer Alexander 531
Rittmannsberger Franz 343, 349
Rivić Stefani 251
Rogalski Wojciech 819
Romm Thomas 787
Roos Jasmin 207
Rosefort Jacqueline 465
Rosenau Thomas 201
Rosenbusch Sebastian 225, 247
Rudolf-Scholik Judith 201
Ruech Daniel 593, 629
Rueckert Elmar 815
Rutkowski Cornelia 451
Rutrecht Bettina 435

S
Saga Rainer 327, 583
Sager Daniela 623
Salhofer Stefan 273
Samtleben Jantje 173
Sandu Daniel E. 815
Sarc Renato 317
Sattler Theresa 685
Schatz Eva-Maria 809
Schebek Liselotte 411
Scheidl Felix 283, 417
Schenk Kristina 629
Schetter Philipp 399
Schimper Christian B. 201
Schipfer Christoph 543
Schlesinger Oskar 729
Schlögl Sabine 537
Schluz Jasmin 531
Schmid Petra 337
Schmid Verena 417
Schmidt Sarah 333
Schmied Elisabeth 225, 243, 825
Schmitt Anika 869
Schmitt Tom 537

Schmüdderich Christoph ... 743
Schnedl Gerold ... 685
Schneider Daniel ... 815
Schneider Johannes ... 337
Schöggl Josef-Peter ... 161
Schrama Frank ... 301
Schütz Silvia ... 243
Schwabl Daniel ... 517
Sedlazeck Klaus Philipp ... 81, 471, 713, 815
Sedlazeck Simone ... 477
Seifert Manuel ... 661
Sieber Ina ... 809
Siebert Björn ... 267
Simon Melina ... 647
Sitz Lukas ... 749
Sommerauer Florian ... 749
Sonnweber Benedikt ... 543
Spies Alena Maria ... 547
Spiess Sabine ... 483
Spoo Helmut ... 277
Stadlbauer Michael ... 181
Stapf Dieter ... 67
Steindl Florian R. ... 703, 719
Steiner Sarah ... 685
Steinlechner Stefan ... 477
Stockinger Gerhard ... 543
Straka Maximilian ... 187
Strohmeier Felix ... 283, 289
Stumm Patrick ... 839
Sykacek Eva ... 201

T

Tesar Maria ... 849
Thaler Christoph ... 483, 491
Thome Volker ... 565
Tischberger-Aldrian Alexia ... 283, 289, 295, 359, 417, 661
Tomsik Daniel ... 729
Torres Juan ... 561
Traidl-Hoffmann Claudia ... 637

U

Ulrich Kai-Uwe ... 735

V

Vay Benedikt ... 167, 187
Veralikkattil Assainar Mohammed Hafis ... 333
Verma Vipul ... 523
Vielsack Anton ... 775
Viere Tobias ... 775
Viertauer Erik ... 483
Vogel Bendix ... 809
Vogelgesang Malte ... 411
Vollprecht Daniel ... 605, 637, 667, 803

W
Wachtler Leonie Theresia 233
Walder Franz Peter 455
Waldl Wolfram 675
Walter Bernd 875
Warnecke Ragnar 67
Weber Hannah 417
Weh Alexander 461, 611, 679
Weibel Gisela 461, 611, 679
Weingrill Georg 843
Weisgram Martin 725, 833, 843
Welte Jonathan 671
Wilken Anja 757
Winkler Elisabeth 767
Winkler Klemens 283, 289, 301
Wissel Ricarda 207
Witt Florian 365
Wohter Daniel 67
Woidasky Jörg 775
Wolffers Mirjam 461
Wootthikanokkhan Naruporn 661
Wörndl Vincent 849
Wruss Werner 729
Wudtke Robert-Balthasar 173
Wurzer Eva-Maria 219

Z
Zafiu Christian 187
Zanaschka Philipp 181
Zecha Franziska 775
Zeilinger Hannah 343
Zimek Martina 161
Zöscher Andreas 843
Zotter Sophie 263
Zumpfe Sonja 787
Zwisele Bertram 233

Sachregister

0-9
10R ... 161

A
Abfallbehandlungsanlage ... 129
Abfallcharakterisierung ... 255, 333
Abfälle der Zukunft ... 381
Abfallende ... 95, 135, 155
Abfallmanagement ... 853
Abfallmengen ... 775
Abfallrahmenrichtlinie ... 225
Abfallrecht ... 95
Abfallsortierung ... 233
Abfallverbrennungsverordnung ... 719
Abfallvermeidung ... 825
Abfallwirtschaft in Hochhäusern ... 61
Abfallwirtschaft ... 151, 161, 255, 381, 691, 875
Absaugversuch ... 657
Abstromsicherung ... 767
Acidithiobacillus thiooxidans ... 445
Adsorptive Deponiebasisabdichtung ... 743
AFFF ... 587
AI ... 289
Aktivkohle ... 761
Aktivkohlesorption ... 735
Alkalisch aktivierte Materialien ... 697, 703
Alternative Bindemittelkomponente ... 685
Alternative Gesteinskörnung ... 679
Alternative Rohstoffe ... 675
Altfahrzeug ... 123, 283
Altholz ... 577
Altlast ... 629, 725
Altlastenbearbeitung ... 623
Altlastensanierung ... 767
Analyse ... 833
Anlagenbau ... 537
Anlagenumrüstung ... 865
Annotation ... 405
Anorganisches Wachstum ... 151
Anreicherung ... 853
Antizipation ... 381
Aqua regia ... 451
Arbeitnehmerschutz ... 135
Artenschutz ... 117
Asbest ... 81, 135, 795
Asbestos detection ... 565
Assistenzsystem ... 317
Aufbereitung ... 343

Aufbereitungsverfahren 461
Aufkonzentrierung 587
Automated rock classification 815
Automatisierung 537

B
Ballistic separator 547
BAM 691
Batterien 89
Batterierecycling 445
Batterieverordnung 435
Batteriewertschöpfung 427
Bauen 787
Bauschutt 803
Bausektor 809
Baustoffrecycling 81
Beendigung Belüftungsmaßnahme 641
Begriffsschärfung 381
Behälterglas 543
Behandlungspflichten 123
Behandlungsrückstände 471
Beleuchtung 229
Berichtspflichten 233
Bestandserhalt 809
Beton 267
Betonfertigteile 679
Bewertung 229
Bewertungskriterien 503
Bifunktionale Dichtung 617
Bildverarbeitungspipeline 405
Bioabfallgebühren 819
Bioabfallqualität 819
Bioabfallsammlung 819
Biochar 839
Biodegradation 187
Biogas 181, 819
Biogene Abfälle 843
Bioleaching 483
BIOMEMBRAT®-plus 599
Biometallurgie 445
Biopolymer 757
Black Mass 439
Bleiglas 543
Bodenaushub 803
Bodensanierung 743
Bodenschutz 623
Bordotierte Diamantelektrode 749
Brand 423
Brandvermeidung 427
Brantner 543
Brownfield-Photovoltaik 511
Bündelung 233
Bypassstaub 263
By-product recycling 491

C
C1 biotechnology ... 181
CCS ... 259
CCU ... 259
CCUS ... 263
CDR ... 259
CF_4 ... 67
Challenge Test ... 337
Chemische Reinigung ... 593
Chemometrics ... 553
Chipproduktion ... 671
Chrom ... 629, 709, 713
Circular business model innovation ... 869
Circular Economy (CE) ... 201, 465, 491, 815, 869
Class separability ... 553
Closed-Loop ... 477
Closed-Loop-Recycling ... 219, 375, 793
CO_2 Bindung ... 839
CO_2 Rechner ... 243
CO_2-Emissionen ... 229
CO_2-Speicherung ... 263
Composite ... 387
Composting ... 187
Construction and demolition waste ... 565
Construction Demolition Waste ... 307
Contaminants ... 561
Contaminated Site Remediation ... 637
Conveyor belt ... 815
Co-Solvatisierung ... 729
Critical Raw Materials ... 295

D
Datenfusion ... 405
Datenqualität ... 435
Decontamination ... 571
Deep eutectic solvents ... 201
Deep Learning ... 313, 417
Degradation testing ... 187
Dehalococcoides ... 593
Dekarbonisierung ... 173
Dekontamination ... 337
Demontage ... 123, 283
Deponie auf Deponie ... 617
Deponie ... 111, 599, 691
Deponieemissionen ... 657
Deponiegas du Deponiegaspotenziale ... 647
Deponiegas ... 657
Deponiegaserfassung ... 657
Deponieklasse I ... 617
Deponieklasse II ... 617
Deponiekonditionierung ... 611
Deponienachnutzung ... 511
Deponienachsorge ... 511
Deponierekultivierung ... 849

Design for Recycling 141
Detektion 833
Deutungshoheit 161
Dichtetrennung 517
Digital twin 289
Digital 833
Digitalisierung 317, 327, 537, 583
DIWASS 323
Drainage 735

E

EAF-Schlacke 803
Edelmetalle 273
Edelstahlschlacke 713
Elektroaltgeräte (EAG) 277, 365
Elektro-Elektronik-Altgeräte 147
Elektrolyse 587, 749
Elektronischer Begleitschein 323
Empirische Untersuchungen 647
End-of-Waste-Kriterien 95
End-to-End-Lösung 317
Energy Payback Time 495
Entsorgungsverhalten 661
Entwicklung Prüfverfahren 495
Enzymatic hydrolysis 201
Epoxidharz 387
EPR-System 225
Erden aus Abfällen 849
Erdenherstellung 849
Ersatzrohstoffe 675
Erweiterte Herstellerverantwortung 141, 167225
EU 89
EU-Batterieverordnung (EBR 2023) 451
Excavated material 815
Experteninterviews 207
Export 123
Extended Producer Responsibility (EPR) 219, 879

F

Fahrzeuge der Zukunft 283
Faser-Kunststoff-Verbunde 781
Feinfraktionen 471
Feldanwendung 757
Feldversuch 593
Festphasenextraktion (SPE) 729
Feuerfestmaterial 263
Feuerfestrecycling 477
Feuerlöschübungsplätze 725
FFH Richtlinie 117
Filteraschen 611
Flächenrecycling 623
Flächenverbrauch 623
Flexible Verpackungen 337
Fließschemasimulation 411

Flotation 749
Flue gas treatment 455
Fluidized bed 455
Fluortensidhaltigen Löschmittel 757
Fragmentation 187
Friktionswäsche 523
Front-End-Halbleiterfertigung 671
Future Waste 503

G

Gas fermentation 181
Gasbildungsrate 657
Geogenbedingter Asbest in Gesteinskörnungen 81
Geosynthetics 691
Geosynthetischer Flächenfilter 743
Getrennte Alttextilsammlung 219
Gipskarton 795
Gipskartonabfälle 793
Gipsrecycling 793
Glasfaserverstärkung 387
Glass Recycling 313
Glaswolle 685
Gluconobacter oxydans 445
Granulierte Aktivkohle 599
Green Deal 691
Green recycling 393
Grenzwerte 81
Grundwasser 735

H

H_2O_2/HCl leaching 393
Handheld sensor 565
Händische Sortierung 317
Hard-to-Abate Emissionen 259
Harmonisierung 879
Haushalte 243
Hausmülldeponien 725
High-performance Rezyklate 371
Hochrechnung 167
Holzschutzmittel 577
Hydraulische Reaktivität 685
Hyperspectral imaging 565

I

Indikatorenkatalog 237
Industrie4.0 583
Industrielle Wasseraufbereitung 531
inline monitoring 561
InnoTeer 571
Innovation 503
In-situ Belüftung 641
In-Situ Sanierung 593
In-situ-Sickerwasserbehandlung 743
ISCR 629

J
Joint Venture ... 151

K
Kaufmodelle ... 875
KI ... 317
KIRAMET ... 289
Klärschlamm Biokohle ... 719
Klärschlamm ... 719, 859
Klärschlammasche ... 719
Klärschlammverbrennung ... 865
Klimawirkung ... 775
Kohlenstoffmanagement ... 259
Kommunikation ... 111
Kompost ... 843
Kompostierung ... 819
Konditionierung ... 713
Konzentrat ... 749
Kreislaufwirtschaft ... 61, 95, 103, 155, 161, 173, 195, 225, 247, 277, 343, 349, 405, 427, 471, 531, 679, 703, 775, 787, 793, 795, 809, 879
Kreislaufwirtschaftsgesetz ... 103
Kulturfähige Erden ... 849
Kumulation ... 129
Künstliche Intelligenz ... 417, 803
Kunststoff-Charakterisierung ... 359
Kunststoffe ... 365, 517
Kunststoffrecycling ... 251, 333, 359, 523
Kunststoff-Sleeves ... 661
Kunststoffverpackung ... 251, 661
Kupfer ... 461

L
Labormachbarkeitsstudie ... 757
Laborversuche ... 593
Landfill Mining (LFM) ... 605
LCA ... 637
Lebensmittelabfall ... 825
Lebensmittelkontakt ... 349, 355
Lebensmittelverschwendung ... 243
Lebenszyklusanalyse (LCA) ... 465
Legislative ... 111
Leichtverpackungsabfälle (LVP) ... 423
Leiterplatten ... 273
LIBS ... 301, 477, 803
Lightweight packaging waste ... 547
Lithium-Ionen-Batterien (LIB) ... 423, 435, 445
Littering ... 167
Löschschaum ... 761, 767
Lösemittelbasiertes Recycling ... 337
Low-cost quality control ... 313
Luz Alejo ... 307
LVP-Charakterisierung ... 359

M

Machine Learning 295
Maschinelles Lernen 411
Maschinenbau 537
Materialcharakterisierung 247
Materialflussanalyse 333
Materialzusammensetzung Trends 273
Mechanical recycling 561
Mechanische Aufbereitung 471
Mechanische Nassaufbereitung 523
Mechanisches Recycling 371
Mega-Cities 61
Membrantechnik 531
Messung 833
Metallhaltige Sekundärstoffe 489
Metallrückgewinnung 477
Metallurgische Stäube 483
Methanemissionen 641, 647
Methanoxidation 511
MFA 251
Mietmodelle 875
Mikroplastik 853
Mindestrezyklateinsatzquote 251
Mineralische Feinfraktionen 267
Mineralwolleabfall 685
Mischanlage 611
Mittelstand 151
Model 301
Moderne Aufbereitungstechnologie 489
Morphologischer Kasten 207
Müllverbrennung 111
Müllverwertung 461
Multi-Sortieranlage 173
MVA-Rostasche 679
MVA-Schlacke 611
MWIR 571

N

Nachhaltiger Konsum 243
Nachhaltigkeit 89, 111, 229, 583
Nachsorge 641
Nahinfrarotspektroskopie 207
Nanofiltration 599
Nasschemischer Aufschluss 451
Nass-mechanisch 517
Nassmechanische Aufbereitung 605
Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie 95
Naturschutz 117
Near-infrared spectroscopy 565
Neuware 671
NIR spectroscopy 561

O

Oberflächenkontamination ... 523
Odoo ... 327
Ökobilanzierung ... 605
Ökomodulation ... 147
Ökotoxikologie ... 247
Online-SPE-LC-MS/MS ... 729
ÖNORM EN 17463:2001 (VALERI) ... 865
Optische Inspektion ... 405
Optische Sortierung ... 543
OTM-45 ... 67
OTM-50 ... 67
Output-Spezifikationen ... 213

P

Papier-Sleeves ... 661
Partial equilibrium model ... 251
Partizipation ... 237
Peak Focusing ... 729
PEM electrolyser ... 393
Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen ... 725
Persistente organische Schadstoffe ... 247
PFAS ... 67, 637, 729, 735, 853
PFAS-Monozelle ... 743
PFASolve ... 587
Phosphor ... 719
Phosphorrecycling ... 865
Phosphorrückgewinnung ... 859
Photovoltaik ... 495, 503
Pilotmaßstab ... 483
Plastic recycling ... 553
Plastic sorting ... 553
Plastics ... 187
Platform-based business model innovation ... 869
Platinum recovery ... 393
Polyester/cotton blends ... 201
Polyethylen ... 337
Polyethylenterephthalat ... 207
Polymerdegradation ... 375
Polyolefine ... 343, 349
Polypropylen ... 359, 371
Polystyrol ... 355
Porous transport layer ... 393
Post-consumer Abfall ... 343
Post-Consumer-Rezyklate ... 375
PPWR ... 141
Praktische Anwendungen von Gasprognosen ... 647
Preprocessing ... 547
Probenahme ... 359
Process performance ... 547
Produkte ... 229
Produktverantwortung ... 103
Produzentenbeiträge ... 141
Prozessgestaltung und -optimierung ... 355

Prozessoptimierung 439
Prüfung 833
Pulvermetallurgie 465
PV-Unterkonstruktion 511
P-XTRACT 865
Pyrolyse 173, 839

Q

Qualität 843
Quality Control 307

R

Raman spectroscopy 815
RDF 455
Realistischer und empirisch bestimmter Deponiegaserfassungsgrad 647
Real-time contamination monitoring 313
RecoDust 491
Recycled polypropylene 561
Recycling 161, 195, 213, 267, 289, 349, 355, 399, 417, 465, 483, 517, 531, 667, 775, 781, 875
Recyclingbaustoff 135
Recyclingeffizienz 435, 451
Recyclinggips 793
Recyclingpotenziale 255
Reduzierter Kohlenstoff- & Energiebedarf 489
Refurbishing 399
Regulatorische Benachteiligung 155
Reinheitsgrad 671
Remanufacturing 399
Remediation 629
Repair 399
Resilienz 277
Ressourceneffizienz 255, 531
Ressourcenschonung 809
Ressourcenschutz 623
Restmüllverbrennungsasche 543
Reststoffbasierte Aktivatoren 703
Reuse und Recycling 495
Re-Use 135, 283, 399, 781
Reverse-Logistik 103
Rezyklate 195
Rezykliertes Polypropylen (rPP) 375
Roadmap 675
Rohstoffrückgewinnung 277
Röntgenabsorptionsspektroskopie 461
Röntgenfluoreszenzanalyse 577
Röntgentransmission (XRT) 423
Rostasche 263
Rostaschenaufbereitung 679
Rote Liste 117
Rückbau 787
Rückgewinnungsrate 451

S

Safe and Sustainable by Design ... 155
SAM ... 301
Sammlung ... 213, 843
Sanierung ... 629, 787
Sanierungsmaßnahme ... 767
SARA4UNFC ... 859
Schadstofferkundung ... 735
Schaumfraktionierung ... 587, 749
Scherensand ... 471
Schlacke ... 461, 675, 709
Schleifkörner ... 667
Schulcatering ... 825
Schwellenwerte ... 129
Schwermetall ... 713
Schwertrübescheidung ... 667
Scrap Metal ... 295
Segmentation ... 301
Sekundäre Rohstoffe ... 267, 483, 697, 859, 879
Seltene Erden ... 277, 465
Senke ... 67
Sensor-Based Sorting ... 571
Sensorbasierte Sortierung ... 411, 423
Sensorgestützte Sortierung ... 477
Sensorik ... 583
Separation ... 173
Separatorfolie ... 439
Sequential Extraction ... 637
Sewage sludge ... 455
Shannon-Entropie ... 411
Shrink-Sleeves ... 661
Sichten ... 439
Sickerwasserbelastung ... 641
Sieben ... 439
Siebüberläufe ... 839
Simultane thermische Analyse (STA) ... 697
Single-cell protein ... 181
Single-Use-Plastics-Richtlinie (SUP-RL) ... 167
SLCA ... 237
Smartphone-Based image aquisition ... 313
Smartphones ... 273
Soil Washing ... 637
Sortieranalyse ... 167, 255, 333
Sortierbarkeit ... 141
Sortierung ... 213, 371, 417, 537
Sorting plant ... 547
Spachtelmasse ... 795
Spannungsfeld Schadstoff-Kreislaufwirtschaft ... 81
Spectral preprocessing ... 553
Stahl ... 709
Stakeholder-Mapping ... 237
Statistical Process Control ... 307
Statistische Versuchsplanung ... 411
Steel mill dust ... 491

Steel scrap 289, 301
Steinwolle 685
Stofflicher Ansatz 155
Stoffströme 233
Stoffstrommanagement 195
Stoffstromuntersuchung 775
Störstoffe 843
Surface Contamination 523
Synthese 703
Synthesis gas 181
Systemgrenzen 435

T

Tanklager 725
Textilabfall 247
Textile Kreislaufwirtschaft 219
Textile recycling 201
Textilien 195, 213, 225, 417
Textil-zu-Textil Recycling 219
Thermochemisch 713
Thermomechanisches Recycling 207
Thermo-optische Analyse 697
Thermo-physikalische Stoffeigenschaften 697
Toxins 571
Tragbare Röntgenfluoreszenzgeräte (pXRF) 273
Treibhausgasemissionen 243
Trennverfahren 667
TRL 237

U

Umkehrosmose 599
Umwelt 583
Umweltanalytik 605
Umweltschutz 117
Umwelttechnologie 875
Umweltverträglichkeitsprüfung 129
UNFC 859
Ungesättigte Bodenzone 757
UVP-Verfahren 129

V

Vanadium 709
Variantenstudie 767
Vaste to value 839
VEBSV 2.0 327
Verbrennungsrückstände 611
Vererdung 849
Verhüttung 489
Verpackungen 89
Verpackungsgesetz 103
Versorgungssicherheit 671
Verwertungsbestätigung 123
Vorsorgeprinzip 853

W

Wasserglas 703
Waste incineration 455
Waste Shipments Transportdatenmanagement 323
WEEE 365, 879
Wiederverwendung 787
Windkraftanlagen 781
Windradflügel 387

X

XRF 577

Z

Zement 675, 709
Zentraldeponie Datteln 617
Zentrifugalkraft 517
Zerlegung 283
Zinn/Bleilegierung 489
Zirkularität 809
Zukunftstechnologien 381
Zusammensetzung 343
Zyklische Mehrfachverarbeitung 375



Bereits zum achtzehnten Mal trifft sich im November 2026 die abfallwirtschaftliche Community in Leoben. Die Recy & DepoTech ist einer der Fixpunkte im Reigen der wissenschaftlichen Konferenzen zu den Themen der Kreislauf- und Abfallwirtschaft.

Charakteristisch für die Recy & DepoTech ist die Verknüpfung von Theorie und Praxis. Sowohl wissenschaftliche Erkenntnisse, als auch Fallbeispiele und Berichte aus der Praxis werden von Expert:innen präsentiert und diskutiert.

Natürlich versuchen wir fachliche Schwerpunkte zu setzen.

Sensor-based Sorting & Control, neue Sortierverfahren und Nutzung von KI, innovative Recyclingtechnologien und neue technische Ansätze für spezielle Stoffströme sind besondere Schwerpunkte. Aber auch traditionelle Fachbereiche wie die Altlastensanierung und Deponietechnik haben weiterhin ihren Platz. Innovative Businessmodelle und Kreislaufwirtschaft runden das Programm ab.

Das Programm der Recy & DepoTech 2026 umfasst 168 Vorträge und 59 Poster. In diesem Konferenzband sind die qualitativ hochwertigen, redigierten, wissenschaftlichen Fachbeiträge der **VORTRÄGE** inklusive englischem Abstract zusammengefasst.

ISBN: 978-3-9506289-0-6