Recy & DepoTech 2026

POSTER-Konferenzband

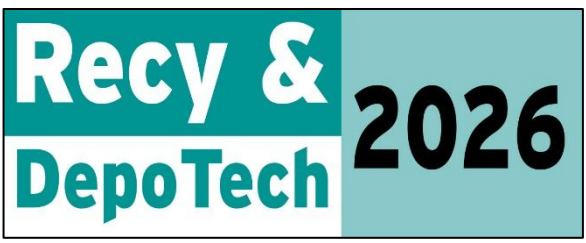
zur 18. Recy & DepoTech-Konferenz

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

POSTER-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: 978-3-9506289-1-3

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 Poster 27
Index English abstracts of posters 33

Poster 39
English abstracts 271

Autorenverzeichnis 319

Sachregister 324



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.

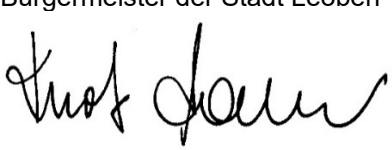
Es freut mich besonders, dass diese renommierte Fachveranstaltung in unserer Stadt Leoben stattfindet und durch die Stadtgemeinde unterstützt wird. Leoben steht seit jeher für Innovation, Forschung und eine enge Verbindung zwischen Universität und industrieller Praxis. Die Montanuniversität Leoben und 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!



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.

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)

Ingenieurdienstleistungen für Umweltschutz mit Mehrwert

www.umweltkonsulenten.at



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

Inhaltsverzeichnis Poster

„Shiften“ - Herstellerübergreifende Reparaturoptionen bei modularisierten Smartphones
Ralf Brüning, Florian Witt & Thomas Krause *41*

Social Urban Mining bei der Generalsanierung der Otto-Möbes-Akademie Graz - vom Planen und Umsetzen
Markus Meissner, Thomas Romm, Sonja Zumpfe & Jasmin Bermadinger *45*

Rohstoffpotenzial industrieller Abwässer in Deutschland bezüglich kritischer Metalle
Lisa-Marie Hess, Daniel Vollprecht, Frank Haubrich, Jana Pinka, Janina Leiblein & Thomas Heß *51*

Resilienz der Wasserversorgung und -speicherung im ländlichen Raum – Verbundprojekt SpeicherLand
Philipp Dost, Falk Händel, Timm Wunderlich, Maike Rath, Tanja Morgenstern, Anna-Maria Hasterok, Clara Brandes, Sascha Rudolph, Felix Bilek, Andreas Hänel, Martin Pumpa, Elisabeth Grube, Thomas Grab, Bernd Bräutigam, Maria-Barbara Schaller, Georg Kramer, Martin Binder, Fritz Kalwa & Traugott Scheytt *57*

Preventing Resource Loss Through Digital Innovations
Susanne Roßkogler *61*

Die neue Mehrweg-Weinflasche in Österreich
Christian Pladerer & Philipp Haderer *65*

Towards spectroscopic monitoring of antioxidant concentration in polypropylene granulates for circular plastic processing
Peter Bardenheuer, Alena Maria Spies & Kathrin Greiff *71*

Chemische Eigenschaften von industriell hergestellten Gesteins-körnungen aus Bett- und Rostaschen der Müllverbrennung – Eine Datenauswertung von Versuchen im Industriemaßstab
Simon Mika, Julia Mühl & Jakob Lederer *77*

Änderungen für IPPC-Anlagen durch die Novelle der Industrieemissionsrichtlinie – Ausgangszustandsbericht und Monitoring
Roman Hummel, Katrin Amort, Evgenij Gerstner & Arne M. Ragoßnig *81*

Einstufung der Erzeugnisse des chemischen Kunststoffrecyclings – Erfahrungsbericht & Herausforderungen aus österreichischer Perspektive
Arne M. Ragossnig, Markus Dielacher & Werner Kruschitz *87*

Carbonation from by-products from the metal industry
Ann-Kathrin Hans, Andreas Neumann & Ralf Wehrspohn *93*

Verbesserung der SO_2-Abscheidung in bestehenden AGR-Anlagen durch hygroskopische Additive und Puzzolane aus Reststoffen
Joel da Silva Félix, Daniel Wohter & Peter Quicker *97*

Das Kreislaufzentrum der Zukunft
Verena Schmid, Josef Adam, Roland Pomberger, Roland Wernik, Thomas Maierhofer & Stefan Schnöll *103*

Der Begriff „Repurpose“ in einer textilen Kreislaufwirtschaft
Verena Schmid, Silvia Jölli & Alexia Tischberger-Aldrian *109*

Automatisierte Demontageanleitungen für EOL-Elektrofahrzeuge: Ein hybrides CV- und VLM-Konzept
Nils Baumann & Sabine Flamme *115*

Pilot-Pyrolyse als methodisches Instrument zur Prozessbewertung heterogener Post-Consumer-Kunststoffabfallströme
Angelika Luckeneder & Daniela Meitner *119*

Quantifizierung und Charakterisierung von Verunreinigungen landwirtschaftlich genutzter Böden durch Mikrokunststoffe
Clemens Lang *123*

GreenHost – Nachhaltige Beherbergungsbetriebe durch Gamification
Hannah Hofbauer & Maximilian Wagner *127*

Clean Dregs – Strategien zur Reduktion, Aufbereitung und Nutzung von Grünlaugenschlamm
Andreas Klöckl, Markus Ellersdorfer, Johannes Leitner, Klaus Eibinger, Michael Strach & Alexia Tischberger-Aldrian *131*

Vom Recyclingmaterial zum Infrastrukturbeton: CO_2-reduzierter Recyclingbeton für zwangsbeanspruchte Tunnelbauteile
Joachim Juhart, Amr HM Hassan, Michael Autischer & Dirk Schlicke *135*

Entwicklung der ersten Recyclingstufe für PV-Module und Variantenstudie zur weiteren Verarbeitung der anfallenden Rohstoffe
Felix Kiem, Matthias Zitterbart, Thomas Senfter & Martin Pillei *143*

Robuste KI-Echtzeitsortierung von Schredderschrott zur Reduktion des intrinsischen Kupfergehalts
Gerald Koinig, Walter Martinelli, Yves Radmann & Alexia Tischberger-Aldrian *147*

greenPLAST-food - Grüne Kunststoffrecyclingfabrik für Lebensmittelkontaktmaterialien
Gerald Koinig & Alexia Tischberger-Aldrian *153*

Untersuchung von mechanischem Recycling als EoL-Strategie für duromerbasierte Faserverbundwerkstoffe
Romy Schwarz & Jörg Fischer *159*

Evaluierung der Getrenntsammlung auf Friedhöfen und Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen
Sarah Maier & Alexia Tischberger-Aldrian *163*

Performance Optimierung von PP Rezyklaten durch abgestimmte Sortiertiefe und Modifikation
Martin Berschl, Moritz Mager & Jörg Fischer *167*

These Boots Are Made for Sorting: Towards Automated Sorting for Reuse for Post-Consumer Shoes
Shirin Askari, Kseniia Grai & Alexia Tischberger-Aldrian *173*

Sole Searching - Material-Driven Sorting for Footwear Circularity
Kseniia Grai, Shirin Askari & Alexia Tischberger-Aldrian *179*

Das Verhalten von Paper Composites unter Druckbelastung und deren Versagensarten
Sandra Schmidt & Andreas Büter *183*

Stand der Technik mobiler Aufbereitungsanlagen für Bau- und Abbruchabfälle in Österreich: Datenauswertung des EDM mit KI-basierten Methoden
Dominik Blasenbauer, Mariella Laure, Michael Scsepka & Tobias Walk *189*

AVAW_CV-Waste: Annotationstool für Computer Vision in der Abfallwirtschaftsforschung
Bojan Lorber, Gerald Koinig & Alexia Tischberger-Aldrian *193*

To store, or not to store? A qualitative recyclability assessment
Romana Kopecká, Marlies Hrad & Marion Huber-Humer *199*

Lithiumgewinnung aus hochmineralisierten Solen der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja als alternative Quelle kritischer Rohstoffe
Olga Ulanova *203*

Is it worth closing the plastic loop in WEEE? Environmental and economic assessment of plastic separation and recycling versus incineration
Eduard Wagner, Theresa Aigner, Frederieke Aschenbrenner, Christian Aschenbrenner & Ralf Ehrlich *209*

Recyclingfähigkeit von Matratzenüberzügen: Eine Markt- und Materialanalyse
Natalie Marzinek, Hannah Weber, Gerald Koinig & Alexia Tischberger-Aldrian *215*

Zu viel des Guten? - Eine quantitative Analyse der dekorierten Kunststoffverpackungen im österreichischen Leichtverpackungsstrom
Alexia Tischberger-Aldrian, Nikolai Kuhn, Andreas Klöckl, Namrata Mhaddolkar, Dieter Schuch, Jörg Fischer, Viktoria Helene Gabriel, Vasiliki-Maria Archodoulaki & Gerald Koinig *219*

CirMat – Kreislauffähige Matratze und Abfallsammelsystem
Thomas Senfter, Birgit Christandl, Manuel Berger, David Hackl, Maximilian Larch, Jakob Germann, Roman Eberharter, Matthias Zitterbart & Martin Pillei *225*

Kooperatives Zusammenwirken von Vorhabenträger und Behörde – ein Beitrag zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren
Ulrich Stock *229*

Konfliktbewältigung im Genehmigungsverfahren – kann das gelingen?
Ulrich Stock *235*

Focus on Finishing: Detection of Textile Finishes Using Near-Infrared Spectroscopy
Felix Scheidl, Gerald Koinig & Alexia Tischberger-Aldrian *241*

Kompost absieben – Feinkorn absaugen
Hanns-Thomas Teubel *245*

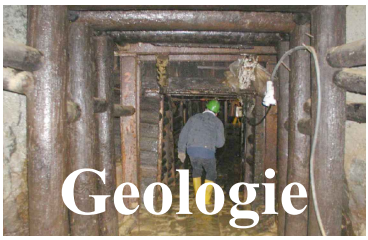
Centrifugal Melt Separation of Co-Extruded Multi-Material Polymer Products for Recycling Applications
Katarina Marković, Jutta Geier, Weiyu Zhao, Michael Feuchter, Márton Bredács & Gernot Oreski *249*

Was wir nicht wegwerfen, zählt: Ökobilanzen zur Quantifizierung von Abfallvermeidung und Wiederverwendung
Silvia Schütz & Gudrun Obersteiner *253*

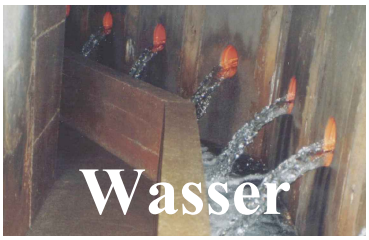
Bewusstseinsbildung in der Schule: Effekte der Wanderausstellung „GewissensBISS“
Gudrun Obersteiner & Sandra Luck..... *259*

Batterien im Abfall: Immer noch ein unterschätztes Risiko
Nina Nowak, Elena Dvorak, Roland Pomberger & Thomas Nigl..... *263*

Kompetenz in ...



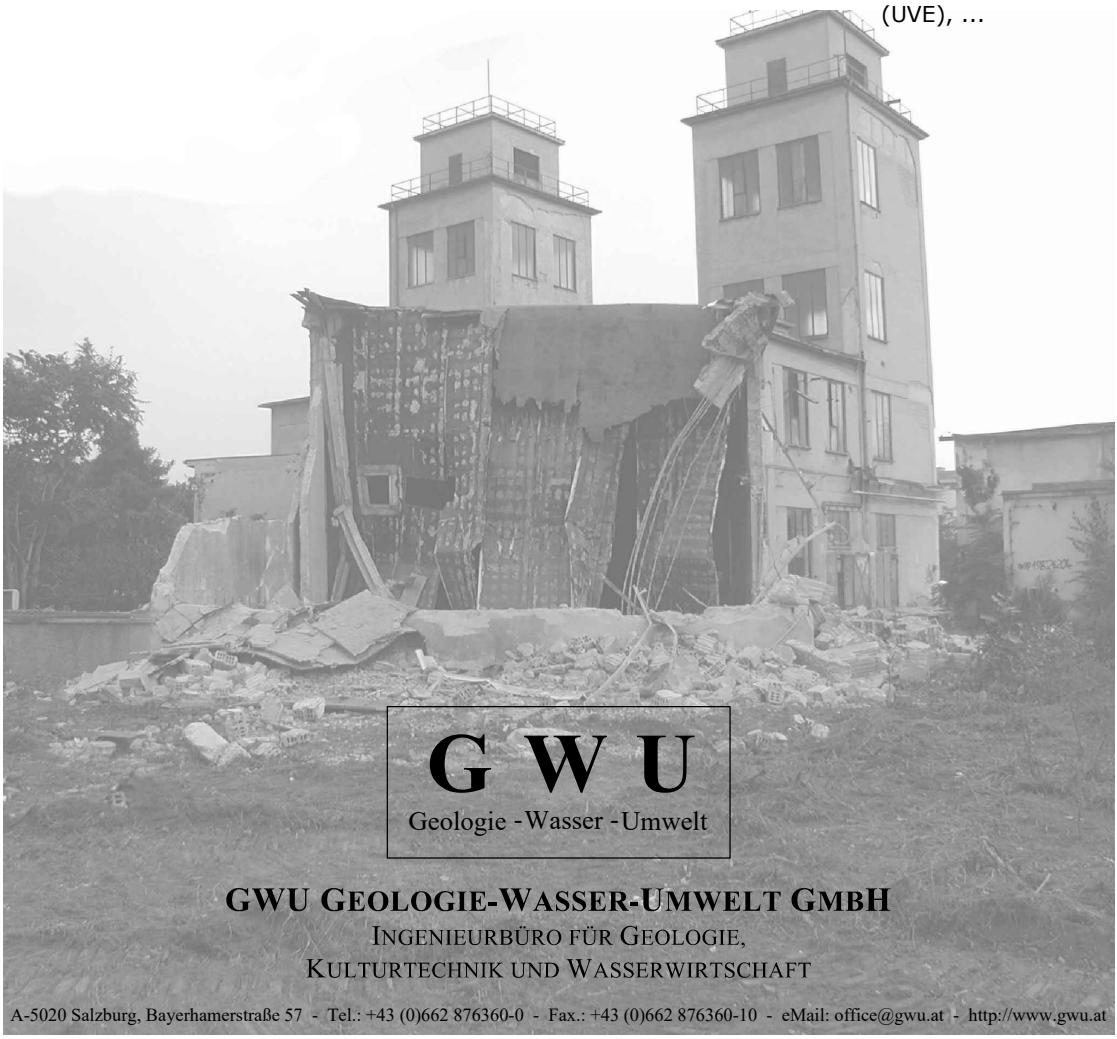
Geologische Dokumentation
und Beratung,
Kartierung,
Baugrunderkundung,
Bohrbetreuung,
Geologische Gutachten für
alle Planungsphasen,
Steinschlagsimulation (2D+3D),
Naturgefahrenbewertung, ...



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



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

Index English abstracts of posters

Manufacturer Independent Repair Options for Modular Smartphones
Ralf Brüning, Florian Witt & Thomas Krause *273*

Social Urban Mining in the Refurbishment of the Otto-Möbes-Academy Graz – From Planning to Implementation
Markus Meissner, Thomas Romm, Sonja Zumpfe & Jasmin Bermadinger *274*

Industrial Wastewater in Germany as a Source of Critical Metals
Lisa-Marie Hess, Daniel Vollprecht, Frank Haubrich, Jana Pinka, Janina Leiblein & Thomas Heß *275*

Resilience of Water Service and Reservoirs in Rural Areas – Collaborative Project SpeicherLand
Philipp Dost, Falk Händel, Timm Wunderlich, Maike Rath, Tanja Morgenstern, Anna-Maria Hasterok, Clara Brandes, Sascha Rudolph, Felix Bilek, Andreas Hänel, Martin Pumpa, Elisabeth Grube, Thomas Grab, Bernd Bräutigam, Maria-Barbara Schaller, Georg Kramer, Martin Binder, Fritz Kalwa & Traugott Scheytt *276*

Preventing Resource Loss Through Digital Innovations
Susanne Roßkogler *277*

The new reusable wine bottle in Austria
Christian Pladerer & Philipp Haderer *278*

Towards spectroscopic monitoring of antioxidant concentration in polypropylene granulates for circular plastic processing
Peter Bardenheuer, Alena Maria Spies & Kathrin Greiff *279*

Chemical Characterization of Mineral Aggregates Derived from Fluidized-Bed and Grate Incineration Bottom Ashes: A Statistical Evaluation of Industrial-Scale Production Trials
Simon Mika, Julia Mühl & Jakob Lederer *280*

Changes for IPPC Installations under the Revised Industrial Emissions Directive – Baseline Report and Monitoring
Roman Hummel, Katrin Amort, Evgenij Gerstner & Arne M. Ragoßnig *281*

Classification of Products from Chemical Recycling of Plastics – Experience Report & Challenges from an Austrian Perspective
Arne M. Ragossnig, Markus Dielacher & Werner Kruschitz *282*

Carbonation from by-products from the metal industry
Ann-Kathrin Hans, Andreas Neumann & Ralf Wehrspohn *283*

Improving SO_2 Removal in Existing Flue Gas Cleaning Systems Using Hygroscopic Additives and Pozzolans from Residual Materials
Joel da Silva Félix, Daniel Wohter & Peter Quicker *284*

The circularity center of the future
Verena Schmid, Josef Adam, Roland Pomberger, Roland Wernik, Thomas Maierhofer & Stefan Schnöll 285

The term “Repurpose” in a textile circular economy
Verena Schmid, Silvia Jölli & Alexia Tischberger-Aldrian 286

Automated Disassembly Instructions for EOL Electric Vehicles: A Hybrid CV and VLM Concept
Nils Baumann & Sabine Flamme 287

Pilot-Scale Pyrolysis as a Methodological Tool for Evaluating Heterogeneous Post-Consumer Waste Streams
Angelika Luckeneder & Daniela Meitner 288

Quantification and characterization of microplastic pollution in agricultural soils
Clemens Lang 289

GreenHost – Sustainable accommodation through gamification
Hannah Hofbauer & Maximilian Wagner 290

Clean Dregs – Strategies for Reduction, Treatment and Utilization of Green Liquor Dregs
Andreas Klöckl, Markus Ellersdorfer, Johannes Leitner, Klaus Eibinger, Michael Strach & Alexia Tischberger-Aldrian 291

From Recycled Material to Infrastructure Concrete: Low-Carbon Recycled Concrete for Restrained Tunnel Linings
Joachim Juhart, Amr HM Hassan, Michael Autischer & Dirk Schlicke 292

Development of the first stage of recycling for PV modules and a study of options for the further processing of the resulting raw materials
Felix Kiem, Matthias Zitterbart, Thomas Senfter & Martin Pillei 293

Robust AI-Based Real-Time Sorting of Shredder Scrap to Reduce the Intrinsic Copper Content
Gerald Koinig, Walter Martinelli, Yves Radmann & Alexia Tischberger-Aldrian 294

greenPLAST-food Green Plastic Recycling Factory for Food Contact Materials
Gerald Koinig & Alexia Tischberger-Aldrian 295

Investigation of Mechanical Recycling as an EoL-Strategy for Thermoset Composite Materials
Romy Schwarz & Jörg Fischer 296

Evaluation of Waste Separation on Cemeteries and Derivation of Improvement Measures
Sarah Maier & Alexia Tischberger-Aldrian 297

Performance Optimization of PP Recyclates through Coordinated Sorting Depth and Modification
Martin Berschl, Moritz Mager & Jörg Fischer 298

These Boots Are Made for Sorting: Towards Automated Sorting for Reuse for Post-Consumer Shoes
Shirin Askari, Kseniia Grai & Alexia Tischberger-Aldrian *299*

Sole Searching - Material-Driven Sorting for Footwear Circularity
Kseniia Grai, Shirin Askari & Alexia Tischberger-Aldrian *300*

The Behavior of Paper Composites under Pressure Loads and their Failure Modes
Sandra Schmidt & Andreas Büter *301*

State-of-the-Art Assessment of Mobile Processing Machines for Construction and Demolition Waste in Austria: AI-Based Analysis of EDM Data
Dominik Blasenbauer, Mariella Laure, Michael Scsepka & Tobias Walk *302*

AVAW_CV-Waste: An Offline Computer Vision Annotation Tool for Waste Management Research
Bojan Lorber, Gerald Koinig & Alexia Tischberger-Aldrian *303*

To store, or not to store? A qualitative recyclability assessment
Romana Kopecká, Marlies Hrad & Marion Huber-Humer *304*

Lithium Recovery from Highly Mineralized Calcium Chloride Brines of the Udachnaya Kimberlite Deposit as an Alternative Source of Critical Raw Materials
Olga Ulanova *305*

Is it worth closing the plastic loop in WEEE? Environmental and economic assessment of plastic separation and recycling versus incineration
Eduard Wagner, Theresa Aigner, Frederieke Aschenbrenner, Christian Aschenbrenner & Ralf Ehrlich *306*

Recyclability of Mattress Covers: A Market and Material Analysis
Natalie Marzinek, Hannah Weber, Gerald Koinig & Alexia Tischberger-Aldrian *307*

Too much of a good thing? - A quantitative analysis of decorated plastic packaging in the Austrian light packaging stream
Alexia Tischberger-Aldrian, Nikolai Kuhn, Andreas Klöckl, Namrata Mhaddolkar, Dieter Schuch, Jörg Fischer, Viktoria Helene Gabriel, Vasiliki-Maria Archodoulaki & Gerald Koinig *308*

CirMat – A Recyclable Mattress and Waste Collection System
Thomas Senfter, Birgit Christandl, Manuel Berger, David Hackl, Maximilian Larch, Jakob Germann, Roman Eberharter, Matthias Zitterbart & Martin Pillei *309*

Cooperative collaboration between project proponent and authority – a contribution to accelerating permitting procedures
Ulrich Stock *310*

Conflict resolution in the permitting process – can it succeed?
Ulrich Stock *311*

Detection of textile finishing using NIR spectroscopy
Felix Scheidl *312*

Screening Compost – Clean Up Fines
Hanns-Thomas Teubel *313*

Centrifugal Melt Separation of Co-Extruded Multi-Material Polymer Products for Recycling Applications
Katarina Marković, Jutta Geier, Weiyu Zhao, Michael Feuchter, Márton Bredács & Gernot Oreski *314*

Quantifying What We Avoid: LCA for Evaluating Waste Prevention and Reuse
Silvia Schütz & Gudrun Obersteiner *315*

Raising Awareness in Schools: The Impact of the “GewissensBISS” Traveling Exhibition
Gudrun Obersteiner & Sandra Luck *316*

Batteries in waste streams: Still an underestimated risk
Nina Nowak, Elena Dvorak, Roland Pomberger & Thomas Nigl *317*

FISCHER

Ratzfatz



Poster

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

„Shiften“ - Herstellerübergreifende Reparaturoptionen bei modularisierten Smartphones

Ralf Brüning[1], Florian Witt[1] & Thomas Krause[2]
[1)] Dr. Brüning Engineering UG, Brake, Deutschland
[2)] SHIFT GmbH, Wabern-Falkenberg, Deutschland

KURZFASSUNG: Im Forschungsvorhaben „loopSHIFTED – Beitrag von modularisierten Smartphone- und Tablet-Gebrauchtgeräten mit herstellerübergreifenden Reparaturoptionen zu Kreislaufwirtschaft und Reduzierung von Umweltwirkungen“ wird die technische Machbarkeit der modularisierten Bauweise von Smartphones untersucht, um die Reparaturbedingungen zu fördern und das Refurbishment bzw. Remanufacturing solcher Geräte effizienter zu gestalten. In ersten praktischen Testläufen konnten durch die Entwicklung einer modularisierten Bauweise an Smartphone-Bauteilen die Reparaturzeiten um bis zu 70 % verringert werden. In ersten Berechnungsdurchläufen konnte das Ergebnis der ermittelte Repair-Score-Classifizierung von C auf B angehoben werden. Die entwickelte modularisierte Bauweise ist auf andere Smartphone-Modelle übertragbar.

1 SMARTPHONES - KURZE LEBENS- UND NUTZUNGSDAUER – HOHE UMWELTWIRKUNG

Es ist kein Geheimnis, dass Smartphones den ersten Platz der am verbreitetsten und meistgenutzten Elektrogeräte pro Person in der Gesellschaft einnehmen. Circa 7,6 Milliarden Smartphones werden 2026 weltweit „genutzt“ (Statista, 2025a). Bei einer ungefähren Weltbevölkerung von circa 8,3 Milliarden Menschen im selben Jahr, besitzt theoretisch fast jeder Mensch ein Smartphone. Die reale Verteilung ist jedoch abweichend, da manche Menschen kein Gerät aber andere mehrere Geräte besitzen (Howarth, 2026). 2024 nutzten in Deutschland circa 71 Millionen Menschen ein Smartphone (Statista, 2025b). Bezogen auf Deutschlands Einwohnerzahl von circa 83 Millionen Menschen entspricht das über 85 % der Landesbevölkerung. In einigen Nachbarländern fällt der Anteil vergleichbar hoch aus. So besaßen im Jahr 2023 circa 89 % der ab 15-jährigen Österreicher und Österreicherinnen ein Smartphone (Statista, 2025c). Der Bevölkerungsanteil an Schweizerinnen und Schweizern, die ein Smartphone besitzen lag 2023 sogar bei circa 97 % (Statista, 2025d). Im selben Jahr nutzten in den Niederlanden 98 % ein Smartphone (Statista, 2024). In diesem Zusammenhangkönnten noch weitere Länder mit einem vergleichbar hohen Nutzungsaufkommen aufgeführt werden. Smartphones sind also ubiquitär verbreitet und übernehmen immer mehr Funktionen anderer Elektrogeräte wie bspw. Mp3-Player, Digitalkamera, Navigationsgerät, Wecker, Radio, Fernbedienung und lösen diese ab (Lange, 2023).

Der schnell voranschreitende technologische Wandel führt unter anderem dazu, dass Smartphones im Durchschnitt alle 2 bis 3,5 Jahre von ihren Nutzer*innen ersetzt werden. Während Nutzer*innen in Deutschland ihre Smartphones im Schnitt alle 24 Monate austauschen, liegt der europäische Durchschnitt bei circa 40 Monaten (Deutschlandfunk Nova, 2022) Wobei sich in den letzten Jahren aufgrund der höheren Anschaffungskosten eines Neugerätes auch das Konsumverhalten deutscher Verbraucher*innen zu einer längeren Nutzungsdauer ihres Smartphones entwickelt hat. 45 % der deutschen Smartphone-Besitzer*innen nutzen ihr Gerät mittlerweile länger als zwei Jahre. In den letzten Jahren wurden in Deutschland circa 20 Millionen neue Smartphones verkauft. Für 2026 ist der Verkauf von circa 19 Millionen Neugeräten prognostiziert (de Groot, 2026).

Hinzu kommt, dass ungenutzte Geräte von den Nutzer*innen nicht unmittelbar als Second-Life-Gerät z.B. im Zuge eines Weiterverkaufs bzw. einer Spende zur Weiternutzung verfügbar

gemacht oder als Altgerät entsorgt werden. Die ersetzten und ungenutzten Geräte befinden sich weiterhin in den Haushalten der Nutzerinnen und Nutzer. Laut einer repräsentativen Umfrage vom Digitalverband Bitkom aus dem Jahr 2025 liegen somit circa 200 Millionen ungenutzte Geräte in den Haushalten (Bitkom, 2025).

Der Verbrauch von Ressourcen ist dabei enorm, denn in jedem Gerät sind eine Vielzahl wertvoller Metalle, seltener Erden und sogenannter Konfliktrohstoffe verbaut. Mit Konfliktrohstoffen sind in der Regel verschiedene Menschenrechts- und Völkerrechtsverletzungen, zum Beispiel Kinderarbeit und Menschenhandel, sowie schwere Umweltschäden verbunden. Dabei sind ein großer Teil der gesamten Umweltwirkung der Geräte mit der Extraktion und Aufbereitung eben dieser Rohstoffe verbunden (Schomberg et al. 2023). Die Umweltwirkung gewinnt an noch mehr Bedeutung, wenn Geräte nur einen kurzen Lebenszyklus bzw. eine kurze Nutzdauer haben, so wie es bei Smartphones oftmals der Fall ist.

Mit einer Verlängerung der Nutzungsdauer von Elektro(nik)geräten kann also zu einer Verringerung des Ressourceneinsatz für die Neuproduktion und damit verbundene Umweltbelastungen beigetragen werden. Erreicht werden kann das vor allem durch die Steigerung der Reparierbarkeit wie bspw. durch die Erfüllung hoher Ökodesigneigenschaften des Gerätes. Außerdem ist die Aufwärtskompatibilität wichtig, also die Fähigkeit eines älteren (Software-) Systems, auch neuere Versionen oder Datenstandards zu unterstützen und zu nutzen. Der modulare Aufbau von Elektro(nik)geräten wie Smartphones kann in diesem Zusammenhang die notwendige Basis sein, um das Potenzial für Reparierbarkeit und die Aufwärtskompatibilität zu steigern.

Vor diesem Hintergrund führt die SHIFT GmbH das Forschungsvorhaben „loopSHIFTED – Beitrag von modularisierten Smartphone- und Tablet-Gebrauchtgeräten mit herstellerübergreifenden Reparaturoptionen zu Kreislaufwirtschaft und Reduzierung von Umweltwirkungen“ in Kooperation mit der Universität Kassel, Kassel - Institute for Sustainability, Center for Environmental Systems Research durch.

Das Unternehmen Dr. Brüning Engineering UG steht dabei als wissenschaftlicher Partner für die Datenerhebung und den fachlichen Austausch zur Seite.

2 ERPROBEN DER MODULARISERTEN BAUWEISE

Ziel des Projekts ist die Entwicklung und Erprobung des sogenannten „Shiftens“ – der Überführung von Smartphone-Geräten in ein modulares Design, um potenziell zukünftige Reparaturen beziehungsweise den Austausch von Verschleißteilen, insbesondere des Akkus, wirtschaftlich attraktiv zu gestalten. Dabei wird das Shiften an gebrauchten Smartphones umgesetzt. Erprobt und untersucht werden die Arbeiten sowohl an noch nutzbaren als auch bereits schadhaften Geräten. Die Geräte können somit entweder noch bzw. wieder in Benutzung gebracht und gleichzeitig auch für den Wiederverkauf aufgearbeitet werden. Das Shiften wird dabei als Reparatur- und Remanufacturing-Verfahren definiert, das sich am modularen Design der SHIFTPHONES orientiert. Hierzu ist unter verschiedenen Smartphone- Modellen ein Demonstrator-Modell ausgewählt worden, an denen die simulierten Reparaturarbeiten beispielhaft erprobt wurden. Der Fokus lag dabei auf Bauteilen wie Gehäuse, Display und Akku.

Vollmodulare Endgeräte erfordern eine völlig andere Grundarchitektur im Bereich der mechanischen Konstruktion und des sog. Stackings, also der besonderen Art und Weise, nach der die verschiedenen Komponenten miteinander verbunden, gesteckt und nicht verklebt werden. Für die Modularisierung eines vormals nicht modularen Endgerätes ist die technisch anspruchsvolle Integration neuer Module, modifizierter Bestandsbauteile sowie angepasster Soft- und Firmware in eine bestehende Architektur erforderlich, sodass ein bootbares, funktionsfähiges und entsprechend der intendierten Funktionen nutzbares Ganzes entsteht.

Im technischen Teil des Shiftens wird erstmalig ein vormals nicht modulares Endgerät modularisiert und technisch weiterentwickelt zu einem SHIFTed Endgerät. Der Fokus liegt dabei auf Gebrauchtgeräten mit technischen Spezifikationen, für die bisher noch keine modularen Alternativen angeboten werden. Ziel ist die Verbesserung der Reparierbarkeit und Erhöhung der Aufwärtskompatibilität zur Nutzbarmachung von Upgrades, um das Gebrauchtgerät über einen Zeitraum von mehreren Jahren nutzbar zu machen. Ein Beispiel für eine erforderliche Modifikation an einem Bestandsbauteil ist der Ersatz von spezifischen Anschlüssen zum Aufladen des Akkus und zur Datenübertragung durch den insgesamt kompatibleren und schnelleren USB-C-Anschluss, was sensible Eingriffe auf Ebene der Platine erforderlich macht. Der Umfang an notwendigen architektonischen Anpassungen. Hierbei muss sowohl die Herausforderung der Umsetzung eines funktionierenden Endgerätes erfüllt als auch der Aufwand für Test- und Prüfroutinen geleistet werden. Ziel ist dabei, die erforderlichen Modifikationen so sorgsam zu gestalten und durchzuführen, so dass weder eine Neuentwicklung von spezifisch Anschlüssen oder Antennen noch aufwendige Testungen (SAR, Reach, CE) erforderlich sind.

Im Rahmen der durchgeführten praktischen Arbeiten wurde das Augenmerk auf konzeptionelle Schlüsselbauteile gelegt, bei deren modularer Konzeption sowie Anpassung der verwendeten Verbindungselemente messbare Effizienzsteigerungen in der Demontage bzw. Montage erlangt werden konnten. Konkret handelt es sich dabei um die Bauteile Gehäuse (Backcover), Display und Akkumulator sowie die dabei verwendeten Verbindungselemente. Denn über das Separieren des Displays bzw. des Gehäuses (Backcover) vom restlichen Gerät sind erst die anderen Bauteile erreichbar, welche sich im Innern des Gerätes befinden.

So hat sich in den praktischen Testdurchläufen mit den auf die Reparatur konzipierten Designanpassungen im Gehäuse (Backcover) mit gleichbleibenden Geräteeigenschaften (Wasser- und Staubschutz) die simulierte Reparaturzeit um circa 70 % reduzieren lassen. Hierbei sind Synergieeffekte auf andere Gerätebauteile, welche im Rahmen einer Reparatur durch ein einfacher zu lösendes Backcover ebenfalls einfacher und schneller erreicht werden können, noch nicht inkludiert.
Mit einbezogenen Synergieeffekten konnte in ersten Berechnungsdurchläufen das Ergebnis der ermittelte Repair-Score-Classifizierung (Reparability Index Calculator for Smartphones and Slate Tablets in support of the Comission Delegated Regulation (EU) des Demonstratormodells von C auf B angehoben werden.

3 FAZIT DER TESTPHASE UND AUSBLICK

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten fokussieren sich auf ein spezifisches Gerätemodell. Jedoch ist das Shiften von diesem Referenzmodell auf andere Modelle übertragbar. Auf der technischen Seite werden grundlegende Anpassungen von generischen technischen Spezifikationen vermieden, so dass erforderliche Zertifizierungen obsolet sind. Die entsprechenden Verfahren können leicht auf andere Modelle übertragen werden. Das Verfahrung für die Modularisierung des Gehäuses (Backcovers) beispielsweise ist für andere Gerätemodelle des gleichen Herstellers grundsätzlich identisch, es müssen lediglich die modellspezifischen Abmessungen angepasst werden sowie spezifische Verankerungspunkte identifiziert und darauf angepasst werden. Der strukturell-organisatorische Teil des Shiftens ist auf andere Gerätemodelle übertragbar. Nach einer ausgiebigen Testphase werden unter anderem die Umweltauswirkungen des Shiftens und die Einsparpotenziale durch verlängerte Nutzungsdauer ermittelt. Um sicherzustellen, dass SHIFTed Endgeräte tatsächlich ökologisch nachhaltiger sind, sollen die Potenziale zur Reduzierung von Umweltwirkungen strukturiert und vergleichbar quantifiziert und geprüft werden. Damit Technik einen Beitrag zu den Nachhaltigkeitszielen des 21. Jahrhunderts leisten kann, muss ihre ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit fortlaufend bewertet werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Bitkom (2025). Deutsche horten fast 200 Millionen Alt-Handys. Online verfügbar unter: https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Deutsche-horten-fast-200-Millionen-Alt-Handys; Zugriff am 17.06.2026.

De Groot (2026). Smartphone-Markt: Konjunktur & Trends. Bitkom-Präsidium. Online verfügbar unter: https://www.bitkom.org/sites/main/files/2026-02/bitkom-praesentation-smartphone-markt-konjunktur-und-trends-2026.pdf; Zugriff am: 17.06.2026.

Deutschlandfunk Nova (2022). Smartphones werden länger genutzt als früher. Online verfügbar unter: https://www.deutschlandfunknova.de/beitrag/smartphones-handynutzung-offenbar-immer-laenger; Zugriff am: 17.06.2026.

Howarth (2026). How Many People Own Smartphones? (2025-2029). Exploding Topics. Online verfügbar unter: https://explodingtopics.com/blog/smartphone-stats; Zugriff am: 16.06.2026.

Lange (2023). Diese Geräte werden durch das Smartphone überflüssig. Bitkom research. Online verfügbar unter: https://bitkom-research.de/news/diese-geraete-werden-durch-das-smartphone-ueberfluessig; Zugriff am: 16.06.2026.

Schomberg et al. (2023). Anna Schomberg, Clemens Mostert, Stefan Bringezu et al. Environmental footprints show the savings potential of high reparability through modular smartphone design, 05 April 2023, PREPRINT (Version 1). Online verfügbar unter: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2724319/v1; Zugriff am 17.06.2026.

Statista (2025a). Number of smartphone mobile network subscriptions worldwide from 2016 to 2025, with forecasts from 2025 to 2028. Statista Research Department. Online verfügbar unter: https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/; Zugriff am: 16.06.2026.

Statista (2025b). Anzahl der Smartphone-Nutzer in Deutschland bis 2030. Statista Research Department. Online verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/198959/umfrage/anzahl-der-smartphonenutzer-in-deutschland-seit-2010/; Zugriff am: 15.06.2026.

Statista (2025c). Smartphone-Besitz und Smartphone-Nutzung in Österreich bis 2023. Statista Research Department. Online verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/568185/umfrage/smartphone-besitz-und-smartphone-nutzung-in-oesterreich/; Zugriff am: 15.06.2026.

Statista (2025d). Besitz von Mobiltelefonen in der Schweiz nach Telefonart bis 2024. Statista Research Department. Online verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/537944/umfrage/besitz-von-smartphone-bzw-tablet-in-der-schweiz/; Zugriff am: 15.06.2026.

Statista (2024). Nutzung des Internets durch mobile Endgeräte in den Niederlanden bis 2023. Statista Research Department. Online verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/910072/umfrage/mobile-internetnutzung-unterwegs-in-den-niederlanden/; Zugriff am: 15.06.2026.

KONTAKT

Dr. Ralf Brüning
info@dr-bruening.de
+49 4401 7049760
Geschäftsführer
Dr. Brüning Engineering UG
https://www.dr-bruening.de/

Social Urban Mining bei der Generalsanierung der Otto-Möbes-Akademie Graz - vom Planen und Umsetzen

Markus Meissner[1], Thomas Romm[1], Sonja Zumpfe[1] & Jasmin Bermadinger[1]
[1)] BauKarussell e.Gen., Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Der Beitrag analysiert die Anwendung von Social Urban Mining (SUM) im Rückbau der Otto Möbes Akademie in Graz, um Potenziale für Kreislaufwirtschaft, Beschäftigung und Wirtschaftlichkeit zu heben. Auf Basis eines zweiphasigen Vorgehens (Konzept und operative Umsetzung) wurden Entfrachtungsarbeiten durchgeführt sowie Bauteile systematisch erfasst und einer Wiederverwendung zugeführt. Die dokumentierten Ergebnisse zeigen, dass über 87 t Material bewirtschaftet wurden. Davon wurden mehr als 40 t als Re-Use Produkte in eine Wiederverwendung verkauft. Gleichzeitig konnten 8 Personen qualifiziert und 1.786 Arbeitsstunden generiert werden. Die Erlöse von rund 37.000 € sowie vermiedene Beschaffungs-, Entsorgungs- und Demontagekosten führten zur einer Kostenneutralität. Gegenüber der Potenzialabschätzung wurden zentrale Kennwerte übertroffen. Social Urban Mining erweist sich damit als wirksames Instrument zur Aktivierung urbaner Minen, zur Reduktion von Treibhausgasemissionen durch Lebenszyklusverlängerung sowie zur Stärkung regionaler Wertschöpfung. Die Ergebnisse unterstreichen die Übertragbarkeit auf Sanierungsprojekte, die Bedeutung qualifizierter Akteure und digitaler Bauteilkataloge sowie die Rolle transparenter, marktlicher Abwicklungsmodelle für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft im Bausektor.

1 HINTERGRUND

Der Bausektor ist in Bezug auf Ressourcenbedarf essenziell, um die österreichischen Anstrengungen in Richtung Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz voranzutreiben. Die Bedeutung zeigt sich z.B. daran, dass vom Gesamtabfallaufkommen 2023 (rd. 67,2 Mio. t) rund 16%, also 8,4 Mio. t, als Bau- und Abbruchabfälle dokumentiert wurden (BMLUK 2025). Er wird dementsprechend in einer Reihe von Strategien als Handlungsfeld, Transformationsschwerpunkt o.ä. angeführt. (vgl. EU COM 2019; BMK 2022, 2023a, 2023b; Wirtschaftsagentur Wien 2024; Magistrat der Stadt Wien 2025). Urban Mining wird auch im Bundesabfallwirtschaftsplan als ein Ansatz erkannt, um die in der Infrastruktur gebundenen Ressourcen wieder in neue Wertschöpfungsketten integrieren zu können (BMK 2023b, S. 374). Die österreichische Recycling-Baustoff Verordnung (RBV 2016) mit Ihren Bestimmungen und der begleitenden Norm zum verwertungsorientierenden Rückbau (ON B 3151) stellen einen legistischen Rahmen in Richtung Urban Mining bereit.

Österreich bindet in die Entwicklung der Kreislaufwirtschaft seit spätestens 2008 sozialwirtschaftliche Stakeholder ein. Auch der EU-Aktionsplan zur Kreislaufwirtschaft hebt die Pionierrolle der Sozialwirtschaft bei der Transformation hervor (vgl. EU COM 2020, BMK 2022). Im Jahr 2016 verdichteten die pulswerk GmbH, Romm ZT und Re-Use Austria ihre Überlegungen, um die Phase des Gebäuderückbaus im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu aktivieren. Mit dem Konzept Social Urban Mining (SUM) verbinden sie die Potentiale der urbanen Mine „Gebäude“ mit den Leistungen und Zielen von sozialwirtschaftlichen Einrichtungen. Zeitgleich tritt die RBV in Kraft und gibt Momentum, die Rückbauphase im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu nutzen.
Social Urban Mining fügt sich mithilfe der Kompetenzen aus Rückbau, Abfallwirtschaft und Sozialwirtschaft in den standardisierten Rückbauablauf ein und sozialwirtschaftliche Einrichtungen übernehmen definierte, abbruchvorbereitende Rückbauarbeiten. Durch die sortenreine Trennung und Abfallvermeidung durch Re-Use können Mehrwerte generiert werden. Die Verlängerung des Lebenszyklus von Bauteilen, die ins Re-Use vermittelt werden, vermeiden den Kauf neuer Produkte und damit verbundene Treibhausgasemissionen. Eine sortenreine Trennung von

anfallenden Abfällen begünstigt effektive stoffliche Verwertungsmöglichkeiten. Zeitgleich bereitet die Entfrachtung von Schad- und Störstoffen den Weg für die Herstellung von Recyclingbaustoffen ganz im Sinne der RBV. Sämtliche generierte Erlöse werden dem Auftraggeber nach Open Book-Prinzip dargestellt und gutgeschrieben. Als Ergebnis finanziert sich das operative Social Urban Mining zum Teil selbst. Seit 2022 agiert die Genossenschaft BauKarussell mit ihren Partnern als Fachplaner zur Analyse und Verortung der Gebäudewerte sowie als operativer Rückbauer nach ÖNORM B 3151 (Schad- und Störstoffentfrachtung). Zur anschlussfähigen Umsetzung hat sich eine zweiphasige Vorgehensweise etabliert: die Planung und Konzeption („Social Urban Mining Konzept“) sowie die operative Umsetzung („Operatives Social Urban Mining“). Seit 2016 wurden mehr als 30 Rückbauprojekte mit Social Urban Mining für private, gemeinnützige bzw. öffentlichen Auftraggeber umgesetzt. (vgl. Meissner 2016, 2020, 2023; Meissner et al. 2017, 2018, 2019, 2021a, 2021b, 2022; Schanda 2021; Schanda et al. 2022; Bermadinger 2025; Zumpfe und Meissner 2026; Romm und Kasper 2018; Romm 2018).

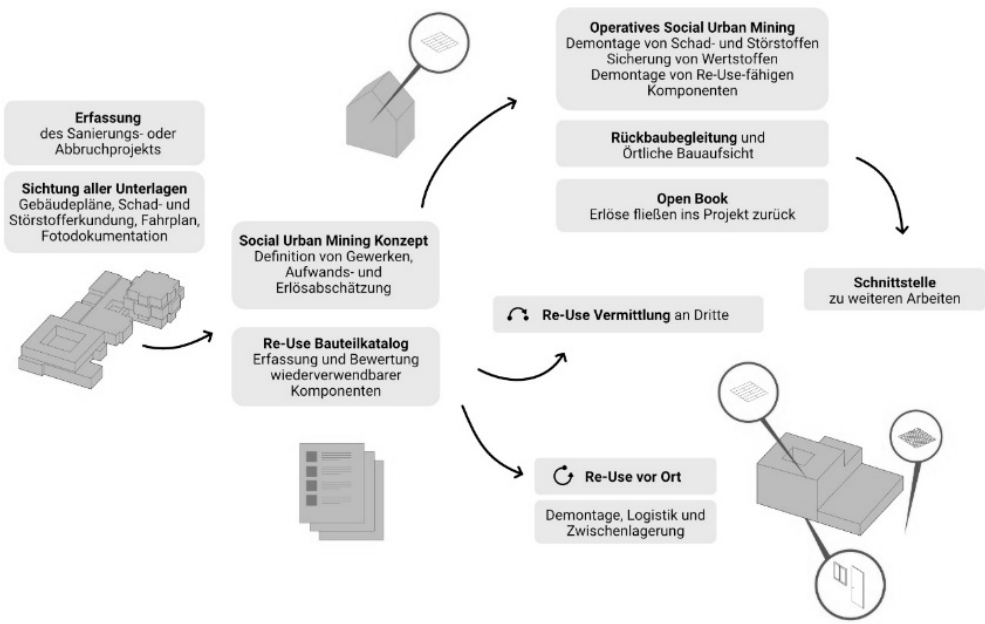


Abb.1: Das Modell Social Urban Mining von der Konzeption zur operativen Umsetzung.

Im vorliegenden Beitrag wird das Vorgehen anhand eines umgesetztes Rückbauprojekts mit Social Urban Mining, der Otto-Möbes-Akademie (OMAK) in Graz, beschrieben, analysiert und reflektiert.

2 METHODE

Die **Otto-Möbes-Akademie im Stiftingtal Graz** ist ein vielseitig genutztes Tagungs- und Veranstaltungszentrum mit einer Bruttogeschossfläche von ca. 4.500 m^2. Das heutige Bildungshaus wurde unter den Namen „Manowarda-Villa“ bzw. „Hellenaionschlösschen“ bekannt und wurde 1905/1906 vom Architekten Adalbert Pasdirek-Coreno errichtet. Um 1925 wurde es vom jüdischen Arzt Dr. Bader gekauft und als Kurpension Sophienhöhe genutzt. Die Kammer für Arbeiter und Angestellte für Steiermark (AK Steiermark) erwarb 1949 unter dem damaligen Präsidenten und nunmehrigen Namensgeber Otto Möbes das Gebäude als Schulungszentrum (vgl. Hainzl 2026). Es gab in der Vergangenheit verschiedene Sanierungsaktivitäten, für viele Flächen im

Innenbereich erfolgte dies zuletzt im Jahr 2005, die Dachdeckung hingegen ist noch aus den 1970er Jahren. Um den künftigen Anforderungen einer Bildungs- und Veranstaltungsstätte zu entsprechen, wird es seit Jänner 2026 umfassend saniert und modernisiert.
Mit der Entscheidung zur Generalsanierung wurde bereits der größte Hebel zur höchstmöglichen Ressourcenschonung betätigt. Dennoch können im Zuge der Entkernung des Objekts zur Vorbereitung der Umbaumaßnahmen zahlreiche Bauteile und Materialien mit Potenzial zur Wiederverwendung anfallen. Ziel der AK Steiermark war es, möglichst viel der anfallenden Materialien im Kreislauf zu halten, Qualifizierung im Rahmen der Rückbauarbeiten zu ermöglichen und Transparenz entlang des gesamten Projekts zu gewährleisten.
Im Sommer 2025 wurden im Vorfeld des Baustarts ein **Social Urban Mining Konzept** verfasst. Dieses beinhaltet eine Begehung und Fotodokumentation des Gebäudebestands, eine detaillierte Flächenauswertung zur Definition des Leistungsumfangs sowie die Abgrenzung der Arbeitsbereiche mithilfe einer umfassenden Schad- und Störstofferkundung. In Summe wurden Arbeiten von über 10 Wochen für ein fünfköpfiges Team identifiziert. Als regionaler Partner konnte das Beschäftigungsprojekt des Bildungszentrum Graz-Süd gewonnen werden. Zudem wird in Form einer Re-Use-Ampel das Potenzial zur Wiederverwendung erhoben. Dieses Objekt zeigt hohes Re-Use-Potenzial, da die AK Steiermark im Beschaffungswesen Wert auf Qualität, Instandhaltung und Pflege legt. Alle Leistungen werden in einer Aufwands-, Kosten- und Erlösabschätzung dargestellt. Auf dieser Basis entschied die AK Steiermark die **operative Umsetzung** mit September 2025. Bereits während der letzten Betriebstage wurde der Bauteilkatalog erarbeitet. Dieser vertieft, vervollständigt und erweitert die Re-Use-Produktinformationen und listet mehr als 500 Produkte auf Komponentenebene samt Bildmaterial, Verortung, Anzahl und Maßen. Dieser Katalog ist der zentrale Ort der Verkaufsabwicklung.

Im Unterschied zu Neuprodukten treffen gebrauchte Bauteile auf einen sich entwickelnden Markt ohne stetige Nachfrage. Die tatsächliche Preisbildung wird, neben dem Originalwert auch maßgeblich durch den Objektstandort, das Alter, die Instandhaltung und Pflege sowie die Demontierbarkeit beeinflusst. Die Bauherrin hatte angekündigt, einige Fahrnisse und Ausstattungselemente zur Weiterverwendung an anderen Standorten in der Steiermark oder zum Wiedereinsatz in der sanierten OMAK zu bestimmen. Durch das Vorliegen eines umfassenden Bauteilkatalogs inkl. Bewertung aller Produkte wurde eine optimale Grundlage zur Weiterverwendung innerhalb des Unternehmens geschaffen. Mithilfe des BauKarussell-Bauteilkatalogs wurde die Verteilung der „intern bestellten“ Produkte auf weitere Standorte der AK Steiermark unterstützt und dokumentiert.

Im Dezember 2025 standen alle weiteren Bauteile aus der Otto-Möbes-Akademie ab einem definierten Stichtag öffentlich über den Online-Bauteilkatalog von BauKarussell zur Verfügung. Als Dienstleistung wickelte BauKarussell den gesamten Verkaufsprozess für den Bauherren ab, wobei generierte Erlöse offengelegt und im Zuge der Rechnungslegung gutgeschrieben wurden. Interessent:innen bekunden ihr Interesse, indem Sie eine Anfrage über den Onlinekatalog abschicken, wobei alle Anfragen nach Eingangsreihenfolge bearbeitet werden. In bilateralen Austausch wurden über einen Zeitraum von 10 Wochen Besichtigungstermine sowie Rahmenbedingungen zu Demontage, Prüfung und Abholung vereinbart.
Im Jänner 2026 besuchten die Mitarbeiter:innen des bfi-Beschäftigungsprojekts eine Einschulung („Social Urban Miner für Arbeitsmarktferne Personengruppen“). Im Zusammenspiel mit dem bfi Steiermark wurden sie so auf die Besonderheiten und Eigenheiten der Arbeiten hingewiesen und unterwiesen. Im Sinne der Teilqualifizierung wurden Teilnahmeurkunden ausgestellt. Parallel liefen die Angebotseinholung und Auswahl eines befugten Fachentsorgers.
Ab Februar 2026 wurden über einen Zeitraum von 12 Wochen die vorbereitenden Rückbauarbeiten entsprechend der Konzeption durchgeführt. Die Arbeiten umfassten folgende Gewerke:

- Entfernen und Bereitstellung zur Abholung von verschiedenen Bodenbelägen (Kunststoff, Laminat, Teppich, Parkett)
- Entfernen und Bereitstellung zur Abholung von abgehängten Decken aus Holz, Gips, künstlichen Mineralfasern, Metall

- Entfernen und Bereitstellung zur Abholung von Türblättern (Innentüren) und Wandverkleidungen aus Holz
- Entfernen und Bereitstellung zur Abholung von Leuchtkörpern inkl. Leuchtstoffröhren
- Demontieren und sortenreine Sammlung von werthaltigen Abfallfraktionen (Eisenschrotte, Buntmetalle, Edelstahl)
- Entrümpelung: Räumung und Bereitstellung zur Abholung von verbliebenen Fahrnissen
- Auf Nachfrage der Bauherrin oder Dritter wurden wiederverwendbare Komponenten bereitgestellt und/oder transportiert.

Die laufende Leistungskontrolle wurde durch eine Örtliche Bauaufsicht abgewickelt. Teilweise erfolgten Demontagen wiederverwendbarer Bauteile durch den jeweiligen Abnehmer:in mit fachbefugten Unternehmen. BauKarussell hat diese Demontagearbeiten in Abstimmung mit dem Bauherrn in den Bauablauf eingegliedert. Notwendige Sicherungsmaßnahmen durch die Entnahme bestimmter Bauteile (bspw. Fenster oder Außengeländer) wurden durch die Abnehmer:innen oder das bfi-Beschäftigungsprojekt bei Bedarf ergriffen. Alle entfernten Schad- und Störstoffe sowie entnommene Bauteile wurden in Form eines Schnittstellenplans dokumentiert, der als Grundlage für nachfolgende Gewerke diente.

3 ERGEBNISSE

Im Zuge zweier Open Book-Präsentationen wurden die Wirkungen gegenüber der AK Steiermark offengelegt.

Die **Bilanz der Ressourcenwirkung** zeigt, dass mit Social Urban Mining in der Otto-Möbes-Akademie über 87 Tonnen Material bewegt wurde. Diese Summe setzt sich aus vier Materialströmen zusammen: Bauteile, die innerhalb der AK Steiermark in Verwendung gehalten wurden („Re-Use-Produkte Eigenbedarf“, 8,6 t), Bauteile, die an Dritte zur Wiederverwendung vermittelt wurden („Re-Use-Produkte Dritte“ 32 t) und werthaltige bzw. nicht werthaltige Abfälle (1,4 t bzw. 45,2 t), die sortenrein getrennt an einen Fachentsorger übergeben wurden.

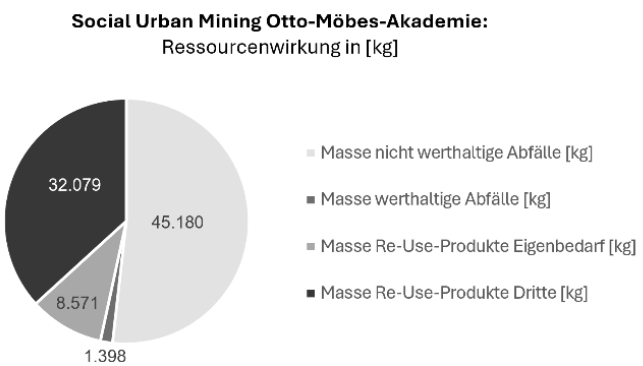


Abb. 2: Ressourcenwirkung von Social Urban Mining in [kg] in der Otto-Möbes-Akademie, Graz

Die **soziale Bilanz** weist aus, dass durch die Umsetzung der Entfrachtungsarbeiten mit dem bfi-Beschäftigungsprojekt des Bildungszentrum Graz-Süd acht Zielgruppenpersonen in Summe 1.786 Stunden Arbeitsstunden leisteten.

Auf **ökonomischer Ebene** konnten durch die Bewirtschaftung der urbanen Mine in Summe gut € 37.000 Erlöse generiert werden, die das Projekt mitfinanzierten. Mehr als 97% der Erlöse gehen auf den Verkauf von wiederverwendbaren Komponenten zurück. Nur rund 3% entstammen einer sortenreinen Trennung von Abfällen wie Eisenschrotte, Buntmetalle und Edelstahl.

Das Projekt verursacht auch **nicht quantifizierbare Wirkungen**, bspw. jene Wege, die die Bauteile aus der Otto-Möbes-Akademie weiter gehen:

- 2015 hat in Wien das erste magdas Hotel eröffnet. Die Caritas setzt bei der aktuellen Sanierung auf gebrauchte Eichenparketten aus dem Objekt.
- Der Eisstocksportverein Waizenkirchen setzt bei der Errichtung einer neuen Sportstätte auf die Tatkraft und Kompetenz der Vereinsmitglieder. Ein großes Team organisierte Demontagen und Transport von Alu-Holz-Fenstern, Türportalen und Außentüren. Für den Wiedereinsatz wurden u.a. die Ausführungspläne angepasst.
- Der Buschenschank Stiarlhof in St. Andrä im Sausal errichtet eine Veranstaltungslocation und setzt dabei auf Teile der gewerblichen Großküche der Otto-Möbes-Akademie. Alle Komponenten wurden in Eigenregie mit Schlosser- und Elektrikerbetrieben demontiert und in ihr neues Zuhause transportiert.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Aus der Umsetzung ziehen die Autor:innen folgende Erkenntnisse und Schlussfolgerungen:

- **Erfolgreiche Umsetzung**: Beim Social Urban Mining in der Otto-Möbes-Akademie konnte das im Konzept identifizierte Potenzial nicht nur vollständig ausgeschöpft, sondern sogar übertroffen werden.
- **Effiziente Re-Use Vermittlung**: Dank des langen Vermittlungsfensters, der detaillierten Erfassung und effizienten Abwicklung über die zentrale Datenbank von BauKarussell konnte das Re-Use Potenzial optimal ausgeschöpft werden. Stellvertretend für alle in die Wiederverwendung vermittelten Bauteile seien der vollständige Parkettboden im Speisesaal, die Großküchen-Ausstattung, Alu-Holz-Fenster, Türportale, Außengeländer, Vordächer, Holz-Terrassenböden und Sportgeräte genannt.
- **Kostenverschiebung, keine Mehrkosten**: Bei Berücksichtigung vermiedener Kosten in anderen Bereichen erreicht das Projekt Kostenneutralität. Die Wiederverwendung im eigenen Bereich vermeidet die Beschaffung neuer Produkte und wirkt damit kostenmindernd. Ebenfalls kostenmindernd wirkt die Wiederverwendung durch Dritte, denn diese Produkte müssen von der Bauherrin bzw. der Sanierungsfirma nicht mehr ausgebaut und entsorgt werden. Die Werte der urbanen Mine reduzieren die Kosten für die Sanierung.
- **Öffentlichkeitswirksamkeit und regionaler Mehrwert**: In enger Abstimmung mit dem Bauherrn macht BauKarussell urbane Minen der Öffentlichkeit zugänglich. Neben Re-Use Abnehmer:innen wurden in der Otto-Möbes-Akademie zwei Fachexkursionen organisiert. Die Entfrachtungsarbeiten wurden in Form von Pressefotos dokumentiert und ausgewählte Geschichten einzelner Bauteile werden in die Pressearbeit der Bauherrin aufgenommen.
- **Wirkungen auf vielen Ebenen:** Social Urban Mining realisiert messbare ökologische, soziale und ökonomische Mehrwerte für den Bauherrn, für das lokale Umfeld und auf gesellschaftlicher Ebene.
- **Kostensicherheit durch Schulung und enges Controlling**: Durch die Wahl eines geeigneten Partners und der Schulung aller arbeitenden Personen, mit projektspezifischen Vertiefungen wird sichergestellt, dass die Baustelle sicher gesetzeskonform und zeitgetreu abgewickelt wird. Die wöchentliche Kontrolle des Leistungsfortschritts durch eine Örtliche Bauaufsicht ermöglicht es, etwaige Abweichungen zu erkennen und ggf. gegenzusteuern.
- **Handelnde Personen als Erfolgsfaktor**: Der Erfolg des Projekts hängt wesentlich von den handelnden Personen ab. Social Urban Mining verändert den Rückbauprozess und schafft damit Raum für ökonomischen, ökologische und soziale Mehrwerte. Ein Grundverständnis und Flexibilität für diese neuen, zirkulären Wege durch Beteiligte wie Projektleiter:in, Beschaffungswesen, Rechtsanwält:innen, Kommunikationsverantwortliche bis hin zum/zur Haustechniker:in erleichtern die Umsetzung von Social Urban Mining massiv.
- **Sanierungsobjekte eignen sich für Social Urban Mining**: Die Umsetzung des beschriebenen Projekts steht stellvertretend für eine Erweiterung im Anwendungsbereich von Social Urban Mining. Durch den Fokus auf vorbereitende Entfrachtungsarbeiten kann es neben

Komplettabbruchprojekten auch in Sanierungen und Teilabbrüchen angewendet werden. Die Anwendung der RBV und der begleitenden ON B 3151 ist auch in diesen Projekten der gesetzliche Rahmen. Abfallwirtschaftlich betrachtet stellt eine Sanierung eine Wiederverwendung der tragenden Strukturen dar. Sanierungen sind damit ein wesentlicher Schlüssel zur Ressourceneinsparung.

- **Reduktion der Bauzeit**: Durch die Entkopplung vorbereitender Rückbauarbeiten von den restlichen Umbaumaßnahmen konnte umgehend nach Absiedelung der Mitarbeiter:innen mit den Entfrachtungsarbeiten begonnen werden. In Summe führte dies zu einer Verkürzung der Bauzeit, da parallel zu laufenden Verfahren und Verhandlungen bereits mit der Vorbereitung der Baumaßnahmen begonnen werden konnte. Die Kopplung von Schad- und Störstoffentfrachtung und Wiederverwendung mittels Social Urban Mining ist wiederum eine effiziente Möglichkeit, Abfallvermeidung im Rahmen eines Rückbaus zu realisieren.
- **Transparenz und Verantwortung öffentlicher Institutionen**: Innerhalb des Projekts hat es BauKarussell ermöglicht, den Re-Use Verkauf als unabhängiger Dritter abzuwickeln und gleichzeitig generierte Erlöse zur Kofinanzierung des Rückbaus nutzen zu können. Diese Form der Abwicklung schafft Fairness in Reihung und Bepreisung sowie Rechtssicherheit durch die Übernahme von Haftungs- und Gewährleistungsansprüchen.
- **Weiterverwendung im eigenen Immobilienportfolio**: Die Weiternutzung vorhandener Komponenten an anderen Standorten der AK Steiermark liegt nahe, wird in der Praxis jedoch selten ausgeschöpft. Ein Grund dafür ist, dass keine detaillierte Erfassung und Bewertung des Gebäudebestands auf Komponentenebene vorliegen. Durch die Bauteilaufnahme und Verwaltung im System von BauKarussell wurde dies ermöglicht.
- **Agieren in einem entstehenden Markt**: Auf gesellschaftlicher Ebene konnten durch das Projekt eine Reihe regionaler und gemeinnütziger Abnehmer:innen aktiviert werden. Ein Großteil der Re-Use Komponenten kam kleinen und mittelgroßen Betrieben aus der Region sowie Vereinen zugute. Durch leistbare Bepreisung und Flexibilität in der Organisation der Demontage ermöglicht BauKarussell Wiederverwendung in einem Markt, der aktuell in Entwicklung ist.

LITERATURVERZEICHNIS

BMK (2022): Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie. Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft. Hg. v. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. 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, zuletzt geprüft am 23.7.25.

EU COM (2019): COM (2019) 640 final - The European Green Deal. Hg. v. EU COM. Brussels.

EU COM (2020): COM (2020) 98 final - A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe. Brussels.

Hainzl, Joachim (2026): Stifting, Ries und Ragnitz, einst und jetzt. Verlag Clio Graz.

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.

RBV (2016): Recycling-Baustoffverordnung - Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Pflichten bei Bau- oder Abbruchtätigkeiten, die Trennung und die Behandlung von bei Bau- oder Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen, die Herstellung und das Abfallende von Recycling-Baustoffen, RBV, vom 06.03.2019. Fundstelle: Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich. In: Österreichischer Nationalrat (Hg.): BGBl. II Nr.181/2015.

ÖNORM ON B 3151, 2022: Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode.

Wirtschaftsagentur Wien (2024): Zirkuläres Bauen. Technologie Report. 2. Hg. v. Stadt Wien.

Rohstoffpotenzial industrieller Abwässer in Deutschland bezüglich kritischer Metalle

Lisa-Marie Hess[1], Daniel Vollprecht[1], Frank Haubrich[2], Jana Pinka[2], Janina Leiblein[3] & Thomas Heß[3]
[1)] Universität Augsburg, Lehrstuhl Resource and Chemical Engineering, Augsburg, Deutschland
[2)] G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Halsbrücke, Deutschland
[3)] Leiblein GmbH, Hardheim, Deutschland

KURZFASSUNG: In Anbetracht aktueller Entwicklungen verlagert sich der Fokus von einer reinen Abwasserbehandlung immer mehr auch zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus dem Abwasser. Im Projekt LiquidMining soll unter anderem das Potenzial industrieller Abwässer in Deutschland bezüglich kritischer Metalle abgeschätzt werden. Eine Literaturrecherche ergab, dass es in Deutschland bisher keine umfassende Übersicht zu Gehalten kritischer Metalle in industriellen Abwässern gibt und dass auch in Einzelstudien viele Elemente wie Seltene Erden oder auch Lithium nicht untersucht wurden. Aus Daten des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) über Konzentrationen und Abwassermengen von Betrieben, die einer wasserrechtlichen Genehmigung unterliegen, ergibt sich für das Jahr 2024 eine Fracht von über 3 t kritischer Metalle im verarbeitenden Gewerbe in Bayern, darunter 881 kg Wolfram. Die höchsten Frachten traten bei der Herstellung von chemischen Erzeugnissen, der Metallerzeugung und -bearbeitung und der Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen auf. Ergänzend zur Literaturrecherche wurden systematisch Firmen kontaktiert, um reale Proben aus unterschiedlichen Industriezweigen zu akquirieren. Insgesamt kamen die interessierten Unternehmen zu 70 % aus den Wirtschaftszweigen, die nach den Daten des LfU die höchsten Frachten aufwiesen. Im weiteren Verlauf des Projekts sollen die Proben analysiert werden und die Extraktion relevanter Metalle untersucht werden.

1 EINLEITUNG

Rohstoffe sind für die Industrie unverzichtbar und stehen am Anfang jeder Wertschöpfungskette. Als kritische Rohstoffe werden laut Definition der Europäischen Union (EU) darunter solche bezeichnet, die eine große wirtschaftliche Bedeutung haben und gleichzeitig einem erhöhten Versorgungsrisiko unterliegen. Die EU führt eine Liste mit kritischen Rohstoffen, welche alle drei Jahre aktualisiert wird. Die aktuelle Liste aus dem Jahr 2023 umfasst insgesamt 34 kritische Rohstoffe, eingeschlossen Nickel und Kupfer, welche als strategische Rohstoffe mit aufgenommen wurden (Europäische Kommission, 2023). Ein maßgeblicher Anteil der als kritisch eingestuften Rohstoffe entfällt auf Metalle. Laut einer Prognose der Internationalen Energieagentur (IEA) aus dem Jahr 2025 soll sich im „Stated Policies Scenario“ (STEPS) der Lithiumbedarf bis 2040 verfünffachen, während sich die Nachfrage nach Graphit und Nickel verdoppeln wird. Auch die Nachfrage nach Kobalt und Seltenen Erden (REE) wird stark ansteigen und bis 2040 um 50–60 % zunehmen (IEA, 2025). Aufgrund des steigenden Bedarfs und der starken Importabhängigkeit Europas ist im April 2024 das Europäische Gesetz zu kritischen Rohstoffen („Critical Raw Materials Act“) in Kraft getreten. Dieses besagt, dass bis 2030 mindestens 10 % des jährlichen Bedarfs der EU an strategischen Rohstoffen durch eigene Förderung, 40 % durch Verarbeitung innerhalb der EU und 25 % durch Recycling gedeckt werden sollen (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2024). Für viele der kritischen Metalle sind die Recyclingquoten aktuell noch gering. Die End-of-Life Recycling Input Rate (EoL-RIR) betrug im Jahr 2023 3 % für leichte seltene Erden (LREE), 10% für Platingruppenmetalle (PGM), 0 % für Lithium und 16 % für Nickel. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Identifikation und Nutzung bislang unzureichend erschlossener Sekundärrohstoffquellen zunehmend an Bedeutung. Industrielle Abwässer stellen eine bislang wenig erschlossene potenzielle Sekundärrohstoffquelle dar. Im Projekt LiquidMining

sollen Vorkommen und Extraktion kritischer Metalle aus industriellem Abwasser, aber auch aus natürlichen Wässern, gemeinsam mit den Industriepartnern G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH und Leiblein GmbH, sowie dem Karlsruher Institut für Technologie untersucht werden. Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms geförderte Projekt sieht eine Abschätzung des Potenzials in Deutschland vor. Darauf aufbauend soll die Extraktion ausgewählter Metalle zunächst im Labormaßstab untersucht werden und anschließend ein geeignetes Verfahren bis in den Pilotmaßstab skaliert werden.

2 METHODEN

2.1 Literaturrecherche

Um einen Überblick über das Rohstoffpotenzial industrieller Abwässer bezüglich kritischer Metalle zu gewinnen, wurde nach Daten in der Literatur recherchiert. Dazu wurde nach wissenschaftlichen Veröffentlichungen, wirtschaftlichen und umweltbezogenen Berichten sowie Branchenstudien zu den Themen Rückgewinnung von Metallen, Industrielle Abwasserbehandlung und Rohstoffpotenzial industrieller Abwässer gesucht. Es wurden nur Veröffentlichungen herangezogen, welche sich mit realem Ab- und Prozesswasser beschäftigen. Veröffentlichungen, welche Verfahren zur Rückgewinnung von Metallen aus synthetischen Lösungen untersuchen, wurden für die Betrachtung des Rohstoffpotenzials nicht herangezogen. Zudem wurden die statistischen Landesämter in Deutschland und das Landesamt für Umwelt (LfU) in Bayern kontaktiert und nach Daten zu Abwassermengen industrieller Abwässer in den einzelnen Branchen und Bundesländern, sowie nach Daten zu Metallkonzentrationen angefragt. Für die Gliederung der Daten wurde die Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ), Ausgabe 2008 (WZ 2008), verwendet. Diese ermöglicht eine Einteilung der des Abwassers nach Industriezweig.

2.2 Probenakquise

Ergänzend zur Literaturrecherche wurden Firmen kontaktiert, um Proben aus unterschiedlichen Industriezweigen zu akquirieren. Hierzu wurde die öffentliche Chemikaliendatenbank der ECHA (European Chemicals Agency) verwendet. Gemäß der REACH-Verordnung müssen Unternehmen Stoffe, die sie in den Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) importieren oder dort herstellen, registrieren, sofern die Menge eine Tonne pro Jahr oder mehr beträgt. In der Datenbank sind die registrierten Unternehmen für die jeweiligen Stoffe gelistet. Die Datenbank wurde nach kritischen Metallen und deren Verbindungen durchsucht und die jeweiligen in Deutschland registrierten Firmen extrahiert. Anschließend wurden Händler und Dienstleister aussortiert. Alle übrigen Firmen wurden per E-Mail kontaktiert. Zudem wurden über Kontakte der Industriepartner G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH und Leiblein GmbH weitere Proben beschafft.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Auswertung der Literaturdaten

Die Literaturrecherche ergab, dass es bisher keine umfassende Übersicht zu Gehalten kritischer Metalle in industriellen Abwässern in Deutschland gibt. In einer Abschätzung des Umweltbundesamts zu zusätzlich aus Abwasser und Klärschlämmen extrahierbarer Wertstoffe aus dem Jahr 2022 wird darauf verwiesen, dass für wichtige Industriewertstoffe wie Platingruppenmetalle (PGM) oder Seltene Erden (REE), aufgrund der unzureichenden Datenlage, keine Abschätzung von Wertstoffmengen möglich war. Dies betrifft sowohl kommunale als auch industrielle Abwässer (Sichler et al., 2022). Vriens et al. (2017) untersuchten in einer landesweiten Studie die Elementflüsse in Abwässern in der Schweiz und nahmen hierzu Proben aus dem Ablauf von 64

kommunalen Kläranlagen. Die Konzentrationen der kritischen Metalle befanden sich in einem Bereich von bis zu 1 mg L^{-1}, während REE mit maximalen Konzentrationen von 1-100 ng L^{-1} nur in sehr geringen Mengen vorkamen. Eine Ausnahme stellt Gadolinium dar, welches in Konzentrationen von bis zu 838 µg L^{-1} vorkam. Dies führten die Autoren auf Gd-Komplexen als Kontrastmittel in der Medizin zurück (Vriens et al., 2017). Um auch in industriellen Abwässern einen Überblick über Konzentrationen und Frachten zu gewinnen, muss auf Einzelstudien zurückgegriffen werden. In Tab. 1 ist eine Übersicht zu 12 wissenschaftlichen Publikationen dargestellt, welche Untersuchungen mit realen Proben industrieller Ab- und Prozesswässer durchführten. Die Proben stammen aus acht unterschiedlichen Wirtschaftszweigen, wovon sieben dem verarbeitenden Gewerbe zugeordnet werden können. Die beiden Metalle Nickel und Kupfer wurden in allen Wirtschaftszweigen betrachtet. Dies kann zum einen an ihrer häufigen Verwendung liegen. Zum anderen sind Kupfer und Nickel vielerorts durch Grenzwerte reguliert und werden daher regelmäßig untersucht. Einige kritische Metalle wie die Elemente der Seltenen Erden oder auch Lithium wurden dagegen in keiner der aufgeführten Publikationen untersucht. Auch ist auffällig, dass die Rückgewinnung von Metallen aus Abwässern der chemischen Industrie in der betrachteten wissenschaftlichen Literatur nicht vertreten ist.

Tab. 1: Literaturübersicht zu untersuchten Metallen in industriellen Abwasserproben, Gliederung nach Wirtschaftszweig

Wirtschaftszweig	**Metalle**	**Autor**
13 Herstellung von Textilien	Al, As, B, Be, Co, Cu, Ni, Sb, Si, Ti, V	Gursoy-Haksevenler et al. (2022) Islam et al. (2016)
15 Herstellung von Leder, Lederwaren und Schuhen	Al, As, B, Be, Co, Cu, Ni, Sb, Si, V	Gursoy-Haksevenler et al. (2022) Islam et al. (2016)
17 Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	As, Cu, Ni	Islam et al. (2016)
24 Metallerzeugung und -bearbeitung	Cu, Mg, Mn, Ni, Si, Sr, V, W	Tsekova et al. (2010) Vollprecht et al. (2020) Wolters et al. (2019)
25 Herstellung von Metallerzeugnissen	Al, As, Cu, Ni, Pd	Heuss-Aßbichler et al. (2016) Anagnostopoulos und Heuss-Aßbichler (2025) Kaya et al. (2022) Islam et al. (2016)
26 Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen	Al, As, Co, Cu, Ga, Mg, Mn, Ni, W	Jain et al. (2019)
27 Herstellung von elektrischen Ausrüstungen	As, Cu, Ni	Benalia et al. (2022) Islam et al. (2016)
38 Sammlung, Behandlung und Beseitigung von Abfällen; Rückgewinnung	Al, Cu, Mg, Mn, Ni, Si, Sr, V, W	Vollprecht et al. (2020) Panda et al. (2020) Tran et al. (2020)

Vom LfU Bayern wurden für das Jahr 2024 anonymisierte Daten zur Konzentration und Abwassermenge von Betrieben in Bayern, die einer wasserrechtlichen Genehmigung (§57 WHG, §58 WHG) unterliegen, bereitgestellt. Die Zusammenstellung der Daten erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da nicht zu allen Betrieben der Jahresbericht nach Eigenüberwachungsverordnung (EÜV) vorgelegt wurde und möglicherweise die Betriebsinfo nicht zu allen Betrieben konsequent gepflegt wurde. 14 Kritische Metalle wurden in mindestens einem der Betriebe untersucht: Aluminium, Antimon, Arsen, Bor, Cobalt, Kupfer, Lithium, Mangan, Nickel, Palladium, Strontium, Titan, Vanadium und Wolfram. Der Mittelwert aus nach EÜV gemessenen Betreiber-Werte und Messwerten der amtlichen Überwachung wurden für eine Berechnung der Jahresfracht mit der im Betriebsjahr angefallenen Gesamtabwassermenge der Messstelle multipliziert. Die Anzahl der vom Betreiber durchgeführten Messungen nach EÜV betrug dabei im Durchschnitt 67 Messungen. Insgesamt lässt sich in Bayern für das Betriebsjahr 2024 eine Fracht von über 3 t an kritischen Metallen berechnen. Die Konzentrationen lagen in einem Bereich von

0-5 mg L^{-1}. In Abb. 1 sind die 8 Wirtschaftszweige mit den höchsten Jahresfrachten im verarbeitenden Gewerbe dargestellt. Zu den hier vertretenen WZ 20, 23 und 29 konnten in der vorangegangenen Literaturrecherche keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen identifiziert werden. Auffällig ist zudem eine hohe Fracht von 881 kg Wolfram in WZ 26. 98 % dieser Fracht lassen sich auf ein einzelnes Unternehmen zurückführen.

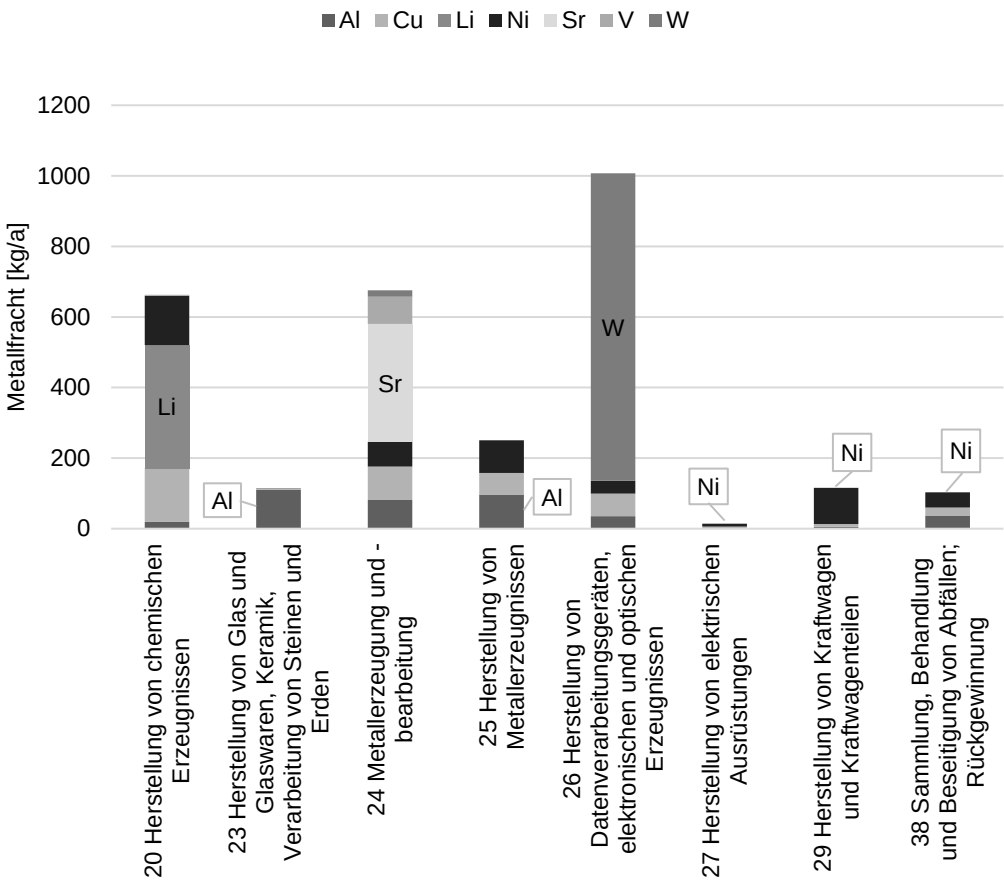


Abb. 1: Metallfrachten im Jahr 2024 von Betrieben in Bayern mit wasserrechtlicher Genehmigung, Aufschlüsselung nach Wirtschaftszweigen (WZ 2008), Frachten berechnet aus Daten des Bayerischen Landesamts für Umwelt, www.lfu.bayern.de

3.2 Ergebnisse der Probenakquise

Von insgesamt 235 kontaktierten Unternehmen wurden 15% der Anfragen beantwortet. Insgesamt 6% der Unternehmen sagten zu, Proben für das Projekt bereitzustellen, während 11% für eine Probenahme absagten. Mit 5% war der häufigste Grund für eine Absage das Fehlen von metallhaltigem Abwasser. Jeweils 3% der Unternehmen sagten aus anderem Grund oder ohne die Angabe von Gründen ab. Zusammen mit den durch die Industriepartnern akquirierten Proben ergab sich ein Gesamtanzahl von 20 Proben. In Abb. 2 sind die Anteile der der jeweiligen Wirtschaftszweige an der Gesamtanzahl der Proben dargestellt. Die interessierten Unternehmen gehören sieben unterschiedlichen Wirtschaftszweigen an. Die Wirtschaftszweige 20 und 24-26,

welche laut der Daten des LfU die höchsten Jahresfrachten aufweisen, sind darunter mit 70 % der Proben vertreten.

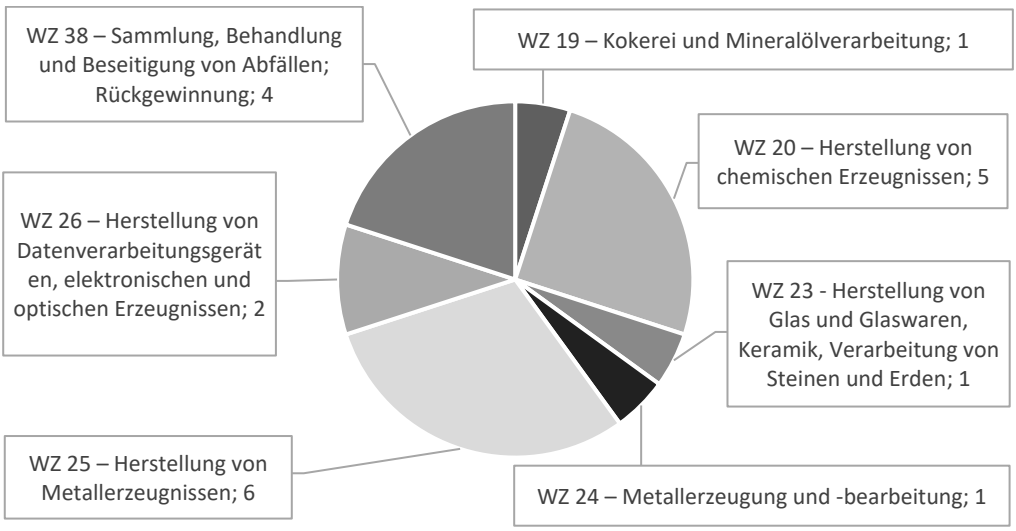


Abb. 2: Anteile der jeweiligen Wirtschaftszweige an der Gesamtanzahl der Proben

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die durchgeführte Literaturrecherche zeigte, dass die Wirtschaftszweige 24-26 das größte Rohstoffpotenzial hinsichtlich kritischer Metalle aufweisen. Diese Branchen wurden bereits in zahlreichen wissenschaftlichen Studien untersucht. Darüber hinaus weisen die Daten des LfU auf erhöhte Frachten kritischer Metalle in den entsprechenden Abwasserströmen hin. Für die Herstellung von chemischen Erzeugnissen (WZ 20) konnten im Rahmen der vorliegenden Literaturrecherche keine einschlägigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen identifiziert werden. Die Daten des LfU deuten jedoch darauf hin, dass auch dieser Wirtschaftszweig relevante Frachten kritischer Metalle aufweisen kann. Für das Jahr 2024 ergab sich aus den Daten wasserrechtlich genehmigungspflichtiger Betriebe eine Gesamtfracht von über 3 t an kritischen Metallen. Um die Datengrundlage auszuweiten, wurden bisher 20 Proben aus unterschiedlichen WZ akquiriert. Im weiteren Projektverlauf sollen zusätzliche Unternehmen angesprochen sowie bestehende Kontakte der Projektpartner genutzt werden, um die Anzahl der verfügbaren Proben zu erhöhen und die Datengrundlage weiter zu verbessern. Auf Basis der erhobenen Daten soll anschließend eine Abschätzung des Potenzials für Deutschland und eine graphische Darstellung als Sekundärrohstofflandkarte erstellt werden. Darauf aufbauend soll für ausgewählte Proben die Extraktion relevanter Metalle im Labormaßstab untersucht und anschließend gemeinsam mit den Praxispartnern ein geeignetes Verfahren schrittweise bis in den Pilotmaßstab skaliert werden.

DANKSAGUNG

Das Projekt LiquidMining wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms mit der Förderkennzeichen 03EI5035A gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

Anagnostopoulos, I. F. & Heuss-Aßbichler, S [Soraya] (2025). Recovery of Different Cu-Phases from Industrial Wastewater. *Minerals*, *15*(1), 23. https://doi.org/10.3390/min15010023

Bayerisches Landesamt für Umwelt. (2026). *Amtliche Überwachungsergebnisse der Kalenderjahre 2024 und 2025.* übermittelt am 28.05.2026 per E-Mail, www.lfu.bayern.de.

Benalia, M. C., Youcef, L., Bouaziz, M. G., Achour, S. & Menasra, H. (2022). Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater by Chemical Precipitation: Mechanisms and Sludge Characterization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *47*(5), 5587–5599. https://doi.org/10.1007/s13369-021-05525-7

Europäische Kommission. (2023). *Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023: Final Report.*

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. (2024). *Verordnung (EU) 2024/1252 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. April 2024 zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen: Critical Raw Materials Act.*

Gursoy-Haksevenler, B. H., Atasoy-Aytis, E., Dilaver, M. & Karaaslan, Y. (2022). Treatability of hazardous substances in industrial wastewater: case studies for textile manufacturing and leather production sectors. *Environmental monitoring and assessment*, *194*(5), 383. https://doi.org/10.1007/s10661-022-09982-x

Heuss-Aßbichler, S [S.], John, M. & Huber, A. L. (2016). A new procedure for recovering heavy metals in industrial wastewater. In C. A. Brebbia & H. Itoh (Hrsg.), *WIT Transactions on Ecology and the Environment, Waste Management and The Environment VIII* (S. 85–96). https://doi.org/10.2495/WM160091

IEA. (2025). *Global Critical Minerals Outlook 2025*. https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025

Islam, S [Saiful], Islam, S [Shariful], Habibullah-AL-mamun, Islam, S. A. & Eaton, D. W. (2016). Total and dissolved metals in the industrial wastewater: A case study from Dhaka Metropolitan, Bangladesh. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *5*, 74–80. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.04.001

Jain, R., Fan, S., Kaden, P., Tsushima, S., Foerstendorf, H., Barthen, R., Lehmann, F. & Pollmann, K. (2019). Recovery of gallium from wafer fabrication industry wastewaters by Desferrioxamine B and E using reversed-phase chromatography approach. *Water research*, *158*, 203–212. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.005

Kaya, H., Güneş, E. & Aydın, N. (2022). Characterisation of aluminium industrial wastewater and investigation of recovery alternatives. *Environmental Research and Technology*, *5*(3), 249–256. https://doi.org/10.35208/ert.1036966

Panda, R., Dinkar, O. S., Jha, M. K. & Pathak, D. D. (2020). Novel approach for selective recovery of gold, copper, and iron as marketable product from industrial effluent. *Gold Bulletin*, *53*(1), 11–18. https://doi.org/10.1007/s13404-020-00269-y

Sichler, T., Adam, C., Ehm, J.-H. & Montag, D. (2022). *Abschätzung zusätzlich aus Abwasser und Klärschlämmen kommunaler und gewerblicher Herkunft extrahierbarer Wertstoffe.* Umweltbundesamt.

Tran, L. T., Do, A. T., Pham, T. H., Nguyen, K. T. & Duong, H. C. (2020). Decentralised, small-scale coagulation-membrane treatment of wastewater from metal recycling villages - a case study from Vietnam. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, *82*(10), 2125–2133. https://doi.org/10.2166/wst.2020.493

Tsekova, K., Todorova, D. & Ganeva, S. (2010). Removal of heavy metals from industrial wastewater by free and immobilized cells of Aspergillus niger. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *64*(6), 447–451. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.05.003

Vollprecht, D., Plessl, K., Neuhold, S., Kittinger, F., Öfner, W., Müller, P., Mischitz, R. & Sedlazeck, K. P. (2020). Recovery of Molybdenum, Chromium, Tungsten, Copper, Silver, and Zinc from Industrial Waste Waters Using Zero-Valent Iron and Tailored Beneficiation Processes. *Processes*, *8*(3), 279. https://doi.org/10.3390/pr8030279

Vriens, B., Voegelin, A., Hug, S. J., Kaegi, R., Winkel, L. H. E., Buser, A. M. & Berg, M. (2017). Quantification of Element Fluxes in Wastewaters: A Nationwide Survey in Switzerland. *Environmental science & technology*, *51*(19), 10943–10953. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01731

Wolters, R., Hubrich, M., Kozariszczuk, M., Mund, P., Kamp, J. & Wessling, M. (2019). Kühl- und Prozesswasserbehandlung in der Stahlindustrie. *Chemie Ingenieur Technik*, *91*(10), 1445–1453. https://doi.org/10.1002/cite.201900050

Resilienz der Wasserversorgung und -speicherung im ländlichen Raum – Verbundprojekt SpeicherLand

Philipp Dost[1a], Falk Händel[2,3], Timm Wunderlich[4], Maike Rath[1a], Tanja Morgenstern[1a], Anna-Maria Hasterok[1b], Clara Brandes[1a], Sascha Rudolph[5], Felix Bilek[5], Andreas Hänel[6], Martin Pumpa[6], Elisabeth Grube[6], Thomas Grab[4], Bernd Bräutigam[7], Maria-Barbara Schaller[8], Georg Kramer[8], Martin Binder[9,10], Fritz Kalwa[2,3]& Traugott Scheytt[2]

[1a)] GICON© Resources GmbH, Dresden, Deutschland
[1b)] GICON© Resources GmbH, Freiberg, Deutschland
[2)] TU Bergakademie Freiberg, Hydrogeologie und Hydrochemie, Freiberg, Deutschland
[3)] TU Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft / INOWAS, Dresden, Deutschland
[4)] TU Bergakademie Freiberg, Technische Thermodynamik, Freiberg, Deutschland
[5)] Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V., Dresden, Deutschland
[6)] DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig, Deutschland
[7)] PLEJADES GmbH, Freiberg, Deutschland
[8)] GGB© Gesellschaft für Geomechanik und Baumesstechnik mbH, Rötha (OT Espenhain), Deutschland
[9)] TU Bergakademie Freiberg, Bodenmechanik und Grundbau, Freiberg, Deutschland
[10)] Universität Basel, Hydrogeologie / Angewandte und Umweltgeologie, Basel, Schweiz

KURZFASSUNG: Deutsche Wasserversorger stehen vor der Herausforderung, die Wasserversorgung trotz der Bedrohung durch diverse Risiken wie den Klimawandel auch zukünftig flächendeckend sicherzustellen. Das Ziel des Forschungsprojektes „SpeicherLand“ ist die Entwicklung eines Werkzeugs zur umfassenden Untersuchung der Wasserversorgung in ländlichen Regionen auf Vulnerabilitäten aber auch auf noch nicht ausgeschöpfte Potenziale. Dabei richtet sich der Fokus auf die Resilienz gegenüber klimatischen Entwicklungen, auf energetische Resilienz und Resilienz gegenüber Störungen. Maßgeblicher Bestandteil dieser Untersuchung ist die Optimierung der Nutzung und Vernetzung vorhandener oder potenzieller Wasserspeicher im Untersuchungsgebiet, dem Landkreis Mittelsachsen (Deutschland). Durch ein vorangestelltes Mapping von Gebietsattributen, die auf Speicherpotenziale oder hohe Trinkwasserbedarfe hinweisen, werden zunächst Gebiete für die Modellentwicklung und -anwendung abgegrenzt. Die Modellentwicklung sieht den Aufbau einzelner Sektorenmodelle und eine anschließende Kopplung dieser Modelle in einem Gesamtmodell vor, um die Wasser- und Energieversorgung ganzheitlich abzubilden. Durch das Gesamtmodell sollen resilienzstärkende Maßnahmen für die Wasserversorgung evaluiert werden.

1 HINTERGRUND UND MOTIVATION

Deutsche Wasserversorger stehen vor der Herausforderung den Bedarf der Bevölkerung, Landwirtschaft und Industrie mit einer begrenzten Ressource zu decken. Bedingt durch klimatischen Wandel, aber auch durch demographische Entwicklungen und industrielle Innovation müssen Wasserversorger in Zukunft veränderte Rahmenbedingungen für die Bereitstellung von Wasser berücksichtigen. Dabei spielen nicht nur die Qualität und Quantität der Ressource selbst eine Rolle, die Energieversorgung für Aufbereitung und Verteilung des Wassers im Versorgungsnetz muss ebenfalls gesichert sein.

Ziel des Verbundvorhabens „SpeicherLand“ ist es, durch die Entwicklung und Nutzung innovativer Methoden eine umfassende Zustands- und Prozessbeschreibung der wesentlichen Kreislauf- und Versorgungskomponenten für ein Modellgebiet im Hinblick auf Wassermenge, zeitliche Verfügbarkeit, räumliche Verfügbarkeit und Vulnerabilität zu erstellen. Das Modellsystem soll Wasserversorger zukünftig dabei unterstützen, Risikogebiete und -fälle, aber auch unausgeschöpfte Potenziale zu identifizieren und Lösungsansätze zu erarbeiten.

2 UNTERSUCHUNGSGEBIET UND DATENGRUNDLAGEN

Das Untersuchungsgebiet ist der Landkreis Mittelsachsen. Sein Gebiet erstreckt sich auf einer Fläche von 2.117 km² vom Osterzgebirge im Südosten über das Erzgebirgsvorland und das mittelsächsische Hügelland im Nordwesten. Dabei beträgt die Höhendifferenz etwa 630 m. Das Hauptgewässer ist die Freiberger Mulde. Geologisch ist Mittelsachsen dominiert durch Festgestein und Kluft-Grundwasserleiter, Lockergestein ist lediglich im Norden des Landkreises vorhanden. Historisch ist die Erzgebirgsregion um Freiberg durch den Bergbau geprägt, dieser Einfluss ist heute noch durch zahlreiche wasserführende Stollen (Röschen) und Kunstgräben erkennbar. Heute werden 71 % der Fläche landwirtschaftlich genutzt, 17 % bilden Waldflächen und 11 % der Fläche entfallen auf Siedlungsgebiete. Der Landkreis Mittelsachsen hat knapp 300.000 Einwohner in 21 Städten und 31 Gemeinden, die bevölkerungsreichste Stadt ist die Kreis- und Universitätsstadt Freiberg (rund 40.000 Einwohner) (Landkreis Mittelsachsen, 2026). Trinkwasser wird überwiegend aus Oberflächenwässern des Talsperren-Verbundsystems und der Revierwasserlaufanstalt Freiberg gewonnen, wobei der Norden des Landkreises seine Wasserversorgung hauptsächlich auf Grundwasser stützt (Wasserverband Döbeln-Oschatz, 2026). Verschiedene Behörden Sachsens stellen für den Freistaat Datengrundlagen öffentlich zur Verfügung. Daten der Wasserversorgung müssen aufgrund der Einstufung als kritische Infrastruktur bei den Verbänden angefragt werden. Assoziierte Partner für das Verbundprojekt „SpeicherLand“ sind der Wasserzweckverband Freiberg, das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, und die Landestalsperrenverwaltung Sachsen.

3 METHODEN

Zunächst ist es notwendig, Gebiete mit Potenzialen für die Optimierung bzw. Resilienzstärkung sowie mit potenziellen Vulnerabilitäten des Versorgungssystems zu identifizieren. Diese Gebiete eignen sich für die folgende Modellentwicklung, welche das Vorhandensein (oder auch Abhandensein) und die Diversität relevanter Systembestandteile (z.B. Wasserspeicher und Gebietseigenschaften) sowie deren Verbindungen zusammenbringt. Die Eignungskriterien für eine Modellentwicklung werden im Vorfeld festgelegt. Zur Identifikation und Abgrenzung geeigneter Gebiete wird eine Mapping-Methode entwickelt, die verschiedene geographisch verortete Bestandteile und Eigenschaften des hydrologischen, hydrogeologischen, Wasserversorgungs-, Wärmeversorgungs- und Energieversorgungssystems (im Folgenden Sektoren genannt) klassifiziert, gewichtet und mathematisch kombiniert. Das Ergebnis wird anschließend kartographisch dargestellt. Über diese Methode lassen sich im ersten Schritt die am besten geeigneten Gebiete zur Modellentwicklung der einzelnen Sektoren identifizieren. Im zweiten Schritt wird durch eine mathematische Kombination und Verschneidung der Mappings der einzelnen Sektoren die Identifikation eines Fokusgebiets möglich, welches ganzheitlich für die Entwicklung und Evaluierung eines sektorenverknüpfenden Modells geeignet ist. Dieses Modell wird im Folgenden Gesamtmodell genannt. Im dritten Schritt ermöglicht diese Mapping-Methode die Identifizierung und Vorauswahl von Gebieten, in denen die Resilienz der Wasserversorgung potenziell gesteigert werden kann. Dies erfolgt mithilfe des zweiten entwickelten Werkzeugs: dem Gesamtmodell.

Die Modellierung des Wasserkreislaufs und Versorgungssystems soll zunächst in Sektoren unterteilt vorgenommen werden und wird von den Projektpartnern unabhängig voneinander entwickelt. Die Sektorenmodelle nutzen dabei teilweise bestehende Modell-Frameworks wie beispielsweise Raven (Craig, et al., 2020) für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung oder auch selbst in Python programmierte Algorithmen und Modellstrukturen. Da die einzelnen Sektoren anschließend in einem Gesamtmodell gekoppelt werden, sind die Verbindungsstellen zwischen den Sektoren abzustimmen.

Die Sektorenmodelle werden für folgende Sektoren entwickelt:

- Grundwasserspeicher: TU Bergakademie Freiberg – Hydrogeologie,

- Thermisch genutzte Wasserspeicher: TU Bergakademie Freiberg – Technische Thermodynamik,
- Bodenwasserhaushalt (BWHH) inkl. Fließgewässerabfluss: Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V.,
- Oberflächenwasserspeicher: GICON Resources GmbH,
- Wasserversorgung: GICON Resources GmbH,
- Energieinfrastruktur: DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH.

Das angestrebte Gesamtmodell soll als Prognose- und Managementmodell sowohl die langfristige Entwicklung der Fokusgebiete als auch akute Ereignisszenarien beschreiben und auf andere Regionen übertragbar sein. Im Ergebnis sollen klimatische und planungsbezogene Risiken für die Resilienz von Wasserversorgungssystemen erörtert und Handlungsempfehlungen bzw. Empfehlungen für einen Kriterienkatalog zur Maßnahmenumsetzung abgeleitet werden.

4 ERGEBNISSE

Die Region des Landkreises Mittelsachsen wird zunächst in einem derartigen Mapping hydrologisch, hydrogeologisch und mit Hinblick auf die Wasser- sowie Energieversorgung untersucht. In Abb. 1 wird eine Auswahl erster Zwischenergebnisse des Mappings einzelner Themenbereiche und Sektoren beispielhaft dargestellt: die spezifischen Trinkwasserbedarfe für den Status Quo und das Jahr 2040 (Prognose) und das Speichervolumen vorhandener Oberflächenwasserspeicher und technischen Speicher (Zisternen, Hochbehälter o.ä.).

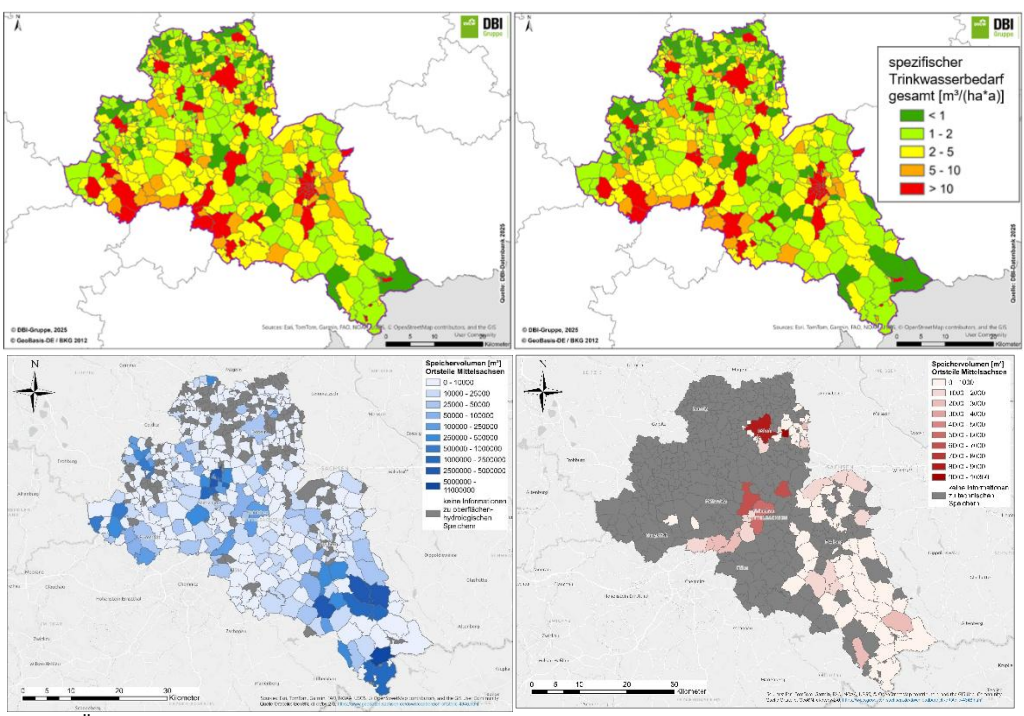


Abb. 1: Übersicht von Zwischenergebnissen des Mappings der gesamten spezifischen Trinkwasserbedarfe (oben links als Status Quo und rechts als die Prognose für das Jahr 2040), der Oberflächenwasserspeicher (unten links) und der technischen Speicher (unten rechts) im Landkreis Mittelsachsen. (DBI-Gruppe, 2025; Wasserzweckverband Freiberg, 2026; LfULG, 2026; OpenStreetMap, 2026; Landesvermessung Sachsen, 2026; Kommunen Mittelsachsen, 2025)

Die Wasserbedarfe werden anhand von Kennwerten je Haushalt bzw. Branche recherchiert und mittels Geoinformationssystem (GIS) zu den jeweiligen von DBI erhobenen Gebäudedaten im Untersuchungsgebiet Mittelsachsen zugeordnet. Die Bedarfe wurden auf Ortsteilebene aufsummiert und anhand der vorliegenden Ortsteilfläche zu spezifischen Wasserbedarfen umgerechnet. Für die Wasserbedarfsprognose bis 2040 wird von einem konstanten Wasserbedarf der Industrie ausgegangen, Veränderungen ergeben sich durch den demographischen Wandel. Hohe spezifische Trinkwasserbedarfe signalisieren ein hohes Gebietspotenzial bzw. die Notwendigkeit, mit dem Gesamtmodell neue Resilienzansätze für die Wasserversorgung zu testen.

Im Mapping der Oberflächenwasserspeicher sollen die Gebietspotenziale im Landkreis Mittelsachsen auf Basis von Attributen wie den Speichervolumina von Standgewässern, deren Anschlussgrad ans Gewässer- und Versorgungsnetz und die Wasserqualität bewertet werden. In Abb. 1 wird außerdem das Teil-Mapping für die Speichervolumina von natürlichen und künstlichen Standgewässern (z. B. Seen und Talsperren) sowie technischen Speicher (z. B. Zisternen und Hochbehälter) dargestellt, welches auf Ortsteilebene aggregiert wurde. Durch diese Aggregation soll eine Vergleichbarkeit von Gebieten hergestellt werden. Ein besonders hohes Potenzial wird den Gebieten mit Nähe zu oder Anschluss an die Teiche und Talsperren der sogenannten Revierwasserlaufanstalt im Wasserversorgungsgebiet um Freiberg und des Talsperren Verbundsystems zugeordnet, da diese Standgewässer bereits bewirtschaftet werden, über einen hohen Anschlussgrad verfügen und große Speichervolumina aufweisen.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Im Forschungsprojekt SpeicherLand werden Werkzeuge zur Bewertung mehrerer Resilienz-Typen (Klimawandel, Energieversorgung, Störungen) der Wasserversorgung und von Maßnahmen zur Stärkung dieser Resilienzen entwickelt. Die Werkzeuge basieren auf Mappings von Entwicklungspotenzialen und auf einem Prognose- und Managementmodell, welches die Sektorenmodelle bzw. Teilaspekte Grundwasserspeicher, Oberflächenwasserspeicher, thermisch genutzte Wasserspeicher, Bodenwasserhaushalt und die Wasserversorgung miteinander koppelt. Zum aktuellen Zeitpunkt wird die Implementierung der Mapping-Algorithmen und die Modellkonzeption bzw. -entwicklung durchgeführt.

LITERATURVERZEICHNIS

Craig, J. R., Brown, G., Chlumsky, R., Jenkinson, R. W., Jost, G., Lee, K., . . . Tolson, B. A. (2020). Flexible watershed simulation with the Raven hydrological modelling framework. *Environmental Modelling & Software*, 104728.

DBI-Gruppe, G. u. (2025). DBI-Datenbank.

Kommunen Mittelsachsen. (2025). Datenabfrage Zisternen in Mittelsachsen [persönliche Kommunikation].

Landesvermessung Sachsen. (2026). *GeoSN, dl-de/by-2-0*. Retrieved from https://www.geodaten.sachsen.de/downloadbereich-ortsteile-4346.html

Landkreis Mittelsachsen. (2026). *Landkreis Mittelsachsen - Der Kreis.* Retrieved from https://www.landkreis-mittelsachsen.de/der-kreis.html

LfULG, L. f. (2026). *Gewässernetz (Fließgewässer und Standgewässer)*. Retrieved from https://luis.sachsen.de/wasser/gewaessernetz.html

OpenStreetMap, c. (2026). OpenStreetMap database. https://qgis.org.

Wasserverband Döbeln-Oschatz. (2026). *Wasserverband Döbeln-Oschatz - Wasser aus der Region für die Region*. Retrieved from https://www.wasserverband-doebeln-oschatz.de/trinkwasser/trinkwasserherkunft/

Wasserzweckverband Freiberg. (2026). Geodatenabfrage Wasserversorgungsnetz des WZV Freiberg.

Preventing Resource Loss Through Digital Innovations

Susanne Roßkogler[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing and Waste Management, Leoben, Austria

ABSTRACT: Across the corporate sector, considerable efforts are being made to minimize resource losses throughout production processes. This principle applies not only to energy losses but also to losses of raw and auxiliary materials. Beyond the associated economic benefits, such measures also contribute to achieving environmental objectives. This is particularly important because industry accounts for approximately 20% of emissions in the European Union. Numerous strategy papers at both European and Austrian levels have called for an industrial transformation. For example, the Clean Industrial Deal conceptualizes increased energy efficiency as a pathway to enhanced competitiveness. Similarly, Austria's industrial strategy identifies the implementation of digital technologies as a key driver for improving the efficiency of industrial processes. In addition to cost savings and reduced emissions, greater resource efficiency provides clear added value by strengthening the resilience of manufacturing facilities.
This paper provides a comprehensive assessment of the potential environmental implications of a digital sustainability platform conceptualized within the ZERO3 project. The project developed a Sustainability Monitoring Platform (SMP) that analyzes value streams, identifies potentials and bottlenecks, and recommends basic technologies for improvement from a curated compendium. In this paper, the authors present one possible impact pathway in the energy sector.

1 INTRODUCTION AND BACKGROUND

According to the European Commission (EC), the European industrial sector was responsible for approximately 20% of the continent's total emissions in 2025. At the same time, industry remains an essential driver of prosperity, providing employment for around 33 million people and contributing approximately 20% to Europe's overall economy (Eurostat, 2025).

Against this backdrop, deindustrialization has become a major topic of debate across the continent (Der Standard, 2025). The Draghi Report analyzes the current state of European industry, with particular emphasis on competitiveness, and proposes a set of measures intended to strengthen it.

Draghi emphasizes Europe's position as a global leader in sustainability, environmental standards, and the advancement of the circular economy.

The European Union's pursuit of ambitious climate objectives can therefore be understood as a strategic advantage. In this context, Draghi identifies resource efficiency as a pivotal element of industrial transformation. His report highlights the importance of the circular economy in reducing dependence on critical raw materials. Moreover, he points to the role of artificial intelligence in advancing resource conservation and acknowledges the progress achieved in this area in the United States (Draghi, 2024a, 2024b).

2 ZERO3

Enhanced sustainability in industrial facilities can be achieved through a range of approaches, including the implementation of Zero Defect Manufacturing (ZDM) measures. The ZERO3 flagship project forms an integral part of this initiative. Its primary objective is to develop an artificial intelligence (AI)-supported Sustainability Monitoring Platform (SMP). The initiative addresses the three ZEROs: resource loss, the underutilization of human potential, and data gaps.

In addition to academic partners, the project involves industry partners from a variety of sectors. The SMP is designed to analyze production data streams in order to identify areas of potential improvement as well as existing bottlenecks. Based on this analysis and supported by a dedicated algorithm within a multi-objective optimization framework, the system recommends improvement measures related to one of the three ZEROs. Users may also manually select the specific ZERO for which they intend to achieve improvements.

The SMP draws on a curated compendium of core technologies and recommends suitable approaches for addressing the selected bottleneck or area of potential. Users can then simulate and document the expected effects. In addition, a Sustainability Self-Assessment is available and may serve as supplementary input for the AI-based recommender system (PROFACTOR, n.d.).

3 CASE STUDY: THERMOGRAPHIC DEFECT DETECTION IN CFRP

To assess the effectiveness of the core technologies and, by extension, the SMP, a range of technologies was evaluated in collaboration with various use-case partners. The evaluation comprised a comprehensive analysis of each technology's impact on one or more of the three ZEROs.

The scope of this paper does not allow for the presentation of all use-case results. Therefore, this section focuses on the core technology of thermographic image recognition for the detection of foreign object debris (FOD) in carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) components. CFRP components are indispensable in the automotive, energy, and aviation sectors. However, their production is both energy- and raw-material-intensive, which makes defects particularly costly. To address this challenge, a thermographic defect-detection method was evaluated for detecting inclusions of different materials within the prepreg layers used in CFRP manufacturing.

Subsequently, based on previous project examples from the use case, the impact of the core technology, which had been tested in an industry-relevant environment, on real-world processes was assessed using life cycle assessment (LCA) methodology. One kilogram of CFRP material was defined as a functional unit (FU). The calculation included both the Prepreg raw materials and the energy-related costs associated with storing the Prepreg at -15 to -18 degrees Celsius and the energy used in the autoclave process. In accordance with the IPCC, GWP 100 was selected as the impact category. Data on material inputs in the raw materials cannot be found in any environmental databases or calculations from the automotive or aviation industries, and calculations that have already been performed are generally not made publicly available. Therefore, our own modeling was carried out primarily using literature on the raw materials, which enabled the calculations. As an example, Figure 1 illustrates the potential impact of one of the basic technologies evaluated within the project.

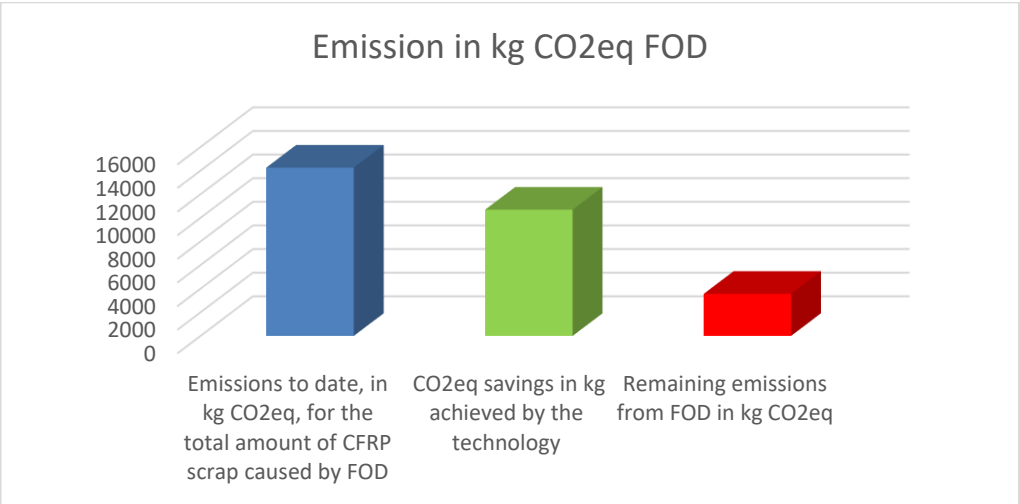


Fig. 1 Emissions CFRP FOD

The results illustrate the impact of emissions, which stem primarily from prepreg feedstocks and energy consumption, on the use of these basic- technologies.

4 DISCUSSION AND CONCLUSION

The SMP enables the knowledge and project outcomes generated during the ZERO3 optimization process and based on the underlying basic technologies to be shared or documented for internal use, depending on the user's requirements. The benefits of the technology described in this paper, namely, the SMP and its underlying technologies, must be assessed in conjunction with further analyses of the environmental implications of AI and, in this specific case, of the respective highly specialized underlying technologies. Recent analyses indicate that the training of large AI models requires substantial amounts of energy. For example, training GPT-4 reportedly consumed 50–70 GWh of electricity over a 100-day period (Aczel et al., 2026). By comparison, Austria, including its energy-intensive industries, consumed on average approximately 18,000 GWh during the same period (Austrian Power Grid, n.d.). Although this may appear modest in relative terms, it is important to note that this figure refers to a single model and that the energy sources used are often not fully decarbonized. Consequently, the associated environmental impact remains considerable.

At the level of individual tasks or prompts, the energy consumption of ChatGPT and comparable models has been estimated at approximately 0.42 Wh, while image generation requires between 2.9 and 6 Wh. In addition to energy consumption, material demand must also be considered, particularly with regard to the extraction and procurement of raw materials such as lithium, cobalt, and rare earth elements. This also includes the generation of electronic waste, which requires treatment within an appropriate recycling system.

Land use must likewise be taken into account, as the training of ChatGPT required approximately 0.9 m³ of land. Furthermore, the substantial amount of water needed to cool AI data centers must be considered. For the model examined, this corresponds to approximately 600 million liters of water (Aczel et al., 2026). Given the variability in application frequency and the lack of a real-world context involving multiple users, assessing these impacts with precision remains highly challenging. Nevertheless, they should be systematically incorporated into future analyses.

In view of the considerable potential of AI and the broad range of possible applications, future assessments should also incorporate social, labor-market-related, and employee-centered indicators.

5 DATA AVAILABILITY

Data will be made available on request.

6 ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Austrian Research Promotion Agency (FFG) under Grant FO999896399.

REFERENCES

Aczel, M., Chmanara, S., Matin, M., Farsi, A., Marwala, T., & Madani, K. (2026). *Environmental Cost of AI's Energy Use: Carbon, Water and Land Footprints*. United Nations University Institute for Water, Environment and Health (UNU-INWEH). https://doi.org/10.53328/INR26RMA002

Austrian Power Grid AG. (o. D.). *APG Powermonitor*. Abgerufen am 28. Juli 2026 von https://www.apg.at/powermonitor/

Europäisches Parlament. (2025, 3. März). *Treibhausgasemissionen nach Ländern und Sektoren (Infografik)*. https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20180301STO98928/treibhausgasemissionen-nach-landern-und-sektoren-infografik

Eurostat. (2025, Dezember). *Businesses in the manufacturing sector*. Statistics Explained. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Businesses_in_the_manufacturing_sector

Der Standard. (2025, 20. August). *Lage der Industrie kritisch: Deutschland steuert auf Stillstand zu*. https://www.derstandard.at/story/3000000333031/lage-der-industrie-kritisch-deutschland-steuert-auf-stillstand-zu

Draghi, M. (2024, 9. September). *The future of European competitiveness: A competitiveness strategy for Europe (Part A)*. Europäische Kommission. https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/draghi-report_en

Draghi, M. (2024, 9. September). *The future of European competitiveness: In-depth analysis and recommendations (Part B)*. Europäische Kommission. https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/draghi-report_en

Gai, B., Scheder, N., Roßkogler, S., Himmelbauer, J., & Schlund, S. (2025). KI-gestützte, datengetriebene Plattform für KI, Robotik und Mensch im nachhaltigen Produktionssystem: Humanzentriertes Zero Defect Manufacturing der Zukunft. *WT Werkstattstechnik*, 115(9), 638–644. https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-09-

Profactor GmbH. (O.D.). Zero3: Digitalising Manufacturing to Zero Waste. Abgerufen am 28. Juli 2026 von https://www.zero3.at/

CONTACT

Susanne Roßkogler MSc.MSc.
s.rosskogler@stud.unileoben.ac.at
+436644370477

Die neue Mehrweg-Weinflasche in Österreich

Christian Pladerer[1] & Philipp Haderer[1]
[1)] Österreichisches Ökologie-Institut, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Klimaschutz und Ressourcenschonung gehören zu den zentralen Herausforderungen der kommenden Jahre, wobei die Kreislaufwirtschaft mit Re-Use- und Mehrwegsystemen als wichtiger Baustein einer nachhaltigen Wirtschaftsweise gilt und zunehmend auch bei Konsument:innen Akzeptanz findet. In der Weinbranche bietet die Kreislaufführung der 0,75-Liter-Bouteille großes Potenzial zur Reduktion von Abfall und CO_2-Emissionen. Seit 2023 arbeitet ein interdisziplinäres Projektteam aus Wein-, Verpackungs-, Logistik- und Nachhaltigkeitsexpert:innen an der Entwicklung eines standardisierten Mehrwegsystems mit dem Ziel, ein ganzheitliches System aufzubauen. Entwickelt wurden zwei robuste 0,75-Liter-Varianten in den Formen Rheinwein und Bordeaux, die für mindestens zwölf Umläufe ausgelegt sind. Ergänzt wird das System durch eine neutrale, wiederverwendbare 6er-Kunststoffkiste sowie ein erstmals in Österreich eingesetztes Pool-Management-System als zentrale Innovation. In Österreich fallen jährlich rund 118 Millionen Einweg-Glasflaschen im 0,75-Liter-Segment an. Bereits bei einer Mehrwegquote von 20 Prozent könnten rund 9,7 Millionen Kilogramm Glasabfall vermieden und das Problem des Litterings reduziert werden.

1 HINTERGRUND

Klimaschutz und Ressourcenschonung werden in den nächsten Jahren die entscheidenden globalen Themen sein. Dabei spielt die Kreislaufwirtschaft eine zentrale Rolle. Re-Use und Mehrweg sind die Schlüsselfaktoren für eine nachhaltige und zukunftsfähige Wirtschaftsweise und werden von Konsument:innen auch sehr gut angenommen. Auch in der Weinbranche können durch die Kreislaufführung der 0,75-Liter-Flasche (“Bouteille”) enorme Mengen an Abfällen und an CO_2 eingespart werden. Derzeit fallen in Österreich durch den Konsum inländischer Weine in 0,75-Liter-Gebinde rd. 118 Mio. Einweg-Glasflaschen an (Österreich Wein Marketing GmbH, 2022). Im Unterschied zum Recycling ermöglicht ein Mehrwegsystem die Kreislaufführung des Gebindes, wodurch bei einer Mehrwegquote von 20 % rund 9,7 Mio. kg Glas-Abfälle vermieden werden könnten. Ebenso wie andere Einweggebinde tragen auch Einweg-Glasflaschen zum Problem des zunehmenden Littering bei. Die Reduktion von Einweg-Glasflaschen ist daher auch ein gewisser Beitrag zur Bekämpfung dieses Problems. Wie eine Studie des Umweltbundesamt und des Bundesamts für Wein- & Obstbau zeigte, macht bei einem durchschnittlichen Weingut die Verpackung – in Form von Einwegglas – fast die Hälfte des CO_2-Fussabdrucks des gesamten Betriebes aus (Pölz & Rosner, 2023). In Abbildung 1 wird die Verteilung der CO_2-Emissionen nach Verursacher in einem österreichischen Beispiel-Betrieb. Werden nur wie angenommen 20 % der Einweg-Flaschen durch Mehrweg ersetzt, könnten jährlich in Österreich rund 12,3 Mio. kg CO_2-Emissionen eingespart werden.

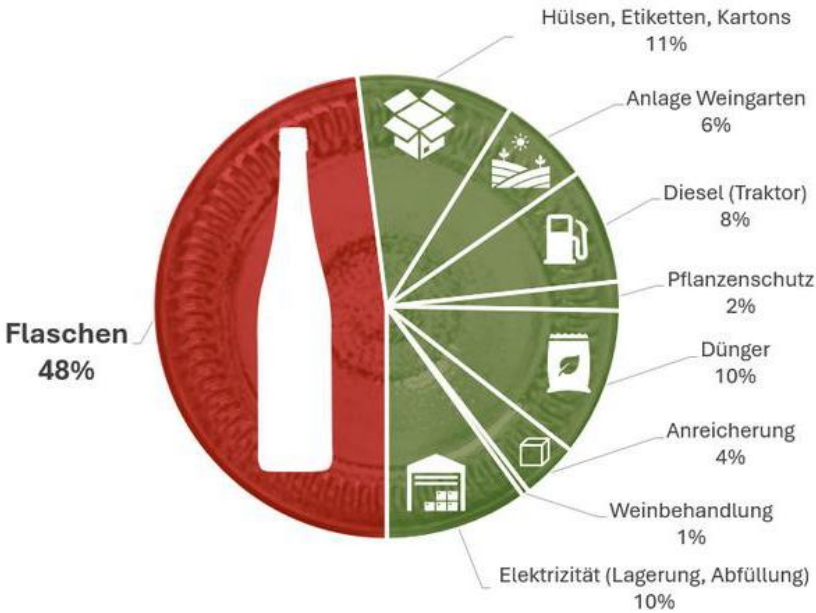


Abb. 1: CO_2-Emmissionen in einem österreichischen Beispiel-Betrieb, eigene Darstellung nach (Pölz & Rosner 2023)

2 DAS PROJEKT „MEHRWEG-BOUTEILLE“

Das Ziel des Forschungsprojekts ist es, einen österreichweiten, offenen (herstellerunabhängigen) Mehrweg-Pool für 0,75-Liter-Weinflaschen inklusive Transportverpackung (Kiste) vorzubereiten und umzusetzen. Das Projekt wurde von Juni 2023 bis Juni 2026 durch die Abfallvermeidungsförderung der österreichischen Sammel- und Verwertungssysteme finanziert. Unter der Leitung des Österreichischen Ökologie-Instituts arbeiteten Winzer:innen, Flaschenwäscher, Händler und Logistikexperten in vier Arbeitsgruppen zusammen: Flasche & Verpackung, Logistik & Spülen, Vertrieb & Marketing sowie Investitions- und Pool-Management.

Durch die Zusammenarbeit verschiedener Stakeholder konnten in dem Projekt zwei robuste 0,75-Liter-Mehrwegflaschen in olivgrün – in den gängigen Formen Rheinwein und Bordeaux – entwickelt werden. Die Flaschen sind für mindestens zwölf Umläufe ausgelegt, maschinentauglich und mit dem in Österreich üblichen BVS-30/60-Drehverschluss kompatibel. Eine leicht erhöhte Flaschenhöhe erleichtert die Rücknahme über Automaten.

Mit der Markteinführung 2026 geht die Projektverantwortung an die neu gegründete ARGE Österreichischer Mehrweg-Weinflaschen-Pool (ARGE ÖWMP) über, die als Trägerorganisation das System langfristig führt. Mittelfristig ist geplant, eine Genossenschaft als dauerhafter Pool-Träger zu etablieren.

3 KREISLAUF STATT EINMALVERWENDUNG

Das österreichische Mehrwegsystem für Weinflaschen basiert auf bewährten Prinzipien der Kreislaufwirtschaft: Eine standardisierte Flasche wird vom Winzer befüllt, gelangt über Handel oder Direktvertrieb zum Konsumenten und kehrt via Pfandsystem zum Spülzentrum zurück – bereit für den nächsten Umlauf.

Die Besonderheit des neuen Pools: Auch die Kiste ist standardisiert und nicht individuell gebrandet und erleichtert so die Verwendung im Lebensmitteleinzelhandel: Die Kiste muss nur einmal für alle nationalen Leergutautomaten programmiert werden und kann für das Sammeln aller Mehrweg-Weinflaschen (egal von welcher Winzerin) verwendet werden. Das System wird damit auch für kleinere und mittlere Betriebe interessant.

Die Trägerschaft liegt bei der ARGE Österreichischer Mehrweg-Weinflaschen-Pool (ARGE ÖWMP), der alle teilnehmenden Winzer:innen angehören. Das operative Pool-Management übernimmt Logicycle GmbH (Tochter der Genossenschaft Deutscher Brunnen), die über jahrzehntelange Erfahrung im weltweit größten Mehrwegmarkt verfügt. Die Abfallvermeidungs-Förderung der Sammel- und Verwertungssysteme für Verpackungen hat die Planung großzügig unterstützt und die ersten 24 Monate der Pool-Lizenzgebühren finanziert - sodass zum Start die Nutzung für die Winzer:innen kostenfrei ist.

3.1 Die Mehrweg-Bouteille: Mehr als nur eine Flasche

Im Rahmen des Projekts wurden zwei olivgrüne 0,75-Liter-Mehrwegflaschen entwickelt – in den gängigen Rheinwein- und Bordeaux-Formen. Eine Burgunderflasche ist derzeit nicht geplant, da der Absatz in diesem Segment aktuell noch zu gering ist. In folgender Tabelle werden die Besonderheiten der Mehrwegflasche beschrieben. Abbildung 2 zeigt die konzipierten Mehrweg-Weinflaschen.

Tab. 1: Besonderheiten der Mehrweg-Bouteille

• **Warum olivgrün?**
Olivgrün ist nicht nur die am weitesten verbreitete Flaschenfarbe im Weinbau, sondern auch besonders unempfindlich gegenüber Verfärbungen, die beim wiederholten Waschen entstehen können. Eine weiße Flasche für Roséweine ist aktuell nicht vorgesehen – der zusätzliche Sortieraufwand wäre bei der derzeitigen Marktlage nicht wirtschaftlich.
• **Robust, langlebig und für Leergutautomaten geeignet**
Die Mehrwegflaschen sind bewusst etwas schwerer als Einwegflaschen. Grund dafür ist die stabile Ausführung: Wandung und Mündung sind verstärkt, um mindestens 12 Umläufe zu ermöglichen. Durch die leicht erhöhte Flaschenhöhe wird zudem die Erkennung in Leergutautomaten verbessert – ein wichtiger Vorteil für Rücknahmestellen.
• **Kompatibel mit vorhandener Fülltechnik**
Die Flaschen sind auf den in Österreich üblichen BVS 30/60-Drehverschluss (Stelvin) ausgelegt. Das bedeutet: Es sind keine technischen Umstellungen bei der Abfüllung nötig.
• **Leicht erkennbar – für Konsument:innen und Logistik**
Das offizielle Mehrweg-Logo der Wirtschaftskammer Österreich ist vierfach auf der Flaschenschulter eingeprägt – gut sichtbar, auch ohne zusätzliche Richtkerben für Etiketten. Die Platzierung im Sichtfeld ist nicht nur technisch durch erweiterte Etikettenflächen sinnvoll, sondern auch ein bewusster Marketing-Schritt zur Stärkung der Wiedererkennung.
• **Etikettenschutz und Reiberinge**
Die Flaschen verfügen über einen sogenannten Etikettenschutz: Auswölbungen ober- und unterhalb der Etikettenfläche verhindern, dass Etiketten beim Transport oder auf Förderbändern beschädigt werden. Gleichzeitig reduziert diese Formgebung die Reibung, sodass sich lediglich zwei schmale Reiberinge bilden – statt großflächiger Kratzer.
• **Kaltendvergütung – Standard im Mehrweg**
Zum Schutz der Oberfläche wird bei der Herstellung von Glasflaschen standardmäßig eine Polyethylen-Dispersion aufgetragen. Diese sorgt für bessere Gleiteigenschaften auf dem Fließband und ist für die reibungslose maschinelle Verarbeitung bei Abfüllung und Wäsche unerlässlich.



Abb. 2: Mehrweg-Bouteille in den 3 verschiedenen Ausführungen: Bordeaux 1 Liter, Rheinwein 0,75 Liter, Bordeaux 0,75 Liter

Für den sicheren Transport wurde eine neutrale 6er-Kunststoffkiste entwickelt, die Flaschen optimal schützt – im Gegensatz zu herkömmlichen Kartons oder Gitterboxen, die für die Rückführung im Mehrwegsystem ungeeignet sind. Mit Karton-Einschüben können sie auch für ein temporäres Branding oder Werbung genutzt werden. Die Kisten sind für mindestens 50 Umläufe konzipiert, bestehen überwiegend aus Rezyklat und sind vollständig recyclingfähig. Damit tragen sie wesentlich zur Ressourcenschonung und zur Kreislaufwirtschaft im Weinbau bei.

3.2 Ein robustes System für viele Umläufe

Die neue Mehrweg-Weinflasche wurde für mindestens 12 Umläufe entwickelt. In der Praxis bedeutet das: Bei einer typischen Nutzung von einer Befüllung pro Saison hält die Flasche über ein Jahrzehnt. Winzer:innen mit mehreren Fülltermine pro Jahr und einem schnellen Rücklauf des Leerguts können sogar zwei bis drei Umläufe pro Jahr erreichen.

Pool-Flaschen und -Kisten können entweder direkt bei den Hersteller:innen oder über lizenzierte Händler:innen mit einer sogenannten ‚Ermächtigung' bezogen werden. Diese bestätigt der Verkaufsstelle, dass die Käufer:in einen Lizenzvertrag mit dem Pool abgeschlossen hat und die darin festgelegten Mengen bezieht. Diese Ermächtigung erhalten die Winzer:innen direkt vom Pool-Koordinator.

Flaschen und Kunststoffkisten werden zunächst separat bezogen und erst nach dem Abfüllen miteinander kombiniert. Von diesem Zeitpunkt an verbleiben die Flaschen während aller weiteren Prozessschritte durchgehend in der Kiste – vom Versand bis zur Rückgabe des Leerguts.

Die Auslieferung der gefüllten Weinflaschen erfolgt auf gewohntem Weg, entweder direkt oder über den Handel an die Gastronomie oder die Endkonsument:innen. Nach dem Konsum werden die leeren Flaschen über dieselben Vertriebskanäle zurückgeführt – ähnlich wie bei Mineralwasser oder Saftflaschen. Ein wesentlicher Unterschied: Im Weinbereich übernehmen die Retourlogistik größtenteils die Spülbetriebe. Das Pfand orientiert sich an den tatsächlichen Anschaffungskosten neuer Gebinde und soll sicherstellen, dass Konsument:innen die Gebinde retournieren bzw. wenn sie es nicht tun, der wirtschaftliche Verlust der Winzer:innen begrenzt ist.

In den Spülzentren werden Flaschen und Kisten gereinigt und als Einheit wieder bereitgestellt. Viele dieser Betriebe verfügen zusätzlich über Abfüllanlagen und können den angelieferten Wein aus Winzertanks direkt wieder in die gereinigten Flaschen abfüllen und etikettieren – ein effizienter Kreislauf mit minimalem logistischem Aufwand für die Winzer:innen.

Das Mehrwegsystem der neuen Mehrwegflasche funktioniert als Pool-System: Weinbaubetriebe in ganz Österreich verwenden dabei einheitliche, neutrale Flaschen und Kisten. Da die Betriebe diese selbst anschaffen, sind die Winzer:innen auch Eigentümer:innen des gemeinsamen Mehrwegpools. Ein Pool-Koordinator übernimmt als neutraler Treuhänder die organisatorische Leitung des Systems. Seine Aufgabe ist es, einen reibungslosen Ablauf sicherzustellen – insbesondere, dass Flaschen und Kisten in ausreichender Qualität und Menge verfügbar sind. Zudem sorgt er dafür, dass sich alle teilnehmenden Betriebe anteilig an den Kosten für Schwund sowie für die Neuanschaffung von Gebinden beteiligen.

Tab. 2: Aktueller Status und Ausblick (Stand: Juni 2026)

Was bisher geschah
• Logistik & Pool-Management definiert: Im März wurden gemeinsam mit Flaschenwäschern, Wein-Logistik Parndorf und der GDB die Retourlogistik sowie die Regeln für das Pool-Management festgelegt.
• ARGE gegründet: Die „ARGE Österreichischer Mehrweg-Weinflaschen-Pool“ ist offiziell gegründet und übernimmt die strategische und operative Steuerung des Systems gegenüber der GDB.
• Erste Produktion gestartet: Im April wurden bei Vetropack in Pöchlarn die ersten 366.000 Mehrweg-Weinflaschen produziert und bereits teilweise über RWA und Müller Glas an erste Winzer:innen ausgeliefert (u. a. Mehofer, Hager, Jungmayr, Schauhuber, Lexer).
• Green-Event-Einsatz gestartet: Ein geplanter Einsatz beim Eurovision Song Contest 2026 konnte zeitlich nicht umgesetzt werden; stattdessen erfolgt die Präsentation beim Speak-Out-Festival des Kurier am 9. Juni in Wien als Green Event.
Ausblick
• Neue Gastro-Kiste kommt: Ab Ende Juli soll eine neue Kombi-Kiste für alle drei Flaschentypen verfügbar sein.
• Großhandel startet Listung: Nach Verfügbarkeit der neuen Kiste beginnt die Listung im Großhandel, mit Biogast als erstem Bio-Großhändler.
• Projektübergabe: Das geförderte Einführungsprojekt endet Ende Juni; die ARGE übernimmt anschließend die Steuerung des Mehrwegsystems.
• Langfristige Struktur geplant: Mittelfristig soll eine Genossenschaft die ARGE als Pool-Trägerin ablösen; die Vorarbeiten laufen bereits.
• Gemeinsame Sichtbarkeit: Statt großem Marketingbudget wird auf Social Media und ein vernetztes Auftreten der Betriebe gesetzt – Beiträge aus dem Netzwerk sind ausdrücklich erwünscht.
• Produktentwicklung läuft weiter: Eine 1-Liter-Bordeaux-Mehrwegflasche befindet sich in Vorbereitung durch den Projektpartner Gernot Moser in Gols.

4 EIN GEWINN FÜR UMWELT, WEINBAU UND KONSUMENT:INNEN

Die Mehrweg-Bouteille zählt zu den nachhaltigsten Verpackungslösungen für Wein und bietet entlang der gesamten Wertschöpfungskette Vorteile für Konsument:innen, Winzer:innen, Handel sowie Gastronomie und Hotellerie. Durch die Wiederverwendung der Flaschen entfällt das energieintensive Einschmelzen von Altglas, wodurch bei jedem Umlauf Energie und CO_2 eingespart werden. Gleichzeitig bleibt Glas als hochwertiger Werkstoff erhalten und schützt die Qualität sowie den Geschmack des Weins optimal.

Für Winzer:innen schafft die Mehrweg-Bouteille einen zentralen Hebel zur Emissionsreduktion, insbesondere im regionalen Vertrieb, und stärkt zugleich die Nachhaltigkeitskommunikation. Die standardisierte 0,75-Liter-Mehrweg-Bouteille mit BVS30/60-Verschluss ist robust konstruiert und für mindestens zwölf Umläufe ausgelegt. Durch einheitliche Flaschen und Kisten verbessern sich Planungssicherheit und Verfügbarkeit, während System- und Infrastrukturkosten – etwa bei Leergutautomaten – reduziert und teilweise geteilt werden. Zudem wirkt die Rückgabe des Leerguts als kontinuierliches, treueähnliches Kundenbindungssystem.

Auch Handel, Gastronomie und Hotellerie profitieren. Sie können ein klar nachhaltiges Angebot schaffen, ihre Sortimente und Weinkarten sichtbar in Richtung Nachhaltigkeit ausrichten und neue Zielgruppen erschließen. Besonders im Bereich Green Events eröffnet das Mehrwegsystem neue Marktchancen als zertifizierbare, konforme Verpackungslösung. Gleichzeitig reduziert sich der Aufwand in der Entsorgung, insbesondere durch geringere Kartonabfälle und vereinfachte Prozesse ohne zusätzliche Glascontainerlogistik.

Mit der Einführung eines standardisierten Mehrwegsystems wird erstmals ein gemeinsames Pool-System für 0,75-Liter-Weinflaschen ermöglicht, das Effizienz, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit entlang der gesamten Lieferkette verbindet.

PROJEKTPARTNER

HBLA und Bundesamt Klosterneuburg Wein- und Obstbau
CIRCULAR ANALYTICS
BIOGAST
RWA
rethink refuse reduce Abfallvermeidungs-Förderung der Sammel- und Verwertungssysteme für Verpackungen
Mehrweg
Österreichisches Ökologie-Institut

LITERATURVERZEICHNIS

Österreich Wein Marketing GmbH. (2022). *Dokumentation Österreich Wein.* Abgerufen am 28. Juli 2024 von https://www.oesterreichwein.at/

Pölz, W., & Rosner, F. (2023). Calculation of the CO2 footprint using the example of Austrian wine. *Mitteilung Klosterneuburg, 73*, 152-167.

KONTAKT

DI Christian Pladerer
pladerer@ecology.at
+43 699 15 23 61 01
Projektleitung
Österreichisches Ökologie-Institut
www.ecology.at

Philipp Haderer
info@mehrwegweinflasche.at
+43 681 81 77 41 77
Koordination ARGE ÖWMP
Österreichische Ökologie-Institut
www.mehrwegweinflasche.at

Towards spectroscopic monitoring of antioxidant concentration in polypropylene granulates for circular plastic processing

Peter Bardenheuer[1], Alena Maria Spies[1] & Kathrin Greiff[1]
[1)] Chair of Anthropogenic Material Cycles (ANTS), RWTH Aachen University, Aachen, Germany

ABSTRACT: Reliable information on antioxidant content is essential for improving the quality and consistency of recycled polypropylene. This study investigates the capability of short-wave infrared (SWIR) hyperspectral imaging to detect different concentrations of an antioxidant blend in polypropylene granulates. Samples containing 0.1–7.5 wt.% antioxidant were analyzed using a hyperspectral camera operating in the 900–1730 nm range. Although the absorption features of polypropylene and the antioxidant largely overlap, a suitable spectral region of interest was identified. Combined with local baseline correction and normalization, this enabled concentration-dependent spectral differences to be clearly resolved. The processed spectra exhibited a strong correlation with antioxidant concentration. However, the weak spectral signatures and limited signal-to-noise ratio indicate that robust quantitative determination under realistic recycling conditions remains challenging. Nevertheless, the results demonstrate the potential of SWIR hyperspectral imaging as a rapid and non-destructive tool for antioxidant monitoring and quality control in plastics recycling.

1 INTRODUCTION

For recycled thermoplastics to be used in high-value compounds and semi-finished products, their processability and long-term performance must be predictable and aligned with the intended application (Hopmann, et al., 2021; Vilaplana & Karlsson, 2008). This requires reliable information on material composition, degradation state, and remaining stabilization (von Vacano et al., 2023). This is particularly relevant for polypropylene, where previous use, processing history, and additive formulation can strongly influence the performance of recycled materials (Mihelcic et.al., 2022). Post-consumer recycled (PCR) polypropylene can exhibit substantial variations in degradation state, additive history, and residual stabilizer content (Gall et. al., 2021). Antioxidants are particularly important because they influence processability, long-term stability, and the suitability of recycled materials for demanding applications (Pfaendner, 2022). However, the additive composition of recycling streams is often unknown, making reliable quality assessment and targeted restabilization challenging (Knoben et al., 2025). Conventional laboratory-based analytical methods can provide accurate information on additive content, but they are often time-consuming, destructive, or not suitable for inline process control (Knoben et al. 2025). For improved sorting and compounding based on quality monitoring, fast and non-destructive analytical approaches would therefore be beneficial.

Therefore, this study investigates whether spectroscopic methods are able to detect differences in antioxidant content in polypropylene design recyclates. Polypropylene granulates with defined antioxidant concentrations were used as a controlled model system representing different residual stabilizer levels commonly found in recycled polypropylene streams. In particular, the study aims to identify relevant spectral regions and assess the feasibility of quantitative modelling of the antioxidant concentration. The resulting knowledge may provide the basis for spectroscopic quality assessment of recyclates and support the targeted adjustment of restabilization strategies during subsequent compounding.

2 MATERIAL & METHODS

Polypropylene (SABIC® PP 579S) granulates with defined antioxidant concentrations were produced by compounding in a Coperion ZSK 26 MC twin-screw extruder (26 mm screw diameter), enabling efficient distributive and dispersive mixing of the polymer melt. The virgin polypropylene material is light-colored and translucent, providing favorable optical properties for short-wave infrared spectroscopic measurements. The antioxidant used was Irganox® B225, a 50/50 blend of Irganox® 1010 (CAS: 6683-19-8) and Irgafos® 168 (CAS: 31570-04-4). This formulation combines a primary phenolic antioxidant with a secondary phosphite stabilizer and is widely employed to improve the thermo-oxidative stability of polypropylene during processing and service life (BASF SE, n.d. 2022). The antioxidant blend was incorporated at concentrations of 0.1, 0.15, 0.25, 0.5, 1, 2.5, 5, and 7.5 wt.%.

For concentrations ≥ 2.5 wt.%, the antioxidant was continuously dosed into the extruder using a gravimetric screw feeder. Since the available feeders could not be operated reliably at the extremely low feed rates required for lower concentrations, these samples were prepared by premixing the antioxidant with the virgin granulate and feeding both components together. During feeding, a tendency of the antioxidant particles to segregate from the polypropylene granulates was visually observed, indicating that the actual antioxidant concentration may have deviated slightly from the nominal values. Samples with higher antioxidant concentrations were affected by slight deviations arising from the hygroscopic behavior of the antioxidant. Moisture uptake from ambient air promoted antioxidant adhesion to the feeding equipment surfaces, causing minor material losses. However, these effects were considered negligible with respect to the resulting concentrations.

The resulting granulates and the pure antioxidant were analysed using a BlackIndustry SWIR 1.7 Max (HAIP Solutions GmbH) hyperspectral camera covering the spectral range from 900 nm to 1730 nm with a spectral resolution of 2 nm. Measurements were performed on granulates transported on a black conveyor belt, representing a setup relevant for future inline process monitoring applications. The black conveyor belt provided a strong contrast to the light-colored polypropylene particles, allowing reliable segmentation of the granulates using simple thresholding.

To minimize the influence of mixed pixels at the particle boundaries, edge pixels were excluded by applying a morphological erosion operation, thereby shifting the segmentation boundaries inwards. After segmentation, the mean spectrum of each sample was calculated by averaging the spectra of all pixels belonging to the granulates.

For spectral processing, a region of interest (ROI) was selected to focus on wavelength regions expected to contain relevant information while reducing the influence of less informative and noisy spectral regions. To suppress the broad background contribution and emphasize local spectral variations, a local linear baseline correction was applied. For each spectrum, a linear baseline was constructed between two anchor regions centered at λ_L and λ_R.

The baseline anchor intensities were calculated as the mean intensity within ±3 nm around each anchor point. The local linear baseline was then calculated according to Equation 1.

$$b_i(\lambda) = x_i(\lambda_L) + \frac{x_i(\lambda_R) - x_i(\lambda_L)}{\lambda_R - \lambda_L}(\lambda - \lambda_L) \quad (1)$$

The baseline-corrected spectrum was subsequently calculated according to Equation 2.

$$x_{i,\mathrm{bc}}(\lambda) = x_i(\lambda) - b_i(\lambda) \quad (2)$$

where:

- $x_i(\lambda)$ is the original spectrum of sample i,
- $b_i(\lambda)$ is the local linear baseline,
- $x_{i,\mathrm{bc}}(\lambda)$ is the baseline-corrected spectrum.

Finally, the baseline-corrected spectra were normalized within the selected ROI to the range [-1, +1].

3 RESULTS

Figure 1 shows the resulting raw spectra for the different antioxidant concentrations together with the spectrum of the pure antioxidant. The comparison of these spectra allows a first assessment of whether concentration-dependent differences are detectable within the investigated SWIR range. In particular, it enables the identification of spectral regions in which the antioxidant exhibits characteristic absorption features and highlights the extent to which these features overlap with those of the polypropylene matrix (0 wt.%).

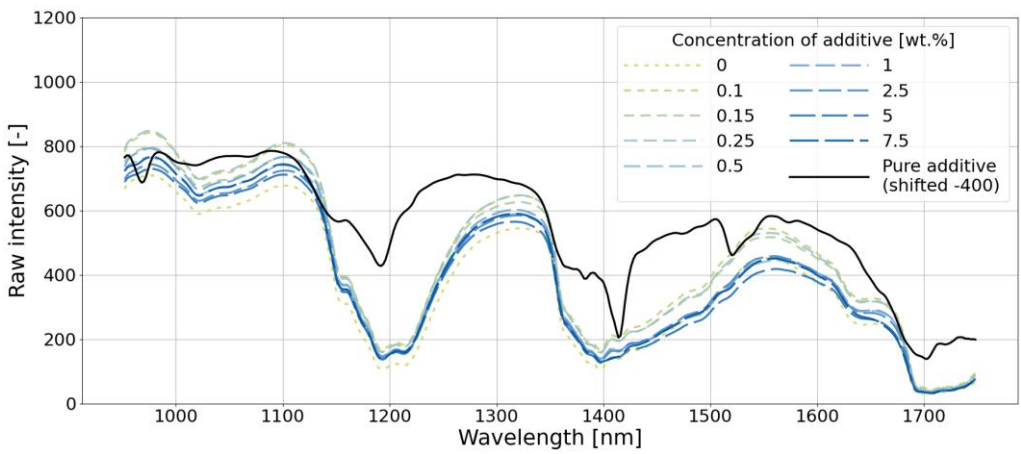


Fig. 1: Raw SWIR spectra of the polypropylene granulates and the pure antioxidant. The pure antioxidant showed substantially higher intensity and was therefore shifted by −700 intensity units for improved comparability.

It can be observed that the main absorption peaks of polypropylene and the antioxidant, located at approximately 1190 nm, 1420 nm, and 1700 nm within the SWIR range, largely overlap. This complicates an analysis of the antioxidant content. Furthermore, the spectra corresponding to the 0% and 0.1% concentration levels exhibit the greatest separation across almost the entire spectral range, despite representing adjacent concentration levels. Between these extrema, the spectra are stacked slightly according to increasing antioxidant concentration. It is important to note that the granulates with 0% antioxidant concentration were not recompounded and therefore differed in shape and surface properties from all other samples. These observations suggest that different concentration levels can be distinguished when antioxidant concentration is the only

varying parameter. However, the pronounced deviation of the 0% sample indicates that the spectral response is highly sensitive to additional influences.

Thus, a spectral ROI was selected between λ_L = 1500 nm and λ_R = 1560 nm to retain relevant spectral information while reducing the influence of less informative and noisy wavelength regions. Within this range, the antioxidant exhibited a distinct absorption feature, whereas polypropylene showed comparatively high reflectance, manifested as a broad spectral plateau. This contrast was expected to enhance the sensitivity towards variations in antioxidant concentration. A magnified view of the selected ROI is presented in Figure 2.

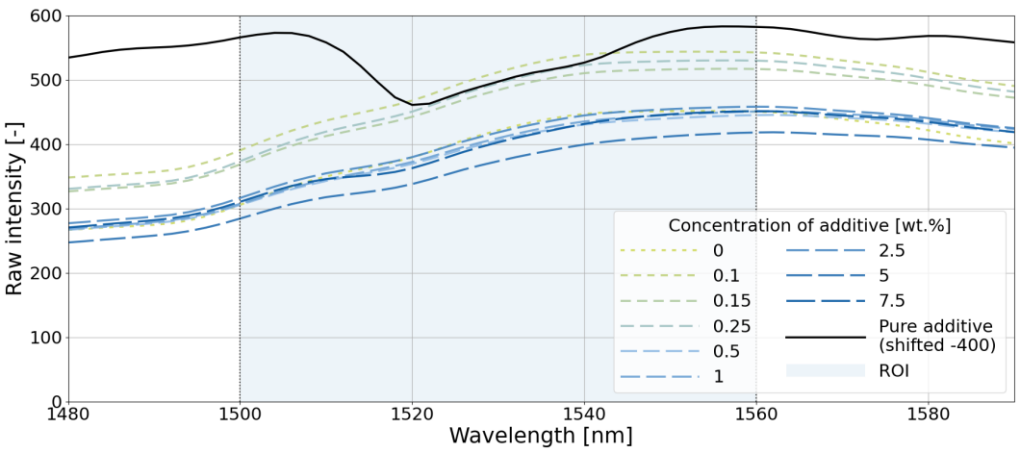


Fig. 2: Raw SWIR spectra of the granulates and the pure antioxidant (shifted by −700 intensity units) within the selected spectral ROI (marked blue).

Within the selected ROI, the spectra are arranged more consistently according to the antioxidant concentration levels. In particular, the spectra corresponding to the 0% and 0.1% concentrations are located closer together, and a predominantly monotonic trend in intensity can be observed. Nevertheless, the spectra do not fully follow the expected concentration-dependent order, and the spectral differences between the individual concentration levels remain small. Furthermore, the spacing between adjacent spectra does not scale linearly with concentration. This behavior is likely caused by additional influences unrelated to the antioxidant concentration, as well as measurement noise. Therefore, the raw spectral data within the selected ROI are not sufficiently robust to serve as the basis for a reliable quantitative model.

The processed spectra are presented in Figure 3. After local baseline correction and normalization, the spectra are clearly separated and ordered according to increasing antioxidant concentration. Furthermore, the intensity differences exhibit a strong correlation with antioxidant concentration.

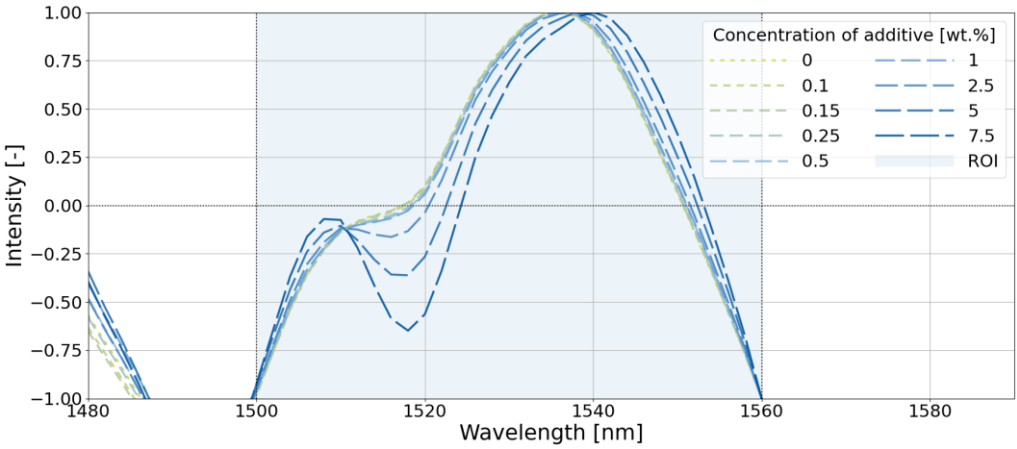


Fig. 3. Locally baseline corrected and normalized spectra of the granulates within the selected spectral ROI (marked blue).

Nevertheless, the spectral differences remain relatively small compared to the overall signal intensity. Consequently, under realistic recycling conditions, additional sources of variability, such as changes in material composition, surface properties, particle geometry, and contamination, may further obscure the weak spectral signatures of the antioxidant and should therefore be investigated.

This study focused on the feasibility of detecting concentration-dependent spectral variations rather than on quantitative modelling. Given the limited number of concentration levels and the controlled conditions, model performance metrics would have been of limited representativeness and potentially prone to overfitting. Therefore, emphasis was placed on a more robust and interpretable analysis based on the observed spectral trends and information obtained from the spectrum of the pure antioxidant.

4 CONCLUSION & OUTLOOK

The results demonstrate the feasibility of detecting concentration-dependent spectral variations caused by the antioxidant blend Irganox® B225 in polypropylene granulates. By selecting a suitable spectral ROI and applying local baseline correction and normalization, concentration-dependent differences became clearly visible even at low concentrations. Nevertheless, the corresponding spectral features were only weakly pronounced, resulting in a limited signal-to-noise ratio and reduced measurement robustness.

It should be noted that the present study was performed under highly controlled conditions using a design recyclate with defined antioxidant concentrations. Consequently, important sources of variability commonly encountered in PCR streams, such as variations in polymer composition, the presence of other additives, contaminants, degradation products, moisture, and surface-related effects, were not considered. The transferability of the observed spectral trends and the feasibility of robust quantitative determination under realistic recycling conditions need to be demonstrated.

Based on these considerations, spectroscopic analysis performed on more homogeneous material states may represent a promising strategy for improving spectral reproducibility. In particular, sample preparation and homogenization strategies may provide a practical approach to reduce the influence of variability commonly encountered in heterogeneous PCR polypropylene streams.

Although such approaches would no longer enable fully inline measurements, batch-wise analysis of homogenized samples could represent a practical compromise between analytical performance and implementation effort. In addition, such an approach could still provide faster and less destructive quality control compared to conventional laboratory methods.

Future studies should therefore investigate the applicability of spectroscopic monitoring to PCR polypropylene originating from different waste streams. Furthermore, the influence of sample homogenization strategies on the robustness of the spectral information should be evaluated to assess their suitability for practical quality monitoring. Such approaches could support targeted re-additivation of recycled materials and facilitate the detection of excessive antioxidant concentrations, thereby contributing to more consistent material quality and improved process control.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was funded by the German Research Foundation (DFG) within the framework of TRR 402/1-525069572 DediGrad.
The authors sincerely thank Petar Peric for his active support in the planning, design, and execution of the experiments.

REFERENCES

BASF SE. (n.d.). *Irganox® B 225 - Technical data sheet* (2022). Retrieved from https://download.basf.com/p1/8a80824f99704a54019971b195f804f9/en/Irganox_B_225

Gall, M., Freudenthaler, P. J., Fischer, J., & Lang, R. W. (2021). Characterization of Composition and Structure–Property Relationships of Commercial Post-Consumer Polyethylene and Polypropylene Recyclates. *Polymers*.

Hopmann, C., Wilms, E., Beste, C., Schneider, D., Fischer, K., & Stender, S. (2021). Investigation of the influence of melt-impregnation parameters on the morphology of thermoplastic UD-tapes and a method for quantifying the same. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*.

Knoben, N., Vanhouttem, M., Wypkema, A., & Subramanian, N. (2025). Monitoring Antioxidant Consumption and Build-Up in Polypropylene During Open-Loop and Closed-Loop Mechanical Recycling. *Materials*.

Mihelcic, M., Oseli, A., Huskic, M., & Slemenik Perše, L. (2022). Influence of Stabilization Additive on Rheological, Thermal and Mechanical Properties of Recycled Polypropylene. *polymers*.

Pfaendner, R. (2022). Restabilization – 30 years of research for quality improvement of recycled plastics Review. *Polymer Degradation and Stability*.

Vilaplana, F., & Karlsson, S. (2008). Quality Concepts for the Improved Useof Recycled Polymeric Materials: A Review. *Macromolecular Materials and Engineering*.

von Vacano, B., Reich, O., Huber, G., & Türkoglu, G. (2023). Elucidating pathways of polypropylene chain cleavage and stabilization for multiple loop mechanical recycling. *Journal of Polymer Science*.

CONTACT

Peter Bardenheuer, M.Sc.
peter.bardenheuer@ants.rwth-aachen.de
+49 241 80-90712
Chair of Anthropogenic Material Cycles (ANTS)
RWTH Aachen University
www.ants.rwth-aachen.de

Chemische Eigenschaften von industriell hergestellten Gesteinskörnungen aus Bett- und Rostaschen der Müllverbrennung – Eine Datenauswertung von Versuchen im Industriemaßstab

Simon Mika[1], Julia Mühl[1] & Jakob Lederer[1]
[1)] CD-Labor für Design und Bewertung einer effizienten, recyclingbasierten Kreislaufwirtschaft, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, TU Wien, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Bett- und Rostaschen aus der thermischen Abfallbehandlung stellen mit rund 500.000 t pro Jahr einen bedeutenden Abfallstrom der österreichischen Siedlungsabfallwirtschaft dar. Gleichzeitig enthalten sie wertvolle Metalle sowie mineralische Bestandteile, die nach entsprechender Aufbereitung als industriell hergestellte Gesteinskörnung (IGK) genutzt werden können. Im Rahmen des Forschungsprojekts „CD-Labor für Design und Bewertung einer effizienten, recyclingbasierten Kreislaufwirtschaft“ wurden Aufbereitungsversuche im Industriemaßstab mit Bett- und Rostaschen aus sechs österreichischen Müllverbrennungsanlagen durchgeführt. Die Aufbereitung erfolgte in der Anlage Slagtory der Brantner green solutions durch eine Kombination aus Metallrückgewinnung, Wäsche des Materials sowie Alterung der mineralischen Fraktion. Zur Beurteilung der Einhaltung der umweltrelevanten Grenzwerte gemäß Bundesabfallwirtschaftsplan 2023 standen zur Berechnung von Median und 80. Perzentil je Parameter 11 Messdaten von Bettaschen sowie von Rostaschen zur Verfügung. Die Ergebnisse zeigen, dass alle Anforderungen für den Einsatz sowohl als Tragschicht im Straßenbau sowie als Gesteinskörnung in Beton erfüllt werden können. Die Untersuchungen bestätigen damit das hohe Potenzial durch die großtechnische Aufbereitung von Bett- und Rostaschen, nicht nur metallische, sondern auch mineralische Sekundärrohstoffe bereitzustellen.

1 EINLEITUNG

Seit Inkrafttreten der Deponieverordnung (2008) wird in Österreich der überwiegende Teil der Siedlungsabfälle thermisch behandelt. Die dabei anfallenden Bett- und Rostaschen stellen mit rund 500.000 t pro Jahr einen bedeutenden Abfallstrom der österreichischen Siedlungsabfallwirtschaft dar (BMK, 2023). Diese enthalten erhebliche Mengen an Eisen- und Nichteisenmetallen sowie Glas und andere mineralische Bestandteile, die als Sekundärrohstoffe genutzt werden können. In zahlreichen europäischen Ländern werden aufbereitete Bett- und Rostaschen bereits als Baustoffe eingesetzt (Blasenbauer et al., 2020). Internationale Untersuchungen zeigen, dass durch eine effiziente Metallrückgewinnung die Gesamtgehalte an Schwermetallen in der mineralischen Fraktion reduziert werden können, während durch Waschen und Entfernen der mineralischen Feinfraktion auch die Eluat- und Salzgehalte deutlich gesenkt werden können (Šyc et al., 2020; Glauser et al., 2021; Mehr et al., 2021). Somit kann durch eine entsprechende Aufbereitung die Umweltverträglichkeit der verbleibenden mineralischen Fraktion wesentlich verbessert werden. Mit dem Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP) 2023 besteht in Österreich erstmals ein klarer rechtlicher Rahmen für die Herstellung industriell hergestellter Gesteinskörnungen (IGK) aus Bett- und Rostaschen der Müllverbrennung (BMK, 2023). Mögliche Einsatzgebiete sind als Tragschicht im Straßenbau sowie die Verwendung als Gesteinskörnung für Beton mit Einsatzraten von bis zu 10 % bzw. 20 %.

Die von Brantner green solutions (Brantner Österreich GmbH) betriebene Aufbereitungsanlage „Slagtory“ überführt die in der wissenschaftlichen Literatur beschriebenen Aufbereitungsschritte in einen industriellen Maßstab. In der Anlage werden Metalle bis zu einer Korngröße einiger Mikrometer effizient rückgewonnen sowie mineralische Feinanteile und lösliche Bestandteile entfernt. Die verbleibende mineralische Fraktion wird anschließend gealtert. Im Rahmen des

Forschungsprojekts „CD-Labor für Design und Bewertung einer effizienten, recyclingbasierten Kreislaufwirtschaft“ wurden industrielle Aufbereitungsversuche mit Bett- und Rostaschen aus sechs österreichischen Müllverbrennungsanlagen durchgeführt. Zusammen repräsentieren diese Anlagen rund 34 % der österreichischen Rostaschen- und 77 % der jährlich anfallenden Bettaschenmengen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Bewertung der chemischen Eigenschaften der erzeugten industriell hergestellten Gesteinskörnungen (IGK) und deren Eignung für einen Einsatz gemäß Bundesabfallwirtschaftsplan 2023.

2 MATERIAL UND METHODEN

Die Daten der vorliegenden Studie wurden in neun Aufbereitungsversuchen aus dem Zeitraum 2021-2025 erhoben. Je Aufbereitungsversuch wurden 2-4 Bett- und Rostaschen behandelt. Die behandelte Menge je Versuch und Asche betrug 200-500 t unbehandelte Asche. Die Probenahme der mineralischen Fraktion erfolgte mittels eines Radladers aus dem fallenden Materialstrom. Dabei wurden mindestens 30 Inkremente über mindestens 2 Stunden Aufbereitungszeit entnommen und zu einer Mischprobe vereint, wodurch eine Primärprobe von jeweils 500–800 kg erhalten wurde. Für die Alterungsversuche wurden Teilmengen von 200–400 kg über einen Zeitraum von 12 Wochen unter natürlichen Witterungsbedingungen gelagert. Nach einer Siebung bei 2 mm wurde die Fraktion 2-8 mm gemäß den Vorgaben des BAWP analysiert. Die im BAWP festgelegten Grenzwerte müssen von den Medianwerten der zumindest letzten 10 Messergebnisse eingehalten werden. Zusätzlich gelten die 1,5-fachen Grenzwerte für die 80. Perzentile. Insgesamt standen für die Auswertung je Parameter 11 Messdaten für Bettaschen sowie 11 Messdaten für Rostaschen der aufbereiteten und gealterten mineralischen Fraktion 2-8 mm zur Verfügung. Die einzuhaltenden Grenzwerte gemäß BAWP 2023 sind in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Anforderungen gemäß Bundesabfallwirtschaftsplan 2023 an Rückstände aus Abfallverbrennungsanlagen bei der Verwendung als Tragschicht im Straßenbau oder als Gesteinskörnung für Beton (BMK, 2023)

Parameter	Einheit	Grenzwert		
Verwendung		Tragschicht im Straßenbau	Gesteinskörnung für Beton; bei Anteil am Beton:	
			≤ 10 %	≤ 20 %
FE-Anteil	% TM	1	0,5	0,5
NE-Anteil	% TM	0,8	0,4	0,4
Gesamtgehalte				
Pb	mg/kg TM	900	600	500
Cd	mg/kg TM	10	4	3
Cr	mg/kg TM	800	500	400
Ni	mg/kg TM	300	200	200
TOC	% TM	1	1	1
Eluatgehalte				
pH-Wert		12,0	12,0	12,0
Elektr. Leitfähigkeit		- *	- *	- *
Sb	mg/kg TM	0,6	0,6	0,6
As	mg/kg TM	0,5	0,5	0,5
Pb	mg/kg TM	0,5	0,5	0,5
Cr	mg/kg TM	0,5	0,5	0,5
Cu	mg/kg TM	4	2	2
Mo	mg/kg TM	1	0,8	0,8
Ni	mg/kg TM	0,4	0,4	0,4
Chlorid (als Cl)	mg/kg TM	3.000	2.500	2.000
Sulfat (als SO_4)	mg/kg TM	5.000	5.000	3.000

* Die elektrische Leitfähigkeit ist zu bestimmen und das Ergebnis in den Aufzeichnungen zu dokumentieren.

3 ERGEBNISSE

Die statistische Auswertung zeigt, dass sowohl die aus Bettaschen als auch die aus Rostaschen hergestellten industriellen Gesteinskörnungen 2-8 mm die Anforderungen für einen Einsatz als Gesteinskörnung in Beton mit einem Anteil von bis zu 20 % erfüllen. Dabei werden alle Grenzwerte von der IGK aus Bettaschen deutlich unterschritten, während bei der IGK aus Rostaschen Chrom (Gesamtgehalt und Eluat) sowie Cadmium (Gesamtgehalt) in grenzwertnahen Konzentrationen auftreten. Durch die Möglichkeit, die Einsatzrate auf unter 10 % zu reduzieren, können höhere Grenzwerte zur Beurteilung herangezogen werden, wodurch sich auch für die Rostaschen in allen Parametern eine deutliche Unterschreitung und damit ein Puffer zu den Grenzwerten ergibt. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass das untersuchte industrielle Aufbereitungsverfahren geeignet ist, Gesteinskörnungen für den Einsatz im Beton bereitzustellen. Gleichzeitig können damit auch die weniger restriktiven Anforderungen für Tragschichten im Straßenbau eingehalten werden. Die Ergebnisse der Aufbereitungsversuche sind in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: Statistische Auswertung von Median und 80. Perzentil von industriell hergestellten Gesteinskörnungen aus Bett- und Rostaschen

Parameter	Einheit	Industriell hergestellte Gesteinskörnung 2-8 mm			
		aus Bettasche		aus Rostasche	
		Median	80. Perzentil	Median	80. Perzentil
FE-Anteil *	% TM	<0,1	<0,1	<0,1	0,2
NE-Anteil *	% TM	<0,1	0,1	0,3	0,5
Gesamtgehalte					
Pb	mg/kg TM	140	170	370	440
Cd	mg/kg TM	1,0	1,5	2,2	3,7
Cr	mg/kg TM	130	200	220	530
Ni	mg/kg TM	50	59	130	180
TOC	% TM	0,2	0,3	0,5	0,8
Eluatgehalte					
pH-Wert		10,6	10,8	10,8	11,4
Sb	mg/kg TM	0,4	0,6	0,3	0,4
As	mg/kg TM	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Pb	mg/kg TM	<0,1	<0,1	0,2	0,3
Cr	mg/kg TM	<0,1	0,1	<0,1	0,7
Cu	mg/kg TM	<0,1	<0,1	0,7	1,4
Mo	mg/kg TM	0,2	0,3	0,3	0,4
Ni	mg/kg TM	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Chlorid (als Cl)	mg/kg TM	160	440	800	1.100
Sulfat (als SO_4)	mg/kg TM	2.800	3.800	1.100	1.300

* Restmetallgehalt in 0-8mm frisch nach der Aufbereitung bestimmt

4 ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass die untersuchte Aufbereitungsanlage „Slagtory“ eine IGK sowohl aus Bett- als auch aus Rostaschen erzeugen kann, welche nach der Alterung die Median- und 80. Perzentil-Grenzwerte des BAWP 2023 für den Einsatz als Tragschicht im Straßenbau sowie als Gesteinskörnung für Beton einhält. Die aufbereiteten Bettaschen liegen in allen Parametern deutlich unter den Grenzwerten für den Einsatz <20% im Beton. Obwohl diese Grenzwerte knapp auch von den Rostaschen eingehalten werden können, ist, um die Grenzwerte gesichert einzuhalten, ein Einsatz von weniger als 10% im Beton empfehlenswert, da es, bedingt durch den Verbrennungsinput, zu gewissen Fluktuationen in der Zusammensetzung kommen kann. Neben den hier untersuchten chemischen Eigenschaften sind für einen Einsatz als Gesteinskörnung in Beton auch betontechnologische Anforderungen von Bedeutung. Entsprechende Untersuchungen wurden im Rahmen desselben Forschungsprojekts bereits

durchgeführt und zeigen ein grundsätzlich positives Potenzial für die Anwendung im Betonbau. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, erhebliche Mengen mineralischer Sekundärrohstoffe aus den derzeit überwiegend deponierten Aschenströmen zu gewinnen.

Die Ergebnisse bestätigen, dass die im BAWP definierten, umweltrelevanten Anforderungen an IGK aus Bett- und Rostaschen durch geeignete Aufbereitungsschritte eingehalten werden können. Darüber hinaus wird die von der Firma Brantner hergestellte IGK nach ÖNORM EN 12620 und ÖNORM EN 13242 zertifiziert und verfügt über eine CE-Kennzeichnung (Brantner green solutions, 2026). Die damit verbundene Qualitätssicherung gewährleistet den Kunden eine reproduzierbare Materialqualität. Beide Aspekte stellen wesentliche Voraussetzungen für die Entwicklung von Abfallende-Kriterien für IGK aus Bett- und Rostaschen dar.

DANKSAGUNG

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Forschungsinitiative CD-Labor für Design und Bewertung einer effizienten, recyclingbasierten Kreislaufwirtschaft am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der TU Wien. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und 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 Brantner Österreich GmbH, Linz Service GmbH, Wien Energie GmbH, und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H. sowie bei unserem strategischen Partner, der Magistratsabteilung Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien (MA 48).

LITERATURVERZEICHNIS

Blasenbauer D, Huber F, Lederer J, et al. (2020) Legal situation and current practice of waste incineration bottom ash utilisation in Europe. *Waste Management* 102: 868–883.

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

Brantner green solutions (2026) *Kreislaufprodukt Gesteinskörnung*. Available at: https://www.brantner.com/green-solutions/kreislaufprodukte/gesteinskoernung/ (accessed 24.06.2026).

Glauser A, Weibel G and Eggenberger U (2021) Effects of enhanced metal recovery on the recycling potential of MSWI bottom ash fractions in various legal frameworks. *Waste Management & Research* 39(12): 1459–1470.

Mehr J, Haupt M, Skutan S, et al. (2021) The environmental performance of enhanced metal recovery from dry municipal solid waste incineration bottom ash. *Waste Management* 119: 330–341.

Šyc M, Simon FG, Hykš J, et al. (2020) Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments. *Journal of Hazardous materials* 393: 122433.

KONTAKT

DI Simon Mika
simon.mika@tuwien.ac.at
+43 1 58801 166093
CD-Labor für Design und Bewertung einer effizienten, recyclingbasierten Kreislaufwirtschaft
Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, TU Wien

Änderungen für IPPC-Anlagen durch die Novelle der Industrieemissionsrichtlinie – Ausgangszustandsbericht und Monitoring

Roman Hummel[1], Katrin Amort[1], Evgenij Gerstner[1] & Arne M. Ragoßnig[1]
[1)] RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die Industrieemissionsrichtlinie (IED) verpflichtet Betreiber von IPPC-Anlagen, bei Verwendung, Erzeugung oder Freisetzung relevanter gefährlicher Stoffe einen Ausgangszustandsbericht für die Umweltmedien Boden und Grundwasser zu erstellen. Aufbauend auf diesem Bericht sind durch regelmäßige Monitoringmaßnahmen Veränderungen des Umweltzustands zu erfassen und zu dokumentieren. Dabei sind insbesondere Aktualisierungen des Stoffinventars und die aktuelle Anlagensituation zu berücksichtigen. Mit der Novellierung der Industrieemissionsrichtlinie im Jahr 2024 werden unter anderem die Anforderungen an die wiederkehrende Überwachung ab 1. Juli 2026 verschärft. Künftig sind Untersuchungen des Grundwassers mindestens alle vier Jahre und des Bodens mindestens alle neun Jahre durchzuführen, sofern einschlägige BVT-Schlussfolgerungen oder Genehmigungsauflagen keine kürzeren Intervalle vorsehen. Die vorliegende Abhandlung gibt einen Überblick über die rechtlichen Rahmenbedingungen sowie die Auswirkungen der novellierten Industrieemissionsrichtlinie auf Betreiber von IPPC-Anlagen in Österreich.

1 RECHTLICHE GRUNDLAGEN

Die Verpflichtung zur Erstellung eines Ausgangszustandsberichtes (AZB) ergibt sich aus den Vorgaben der Industrieemissionsrichtlinie (IED) sowie deren Umsetzung in das österreichische Anlagenrecht. Da IPPC-Tätigkeiten unterschiedliche Industrie- und Gewerbesektoren umfassen, erfolgte die nationale Umsetzung in mehreren Rechtsmaterien. Zu den wesentlichen Rechtsgrundlagen zählen insbesondere das Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002), das Wasserrechtsgesetz (WRG 1959) sowie die Gewerbeordnung (GewO). Nachfolgend werden die für die Erstellung und Fortschreibung von Ausgangszustandsberichten relevanten Bestimmungen überblicksartig dargestellt.

1.1 Industrieemissionsrichtlinie

Mit der Novellierung der Industrieemissionsrichtlinie wird grundsätzlich der bisherige emissionsbezogene Ansatz um ein integriertes Umwelt- und Transformationsregime erweitert, das neben Emissionen auch Ressourcenverbrauch, Klimaschutz und industrielle Entwicklung als gleichwertige Steuerungsdimensionen berücksichtigt. Die besten verfügbaren Techniken (BVT) werden dabei als umfassender Umweltleistungsmaßstab eingebunden und durch ein verpflichtendes Umweltmanagementsystem ergänzt. Darüber hinaus wird ein Transformationsplan zur industriellen Dekarbonisierung eingeführt mit dem Ziel des Erreichens der Klimaneutralität bis 2050.

Gemäß Artikel 22 Abs. 2 IED (Europäisches Parlament und Rat, 2010) hat der Betreiber einer IPPC-Anlage, in der relevante gefährliche Stoffe verwendet, erzeugt oder freigesetzt werden, einen Ausgangszustandsbericht zu erstellen und diesen der zuständigen Behörde zu unterbreiten, bevor die Anlage in Betrieb genommen wird oder eine Genehmigungsänderung erfolgt. Dieser Bericht muss alle Informationen über den aktuellen Zustand der Boden- und Grundwasserqualität enthalten, damit ein Vergleich mit dem Zustand bei der endgültigen Einstellung der IPPC-Tätigkeit vorgenommen werden kann. Insbesondere sind dafür Informationen über die derzeitige (und bei Verfügbarkeit auch die frühere) Nutzung sowie die verwendeten, erzeugten und freigesetzten Stoffe, die zu einer Kontamination des Bodens und des Grundwassers führen können, heranzuziehen. Die im von der Novelle betroffenen Artikel 16 angeführten Mindestanforderungen

an die wiederkehrende Überwachung wurden verschärft (Europäisches Parlament und Rat, 2010). Letzteres bedeutet, dass diese entsprechend den einschlägigen BVT-Schlussfolgerungen zu erfolgen und mindestens alle vier Jahre für das Grundwasser sowie mindestens alle neun Jahre für den Boden stattzufinden hat. Von diesen Intervallen kann abgewichen werden, sofern die Überwachung auf einer systematischen Beurteilung des Verschmutzungsrisikos basiert.

1.2 Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002)

Gemäß § 39 Abs. 3 Z9 AWG 2002 (BMLFUW, 2002) hat der Genehmigungsantrag für eine IPPC-Behandlungsanlage einen Bericht über den Ausgangszustand im Hinblick auf eine mögliche Verschmutzung des Bodens und Grundwassers zu enthalten, wenn im Rahmen der IPPC-Tätigkeit relevante gefährliche Stoffe verwendet, erzeugt oder freigesetzt werden.

Gemäß § 57 Abs. 1 AWG 2002 (BMLFUW, 2002) hat der Anlageninhaber der IPPC-Behandlungsanlage innerhalb eines Jahres nach Veröffentlichung von BVT-Schlussfolgerungen zur Haupttätigkeit der Behörde mitzuteilen, ob ein Änderungsbedarf an der bestehenden Anlagengenehmigung vorliegt. Gemäß § 57 Abs. 2 ist, sofern die Notwendigkeit einer Aktualisierung besteht, diese innerhalb von 4 Jahren nach Veröffentlichung der BVT-Schlussfolgerungen vorzunehmen und die zuständige Behörde hat diese Genehmigung zu überprüfen.

Gemäß § 51 Abs. 2a hat der Inhaber einer IPPC-Behandlungsanlage im Falle der Anzeige der Auflassung oder Stilllegung derselbigen, bei Vorliegen eines Berichts über den Ausgangszustand eine Bewertung des Standes der Boden- und Grundwasserverschmutzung durch relevante gefährliche Stoffe, die durch die Behandlungsanlage verwendet, erzeugt oder freigesetzt werden, vorzunehmen und einen Vergleich zu ziehen. Sofern erhebliche Verschmutzungen festgestellt werden, sind die erforderlichen Maßnahmen zur Beseitigung dieser Verschmutzungen darzustellen und das Gelände wieder in den ursprünglichen Zustand zurückzuführen (BMLFUW, 2002).

1.3 Weitere Rechtsmaterien

1.3.1 Wasserrechtsgesetz 1959 (WRG 1959)

Gemäß § 134a Abs. 1 WRG (BMLFUW, 1959) hat der Betreiber einer Anlage, in der Tätigkeiten gemäß Anhang I der IED durchgeführt werden, einen Bericht über den Ausgangszustand des Anlagengeländes zu erstellen und der zuständigen Behörde zu übermitteln, sofern im Rahmen der Tätigkeit relevante gefährliche Stoffe verwendet, eingesetzt oder freigesetzt werden. Der Ausgangszustandsbericht ist vor der Inbetriebnahme der Anlage bzw. vor der Erteilung, Erneuerung oder wesentlichen Änderung des wasserrechtlichen Konsenses (z. B. zur Anpassung an den Stand der Technik) zu erstellen. Er dient der Dokumentation des Ausgangszustands des Grundwassers im Hinblick auf eine mögliche Verschmutzung durch relevante gefährliche Stoffe.

1.3.2 Gewerbeordnung 1994 (GewO 1994)

Gemäß § 353a Abs. 1 Z 3 GewO 1994 (BMLFUW, 1994) hat der Genehmigungsantrag für eine zu genehmigende IPPC-Anlage u.a. einen Bericht über den Ausgangszustand im Hinblick auf eine mögliche Verschmutzung des Bodens und des Grundwassers auf dem Anlagengelände zu enthalten, sofern in der IPPC-Anlage relevante gefährliche Stoffe verwendet, erzeugt oder freigesetzt werden.

1.3.3 Sonstige Rechtsmaterien

Weitere rechtliche Grundlagen mit Bezug zur Erstellung eines Ausgangszustandsberichtes finden sich insbesondere im § 17 Abs. 2 Z 5 des Emissionsschutzgesetz für Kesselanlagen (EG-K) (Österreichischer Nationalrat, 2013) sowie im § 121d Abs. 3 Z 3 des Mineralrohstoffgesetz (MinroG) (BMLRT, 1999). Diese Bestimmungen ergänzen die sektorübergreifenden Anforderungen der Industrieemissionsrichtlinie und der zentralen Materiengesetze im industriellen Vollzug.

2 VORGEHENSWEISE UND ERFAHRUNGEN

Die nachfolgend dargestellte Vorgehensweise ist vor dem Hintergrund der verschärften Anforderungen an die wiederkehrende Überwachung im Zuge der Novellierung der Industrieemissionsrichtlinie zu sehen.

2.1 Ermittlung Stoffinventar

Die zentralen Inhalte eines Ausgangszustandsberichts umfassen die Beschreibung des aktuellen Zustands der Umweltmedien Boden und Grundwasser unter Berücksichtigung der im Rahmen der IPPC-Tätigkeit verwendeten, erzeugten oder freigesetzten relevanten gefährlichen Stoffe sowie standortspezifischer Gegebenheiten und historischer Nutzungen. Die Ermittlung dieser Stoffe bildet in der Praxis den Ausgangspunkt für alle weiteren Schritte.

Die Vorgehensweise orientiert sich dabei am Leitfaden „Bericht über den Ausgangszustand“ (BMLFUW, 2014). Erfahrungsgemäß bieten sich zwei Strategien zur Erfassung des Stoffinventars an: eine „Bottom-up“- und eine „Top-down“-Herangehensweise. In der praktischen Umsetzung hat sich die „Bottom-up“-Methode bewährt, da hierbei das vollständige Stoffinventar eines Standortes systematisch erfasst und ausgewertet wird, wohingegen innerhalb der „Top-Down“-Strategie nur jene Stoffe/Gemische Beachtung finden, die entsprechend einer Vorbetrachtung als relevant erachtet werden. Die „Bottom-up“-Methode stellt sicher, dass relevante gefährliche Stoffe nicht übersehen werden, da Inhaltsstoffe aus unterschiedlichen eingesetzten Stoffgemischen standortweit zusammengeführt und in ihrer Gesamtmenge bewertet werden können.

Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass die Qualität des Ausgangszustandsberichts maßgeblich von der Sorgfalt bei der Ermittlung des Stoffinventars abhängt. Unvollständige oder zu stark vorgefilterte Stofflisten führen häufig dazu, dass relevante Stoffe in der Untersuchungsphase nicht berücksichtigt werden, was in weiterer Folge zu Unklarheiten bei der späteren Bewertung führen kann.

Zu berücksichtigen ist zudem, dass festgestellte Verunreinigungen nicht ausschließlich aus der aktuellen IPPC-Tätigkeit resultieren müssen. Häufig sind auch historische Belastungen, wie Altlasten, frühere Nutzungen oder unsachgemäße Anschüttungen, von Bedeutung und müssen insbesondere bei der Ermittlung und Bewertung der Untersuchungsergebnisse im Rahmen der Zustandserhebung der beiden Umweltmedien Boden und Grundwasser entsprechend mitgedacht werden.

2.2 Standortinformationen

Parallel zur Erstellung der Stoffliste zur Ermittlung der relevanten gefährlichen Stoffe sind standortbezogene Informationen zu erfassen. Dazu zählen insbesondere Angaben zu Geologie und Bodenaufbau, Hydrogeologie und Grundwasserverhältnissen, Hydrologie, Oberflächengewässern sowie zu technischen Schutzmaßnahmen für Boden und Grundwasser. Ergänzend ist auch eine Abfrage zu möglichen Altlasten bzw. Altstandorten durchzuführen.

Als Informationsquellen dienen insbesondere länderspezifische GIS-Systeme, die in der Regel frei oder nach Registrierung zugänglich sind. Darüber hinaus können bestehende Unterlagen wie grundlegende Charakterisierungen gemäß Deponieverordnung (DVO 2008) (BMLFUW, 2008) bzw. Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP) (BMNT, 2023) sowie vorhandene Grundwasserdaten erste Hinweise zur standörtlichen Situation liefern. Eine direkte Ableitung konkreter stoffbezogener Bewertungen ist daraus jedoch häufig nur eingeschränkt möglich, da diese Daten nicht auf spezifische relevante gefährliche Stoffe ausgerichtet sind.

Nach der Ermittlung der relevanten Stoffe und der standortbezogenen Informationen ist der räumliche Bezugsbereich der Untersuchung festzulegen. Ausgangspunkt hierfür sind häufig vorhandene Umweltinspektionsberichte aus früheren Behördenkontrollen, in denen die relevanten IPPC-Anlagen sowie angrenzende, funktional verbundene Anlagenteile dokumentiert sind.

Der Untersuchungsraum umfasst neben diesen Anlagenbereichen insbesondere Lagerflächen der identifizierten Stoffe sowie Bereiche für deren Handhabung, Transport und Umschlag. Zusätzlich sind standortspezifische Gegebenheiten wie Versiegelungsgrad, Grünflächenanteile, Entwässerungssysteme sowie vorhandene Brandschutz- und Rückhalteeinrichtungen in die Abgrenzung einzubeziehen.

2.3 Beweissicherungskonzept

Im nächsten Schritt ist ein Beweissicherungskonzept zu erstellen, in dem die Untersuchungsstrategie dokumentiert wird. Darin wird festgelegt, welche Umweltmedien (Boden und Grundwasser) im Rahmen der Untersuchungen betrachtet und gegebenenfalls analytisch untersucht werden.

Ob beide Umweltmedien tatsächlich einer Untersuchung unterzogen werden, hängt wesentlich von den standortspezifischen Gegebenheiten ab. Dazu zählen insbesondere der Grundwasserflurabstand, die hydrogeologischen Verhältnisse, der Versiegelungsgrad sowie die Verfügbarkeit geeigneter Messstellen. Zusätzlich kann bei der Verwendung, Erzeugung oder Freisetzung leichtflüchtiger organischer Verbindungen auch eine Untersuchung der Bodenluft erforderlich sein.

Der analytische Parameterumfang sollte dabei möglichst zielgerichtet festgelegt werden. Einzelnachweise spezifischer Stoffe sind nur dann vorzusehen, wenn keine geeigneten Summenparameter oder andere geeignete Analyseverfahren (z.B. GCMS-Screening) zur Verfügung stehen. Für Stoffe mit eingeschränkter analytischer Verfügbarkeit können sogenannte Begleitparameter herangezogen werden, mit dessen Hilfe man den zu bestimmenden Stoff bewerten möchte. Es handelt es sich hierbei um Parameter, die im gleichen Stoffgemisch wie der Zielstoff in ähnlichen Konzentrationen vorkommen und vergleichbare physikalisch-chemische Eigenschaften (beispielsweise hinsichtlich Löslichkeit und Dampfdruck) aufweisen. Bei der Planung der Untersuchungsmaßnahmen sind außerdem zeitliche und technische Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Insbesondere die Errichtung zusätzlicher Messstellen, etwa Grundwasserpegel, kann mit entsprechenden Vorlaufzeiten verbunden sein. Zudem kann der Probenahmezeitpunkt von jahreszeitlichen Schwankungen des oberflächennahen Grundwasserkörpers abhängen.

Grundsätzlich ist bestehenden Infrastrukturen wie vorhandenen Aufschlüssen, Brunnen oder Grundwassermessstellen der Vorzug zu geben, sofern diese für die Untersuchungsziele geeignet sind. Dadurch können zusätzliche Errichtungs- und Betriebskosten reduziert werden.

2.4 Ermittlung des Ausgangszustands

Nach Durchführung der ergänzenden Untersuchungen zur Bestimmung des Ausgangszustands erfolgt die Bewertung der Messergebnisse anhand geeigneter Vergleichsmaßstäbe. Dazu zählen insbesondere einschlägige Richt- und Prüfwerte sowie normative Grundlagen wie ÖNORM S 2088-1 (Austrian Standards International, 2025), der BAWP (BMNT, 2023), die DVO 2008 (BMLFUW, 2008), die Trinkwasserverordnung (TWV) (BMSG, 2001) sowie die Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser (BMLFUW, 2010). In der aktuellen Fassung der Trinkwasserverordnung wurde die Stoffgruppe der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) über definierte Summenparameter regulatorisch verankert. Ergänzend berücksichtigt die seit 2025 vorliegende ÖNORM S 2088-1:2025 05 01 PFAS im Rahmen eines erweiterten Bewertungsansatzes zur Beurteilung von Schadstoffgemischen im Boden- und Grundwasserkontext.

Der Umfang der heranzuziehenden Vergleichswerte ist standortspezifisch festzulegen und hängt wesentlich von den örtlichen Rahmenbedingungen ab. Insbesondere bei einer im Grundwasserabstrom gelegenen Trinkwasserentnahme ist die Einbeziehung der Vorgaben aus der Trinkwasserverordnung jedenfalls sinnvoll.

Die Bewertung sollte unter verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Zunächst ist zu prüfen, ob festgestellte Auffälligkeiten in einem plausiblen Zusammenhang mit der jeweiligen IPPC-Tätigkeit stehen. Kann ein solcher Zusammenhang ausgeschlossen werden, sind die betreffenden Befunde entsprechend zu dokumentieren und im Kontext möglicher Hintergrundbelastungen einzuordnen. Besteht hingegen ein möglicher Zusammenhang mit der Anlage, sind weiterführende Untersuchungen zur Eingrenzung und Charakterisierung der Verunreinigung erforderlich. Ziel ist dabei die räumliche und stoffliche Abgrenzung eines möglichen Kontaminationsherds sowie die Beschreibung des Ausmaßes der Belastung.

2.5 Monitoring / Schließungsbericht

Da nach der Erstellung des Ausgangszustandsberichtes die zu betrachtenden Umweltmedien Boden und Grundwasser im Rahmen eines Monitoringprogramms weiterhin zu überwachen sind (in der Regel mindestens in vierjährigen Intervallen für das Grundwasser und in neunjährigen Intervallen für den Boden, sofern keine abweichenden behördlichen Vorgaben oder risikobasierten Anpassungen bestehen), empfiehlt es sich, bereits im Zuge der Erstellung des Beweissicherungskonzeptes ein entsprechendes weiterführendes Monitoringkonzept zu entwickeln und mit der zuständigen Behörde abzustimmen.

Vor der Fortschreibung bzw. Umsetzung des Monitorings ist die zugrunde liegende Stoffliste auf Aktualität zu überprüfen. Dabei sind sowohl neu eingesetzte Stoffe und Stoffgemische als auch Änderungen bestehender Betriebsstoffe zu berücksichtigen. Insbesondere können sich durch Aktualisierungen von Sicherheitsdatenblättern Änderungen der stofflichen Zusammensetzung bzw. der Gefahreneinstufung ergeben, die eine Anpassung des Untersuchungsumfangs erforderlich machen.

Bei Stilllegung der IPPC-Anlage ist ein Abschlussbericht zu erstellen, in dem der Zustand der Umweltmedien Boden und Grundwasser erneut ermittelt und mit dem Ausgangszustandsbericht verglichen wird. Ergibt sich dabei eine relevante Verschlechterung der Umweltqualität, sind durch den Anlageninhaber geeignete Maßnahmen zur Wiederherstellung oder Sanierung in Abstimmung mit der zuständigen Behörde umzusetzen.

3 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Für die Erstellung eines Ausgangszustandsberichtes sind die Vorgaben des Leitfadens zum Bericht über den Ausgangszustand (BMLFUW, 2014) maßgeblich. In der praktischen Umsetzung hat sich insbesondere ein systematischer „Bottom-Up"-Ansatz zur Ermittlung der relevanten gefährlichen Stoffe etabliert, da hierdurch auch Inhaltsstoffe berücksichtigt werden, die in komplexen Stoffgemischen nicht unmittelbar ersichtlich sind. Die Einstufung der Relevanz erfolgt auf Basis des vollständigen Stoffinventars sowie der zugehörigen Sicherheitsdatenblätter, wobei bei unvollständiger Datenlage ergänzende Recherchen erforderlich sein können.

Die Festlegung des räumlichen Bezugsbereichs sowie die Erstellung eines Beweissicherungskonzeptes stellen zentrale vorbereitende Schritte dar und sollten vor Beginn der Untersuchungen mit der zuständigen Behörde abgestimmt werden. Im Rahmen der Ausarbeitung ist zudem die Einbeziehung potenzieller externer Einflussquellen im Grundwasseranstrom zu berücksichtigen.

Die Bewertung der Messergebnisse hat unter Berücksichtigung geeigneter Vergleichsmaßstäbe für Boden und Grundwasser zu erfolgen und muss ein konsistentes, nachvollziehbares Gesamtbild des IST-Zustandes ermöglichen.

Zusammenfassend erfordert die Erstellung eines Ausgangszustandsberichtes ein interdisziplinäres Fachverständnis sowie einen erheblichen planerischen und analytischen Aufwand, der im Regelfall eine Bearbeitungsdauer von zumindest einem Jahr bedingt.

LITERATURVERZEICHNIS

Austrian Standards International (2025) ÖNORM S 2088-1:2025-05, Kontaminierte Standorte - Teil 1: Standortbezogene Beurteilung von Verunreinigungen des Grundwassers bei Altstandorten und Altablagerungen. Wien.

Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2002) Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002), BGBl. I Nr. 102/2002 idf BGBl. I Nr. 84/2024. Wien.

Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2008) Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008 - DVO 2008), BGBl. II Nr. 39/2008 idF BGBl. II Nr. 243/2024. Wien.

Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2010) Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über den guten chemischen Zustand des Grundwassers (Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser - QZV Chemie GW), BGBl. II Nr. 98/2010 idF BGBl. II Nr. 248/2019. Wien.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (1959) Wasserrechtsgesetz 1959 - WRG 1959, BGBl. Nr. 215/1959 idF BGBl. Nr. 73/2018. Wien.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2014) Bericht über den Ausgangszustand - Leitfaden. Wien.

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) (1999) Bundesgesetz über mineralische Rohstoffe (Mineralrohstoffgesetz - MinroG), BGBl. I Nr. 38/1999 idF BGBl. Nr. 90/2025. Wien.

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT) (2023) Bundesabfallwirtschaftsplan 2023 (BAWP 2023). Wien.

Bundesministerium für soziale Sicherheit und Generationen (BMSG) (2001) Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TWV), BGBl. II Nr. 304/2001 idF BGBl. II Nr. 122/2024. Wien.

Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (BMBWF) (1994) Gewerbeordnung (GewO 1994), BGBl. Nr. 194/1994 idF BGBl. Nr. 33/2026. Wien.

Europäisches Parlament und Rat (2010) Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und Rates vom 24. November 2010 über die Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung), zuletzt geändert durch Richtlinie (EU) 2024/1785 des Europäischen Parlaments . Straßburg.

Österreichischer Nationalrat (2013) Bundesgesetz, mit dem ein Bundesgesetz über die integrierte Vermeidung und Verminderung von Emissionen aus Dampfkesselanlagen (Emissionsschutzgesetz für Kesselanlagen - EG-K 2013) erlassen wird, BGBl. I Nr. 127/2013 idF BGBl. I Nr. 89/2025. Wien.

Einstufung der Erzeugnisse des chemischen Kunststoffrecyclings – Erfahrungsbericht & Herausforderungen aus österreichischer Perspektive

Arne M. Ragossnig[1], Markus Dielacher[2] & Werner Kruschitz[2]
[1)] RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Wien, Österreich
[2)] Syncycle Operations GmbH, Kühnsdorf, Österreich

KURZFASSUNG: Gegenständlicher Beitrag adressiert die abfallrechtlichen Herausforderungen des rechtskonformen Inverkehrbringens der Produkte des chemischen Recyclings im österreichischen abfallrechtlichen Kontext. Neben den europarechtlichen Rahmenbedingungen, die Vorgaben für die nationale Umsetzung des Abfallendes von Abfällen definieren und auch den Rahmen für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft vorgeben, sowie den Realitäten am Recyclingkunststoffmarkt werden vor allem die durch die Spezifika österreichischen Abfallrechts sich ergebenden Herausforderungen und ein konkreter Lösungsansatz vorgestellt.
Die gegenständlichen Darstellungen basieren auf den Erkenntnissen der rechtskonformen Umsetzung der Herstellung und Inverkehrbringung von Pyrolyseölen der Syncycle Operations GmbH aus einer Produktionsanlage des chemischen Kunststoffrecyclings in Kühnsdorf in Österreich.

1 ROLLE DES CHEMISCHEN RECYCLINGS IM KUNSTSTOFFKREISLAUF

Die Syncycle Operations GmbH verfügt am Standort Kühnsdorf über eine Pilotanlage zum Kunststoffrecycling, in der durch Pyrolyse Kunststoffabfälle thermo-chemisch behandelt und dabei Pyrolyseöle hergestellt werden. Die Produkte des Recyclingprozesses sollen als Rohstoff für Raffinerien und in weiterer Folge der neuerlichen Herstellung von Kunststoffen dienen.
Diese Art von Recyclingverfahren wird in der einschlägigen Fachliteratur den Verfahren des chemischen Recyclings von Kunststoffen zugeordnet (vgl. Abb. 1).

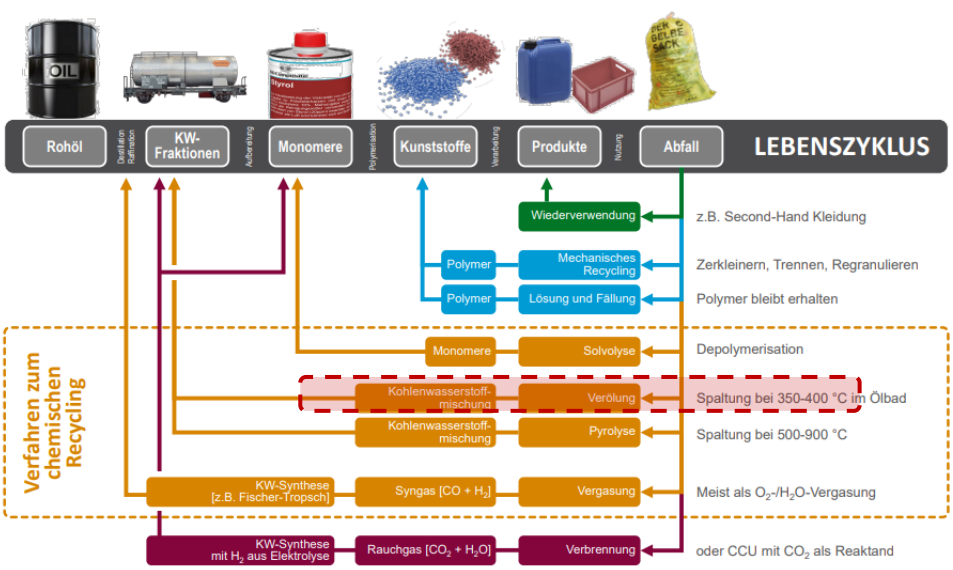


Abb. 1: Verfahren des thermochemischen Kunststoffrecyclings (Quicker & Seitz, 2024) (modifiziert durch Hervorhebung der Pyrolyse)

Das gegenständliche Verfahren ist im Sinne der EU-Verpackungsverordnung (Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2024) als sogenanntes „*hochwertiges Recycling*“ zu kategorisieren, weil es entspr. Artikel 3, Ziffer 41 ein Verfahren darstellt …

> *„ … aus dem recycelte Materialien von — auf der Grundlage bewahrter technischer Merkmale — der gleichen Qualität wie jener der Ausgangsstoffe gewonnen werden, die als Ersatz für Primärrohstoffe für Verpackungen oder andere Nutzungen, bei denen die Qualität des recycelten Materials erhalten bleibt, verwendet werden;“*

Eine aktuelle Studie zeigt, dass die Verfügbarkeit an Rezyklaten im Business-as-Usual Szenario sowie auch im Advanced Szenario unter Berücksichtigung signifikanter zusätzlicher Investitionen in das mechanische Recycling und der Etablierung des chemischen Recyclings in Deutschland nicht ausreichend sein wird, um den erforderlichen Bedarf zur Deckung der Mindestrecyclat-Quoten sicherzustellen (vgl. Abb. 2). Die Versorgungslücke im Jahr 2030 wird auch im Advanced Szenario mit mehr als 300 kt angegeben (BKV GmbH, 2025).

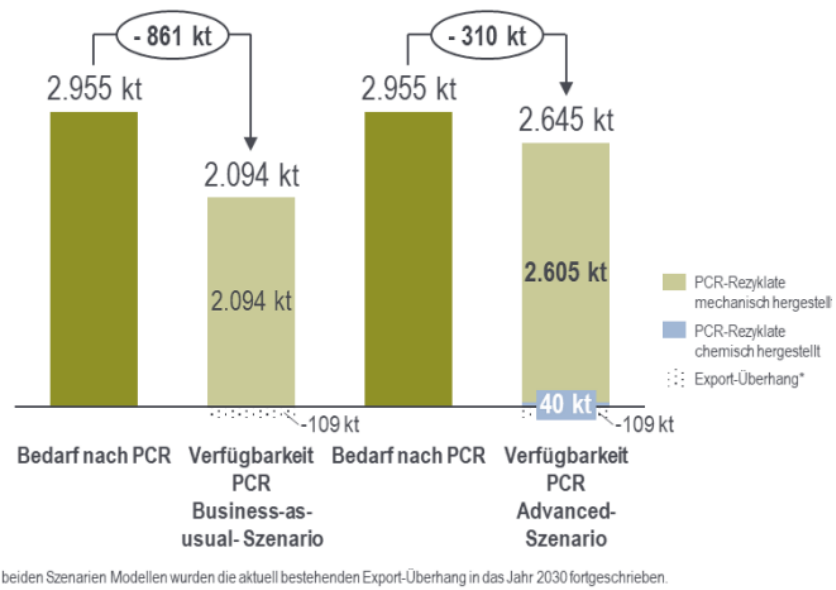


Abb. 2: Bedarf und Versorgungslücke von Post-Consumer Recyclaten (PCR) in Deutschland im Jahr 2030 (BKV GmbH, 2025)

Ohne signifikante Zusatzinvestitionen in mechanisches und chemisches Recycling entsteht in Deutschland für das Jahr 2030 somit eine Versorgungslücke von knapp 30 %. Es wird im vorliegenden Beitrag Ähnliches für Österreich unterstellt. Vor diesem Hintergrund kommt einer beschleunigten Implementierung von Kunststoffrecyclinginfrastruktur sowie rechtssicheren Lösungen für das Inverkehrbringen der Produkte des Kunststoffrecyclings eine hohe Bedeutung zu.

2 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Die Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) (Europäisches Parlament und Rat, 2008) trifft im Artikel 6 zum Ende der Abfalleigenschaft folgende Festlegungen:

„(1) Die Mitgliedstaaten treffen geeignete Maßnahmen, um sicherzustellen, dass Abfälle, die ein Recyclingverfahren oder ein anderes Verwertungsverfahren durchlaufen haben, nicht mehr als Abfälle betrachtet werden, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind

a) Der Stoff oder der Gegenstand soll für bestimmte Zwecke verwendet werden;
b) es besteht ein Markt für diesen Stoff oder Gegenstand oder eine Nachfrage danach;
c) der Stoff oder Gegenstand erfüllt die technischen Anforderungen für die bestimmten Zwecke und genügt den bestehenden Rechtsvorschriften und Normen für Erzeugnisse und
d) die Verwendung des Stoffs oder Gegenstands führt insgesamt nicht zu schädlichen Umwelt- oder Gesundheitsfolgen.“

Diese Vorgaben waren in die nationale Gesetzgebung umzusetzen. In Österreich erfolgte dies im Rahmen des Abfallwirtschaftsgesetzes 2002 (AWG, 2002). Wobei hier anders als z.B. in Deutschland die Abfallendekriterien der Abfallrahmenrichtlinie als Voraussetzung für die Ermächtigung des Umweltministers für den Erlass einer Abfallendeverordnung rechtlich verankert wurden. Eine für Pyrolyseöle aus dem chemischen Recycling anwendbare Abfallendeverordnung wurde in Österreich bisher nicht erlassen.

Somit verbleibt nach österreichischem Recht die Verwertung von Pyrolyseölen als Abfall und deren Abfallende unmittelbar bei der Substitution von Rohstoffen. Dieser Weg erfordert die Weitergabe der Pyrolyseöle aus der Kunststoffverwertungsanlage als Abfall an befugte Abfallsammler. Für (grenzüberschreitenden) Transport und Einstufung sind in weiterer Folge abfallrechtliche Bestimmungen (Begleitschein, ggf. Notifizierung, …) maßgeblich.

Ein schwieriger und nicht immer von Erfolg gekrönter Weg ist die behördliche Feststellung des Abfallendes für Recyclate durch einen Feststellungsbescheid der zuständigen Behörde, der dem Inverkehrbringer Rechtssicherheit für das Inverkehrbringen der Pyrolyseöle als Produkt bietet.
Der Vollständigkeit halber ist festzuhalten, dass Pyrolyseöle, die als Produkt (und nicht als Abfall) in Verkehr gebracht werden, chemikalienrechtlichen Vorgaben unterliegen. Insbesondere ist in diesem Zusammenhang die REACH Verordnung (Europäisches Parlament und Rat, 2006) und die auf dieser Basis erforderliche REACH Registrierung von in Verkehr gebrachten Produkten sowie die CLP-Verordnung (Classification, Labelling & Packaging – CLP) (Europäisches Parlament und Rat, 2008) zu nennen.

Die EU-Verpackungsverordnung (Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2024) schafft den rechtlichen Rahmen für eine Steigerung der Recyclingquoten im Bereich von Verpackungsabfällen. Im Rahmen dessen wird in Artikel 3, Ziffer 41 auch der Begriff des „*hochwertigen Recyclings*“ als Verfahren definiert, …

„ … aus dem recycelte Materialien von — auf der Grundlage bewahrter technischer Merkmale — der gleichen Qualität wie jener der Ausgangsstoffe gewonnen werden, die als Ersatz für Primärrohstoffe für Verpackungen oder andere Nutzungen, bei denen die Qualität des recycelten Materials erhalten bleibt, verwendet werden;“

Der Artikel 48 stellt in Absatz 2 der EU-Verpackungsverordnung (Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2024) auch Anforderungen an die Mitgliedstaaten:

> *„(2) Um ein hochwertiges Recycling zu erleichtern, stellen die Mitgliedstaaten sicher, dass Systeme und Infrastrukturen für eine umfassende Sammlung und Sortierung vorhanden sind, um das Recycling zu erleichtern und die Verfügbarkeit von Kunststoffrohstoffen für das Recycling sicherzustellen. Solche Systeme und Infrastrukturen können einen bevorzugten Zugang zu recycelten Materialien für die Verwendung in Anwendungen ermöglichen, bei denen die hohe Qualität des recycelten Materials erhalten bleibt oder so verwertet wird, dass es weiter recycelt und auf dieselbe Weise und für eine ähnliche Anwendung mit einem möglichst geringen Verlust an Menge, Qualität oder Funktion verwendet werden kann.*

In Artikel 7 definiert die EU-Verpackungsverordnung (Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2024) darüber hinaus Mindestrezyklatanteile von aus Post-Consumer Abfällen gewonnenen Rezyklaten in Kunststoffverpackungen ab dem Jahr 2030 mit entsprechenden Anhebungen der verpflichtenden Rezyklatanteile ab dem Jahr 2040.

3 REALITÄT AM MARKT

Die Nachfrage der petrochemischen Industrie nach Pyrolyseölen als Rohstoffsubstitut für fossil basiertes Naphtha im Steamcracker ist aufgrund des durch Mindestrecyclateinsatzmengen induzierten Bedarfs hoch. Der bereitgestellte Sekundärrohstoff Pyrolyseöl wird hierbei mit Bio-Naphtha und fossil basiertem Naphtha gemeinsam dem Steamcracker aufgegeben und ersetzt somit im dargestellten Prozess fossil basiertes Naphtha (vgl. Abb. 3).

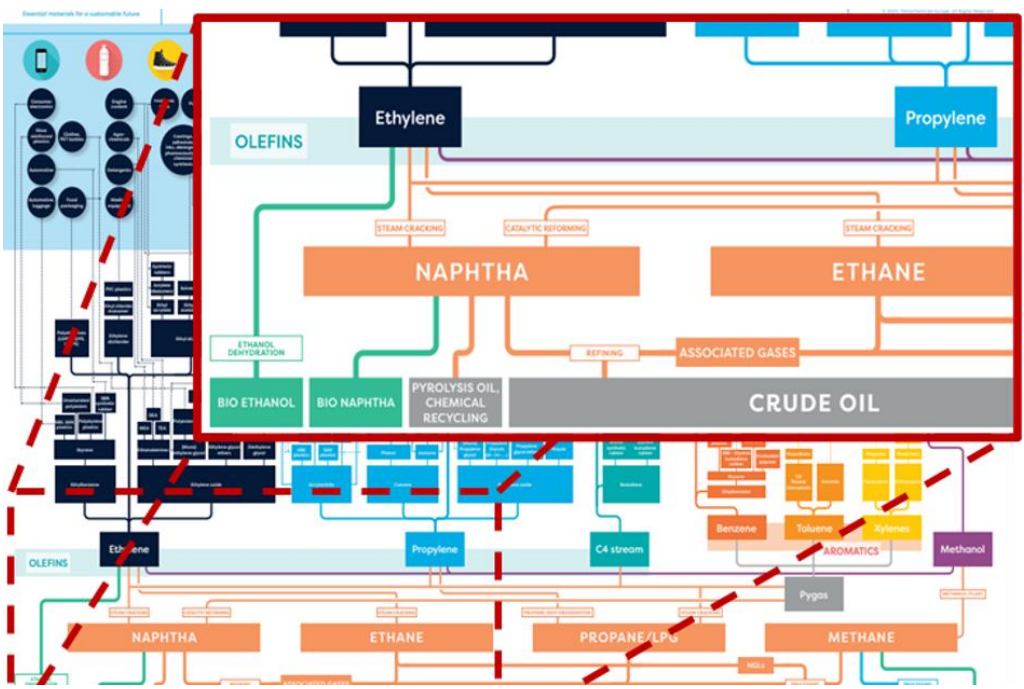


Abb. 3: Raffinerieprozess, Pyrolyseöl als Rohstoffsubstitut für fossil basiertes Naphtha (modifiziert) (Petrochemicals Europe, 2023)

Die Abnehmer von Pyrolyseölen aus der petrochemischen Industrie benötigen Pyrolyseöle mit Produktstatus, da sie nicht über Abfallsammler- und -behandlererlaubnisse verfügen und auch die Raffinerien nicht über den Konsens der Behandlung von Pyrolyseölen mit Abfalleigenschaft verfügen.

Pyrolyseöle mit Abfalleigenschaft müssten aufgrund der Stoffeigenschaften als gefährliche Abfälle klassifiziert werden. Die Folge daraus sind erhöhte Anforderungen an die Dokumentationspflichten, im Rahmen des Transports, der grenzüberschreitenden Verbringung sowie an die Übernehmer und Verwertungsanlagen derartiger Pyrolyseöle. Diese Aspekte stellen eine wesentliche Hürde bei der Umsetzung einer Kunststoff-Kreislaufwirtschaft dar.

4 PYROLYSEÖLE DER SYNCYCLE OPERATIONS GMBH

Die Pilotanlage der Syncycle Operations GmbH stellt Pyrolyseöl-leicht (POL) und Pyrolyseöl--schwer (POH) her. Mittels Feststellungsbescheid des Amts der Kärntner Landesregierung wurde das Abfallende für diese Pyrolyseöle – somit der Produktstatus - behördlich festgestellt (Amt der Kärntner Landesregierung, 2026).

Grundlage dieser Feststellung war unter anderem die Nachweisführung, dass die Produktqualität den technischen Spezifikationen möglicher Abnehmer entspricht und dafür Nachfrage am Markt besteht.

Darüber hinaus wurden die Pyrolyseöle als „intermediate“ über das REACH Konsortium „Plastic, waste, pyrolized, fractionation bottoms“ (EC Nummer 942-177-5) mit dem Lead Registrant PLASTICS ENERGY als Co-Registrant REACH registriert (ECHA, 2026).

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In gegenständlichem Beitrag wird die aktuelle Situation des chemischen Recyclings und deren Rolle im Rahmen des Übergangs zur Kreislaufwirtschaft diskutiert. Die Analyse des Recyclingmarkts für Kunststoff macht klar, dass 1) dem chemischen Recycling eine wichtige Rolle bei der Umsetzung bereits definierter Zielsetzungen zukommt und 2) eine wesentliche Beschleunigung bei der Implementierung von Recyclinginfrastruktur erforderlich ist, um bereits festgelegte Ziele im Bereich von Mindestrecyclatquoten in Produkten zu erreichen.

Abnehmer aus der petrochemischen Industrie für Pyrolyseöle erwarten sich Pyrolyseöle mit Produktstatus, dafür ist einerseits Rechtssicherheit durch eine abfallrechtliche Feststellung des Abfallendes sowie eine REACH Registrierung erforderlich.

Aktuell ist im Rahmen einer Deregulierungsinitiative auch eine Reform im Bereich des Abfallendes für Abfälle in Österreich in Ausarbeitung. Es wäre wünschenswert, wenn durch diese Initiative die Hemnisse für das Inverkehrbringen von hochwertigen Recyclaten aus dem chemischen Kunststoff-Recycling gesenkt und somit die Etablierung einer Kunststoff-Kreislaufwirtschaft gestärkt werden könnte.

LITERATURVERZEICHNIS

AMT DER KÄRNTNER LANDESREGIERUNG (2026). Feststellungsbescheid – Feststellungsverfahren zur Nichtabfalleigenschaft von Pyrolyseöl, Zahl: 08-ABH-9757/2022-252, 10.06.2026, Klagenfurt.

BKV GmbH (Hrsg.) (2025). Status quo und Prognose des Bedarfs und der Verfügbarkeit von Post-Consumer-Rezyklaten im Jahr 2030, bearbeitet von CONVERSIO Market & Strategy GmbH.

BUNDESGESETZ DES BUNDESMINISTERS FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2002). Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002), StF: BGBl. I Nr. 102/2002 i.d.g.F., Wien.
ECHA (2026): Decision on your registration, EC-number 942-177, 23.03.2026, Helsinki, Finland.
EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT (Hrsg.) (2006). Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), Brüssel, 18. Dezember 2006.
EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT (2008). Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien.
EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT (Hrsg.) (2008). Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (CLP), Brüssel, 16. Dezember 2008.
EUROPÄISCHES PARLAMENT UND EUROPÄISCHER RAT (2024). VERORDNUNG (EU) 2025/40 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 vom 19.12.2024.
PETROCHEMICALS EUROPE (2023). Petrochemistry Flow-Chart 2023, Version 2
QUICKER, P. & SEITZ, M. (2024). Abschlussbericht "Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecyclings", Texte 154/2024, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, November 2024

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/

Carbonation from by-products from the metal industry

Ann-Kathrin Hans[1,2], Andreas Neumann[1,3] & Ralf Wehrspohn[1,3]
[1)] ITEL – Institute of Technologies and Economics of Lithium, Halle (Saale), Germany
[2)] Institute of Chemistry, Inorganic Chemistry, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, Halle (Saale), Germany
[3)] Institute of Physics, Department Microstructure-based Material Design, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, Halle (Saale), Germany

ABSTRACT: In recent decades, there has been a significant increase in emissions and byproducts, which have to be disposed safely. However, landfilling these byproducts is not the only option; rather, the goal is to find further uses for them. One example is the use of slag from the steel industry in combination with CO_2 to produce stable carbonates, which both enable CO_2 storage and find applications in other industrial sectors. The carbonation of steel slag is well researched. It is known that it worked well under mild conditions. That is the reason to look forward to other slags. This method can also be applied to other types of slag, such as those from the copper industry. Initial trials in this area have yielded positive results which have been analyzed by different methods like XRD.

1 INTRODUCTION

In last years, the efforts of mitigating climate change by reduction of CO_2 emissions have increased significantly. This finding is also reflected in the statistics, which document a significant increase in CO_2 emissions from 1950 to 2022. This issue provides an opportunity to address the topic of CO_2 reduction or storage. The following models are available for this application: Carbon capture and storage (CCS), carbon capture and utilization (CCU), and carbon dioxid removal (CDR). A closer look at CCS and CCU processes reveals that they utilize fossil carbon dioxide generated by industrial processes or in power plants. In CCU, this CO_2 is converted into various carbon-based products. Relevant concepts in this context include Power-to-X, e-fuels, and chemical feedstocks. A distinctive feature is that CO_2 can also be captured from the atmosphere. In CCS, fossil carbon is sequestered in a carbon sink. These materials can be classified into various categories, including biological, geological, and construction materials. In this sense, byproducts of the metal industry - such as steel and copper - can also be counted among carbon sinks. The term carbonation was coined to describe this process.

A mineral-active material reacts with CO_2 to form a stable carbonate, this reaction is called carbonation. In this context, the following minerals may be relevant: Olivine, serpentine, wollastonite, portlandite. The present investigations show that these may be present in various materials such as cement paste, ash, or slag.[1]

An analysis of the composition of metallurgical by-products, also known as slag, reveals the presence of silicate compounds. Consequently, the following reaction equation results:

$$M_2SiO_4 + 2\ CO_2 \rightarrow 2\ MCO_3 + SiO_2 \quad (1)$$

(M = Mg, Ca, Fe) (exothermic)

It is evident that this carbonation can also occur under natural conditions. Analysis shows that, under the given conditions, the process proceeds very slowly. However, this reaction has the advantage of being able to store CO_2 for a period of over 1 000 years.[2] The carbonation of slag is a field of research that is currently of significant relevance. In this context, two specific types of slag are considered: steel slag (SS) and copper slag (CS). It can be observed that the two subject

areas differ significantly in terms of the available literature. The carbonation of SS has been studied significantly more extensively than that of CS. Therefore, it is essential to compare the carbonation of SS and CS.

2 RESULTS AND COMPARISION

When considering the steel industry as a whole, it becomes apparent that an annual production volume of around 1.85 billion tons of crude steel is achieved. Furthermore, steel production generates approximately 0.6 t of slag per 1 t of steel. Abb. 1 a) illustrates the production pathway of the SS. It should be noted that a diversification of slag types can be observed. In this context, blast furnaces (BF), basic oxygen furnaces (BOF/LD), and electric arc furnaces (EAF) are identified as relevant slags.

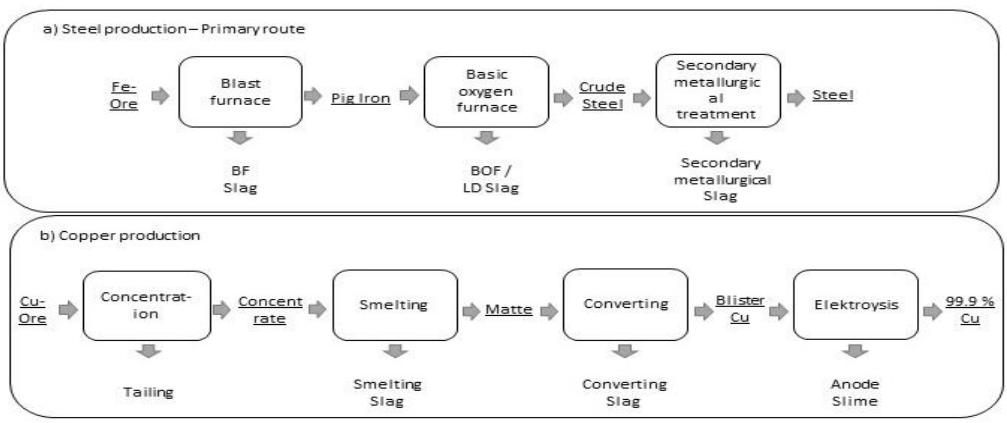


Abb. 1: The schematic diagram illustrates the two metallurgical processes and shows not only the by-products but also the individual steps. a) shows primary steel production, and b) shows primary copper production.

A comparison with the copper industry reveals that per year only 22 million tons of copper are produced globally. Production occurs in two ways: primary and secondary. Abb. 1 b) illustrates the primary process. Furthermore, it has been documented that copper production generates 2 - 3 t of slag per 1 t of copper.[3]

An analysis of the chemical composition of SS reveals that the main components consist of the following elements Ca, Mg, O. The only deviation is found in the BF slag, which has a lowest Iron content. Specific percentage ranges are shown in Tab. 1. Furthermore, there is a significant discrepancy compared to CS, which is characterized by its high iron content. However, differences in the mineralogical phase composition can be observed. The analysis of the steel slag revealed a significant concentration of di- and tricalciumsilicates and oxid phases, while the CSs exhibited a high concentration of fayalite, and magnetite.

Tab. 1: Overview of the composites of the different SSs and CS.

	CaO	**SiO_2**	**MgO**	**Al_2O_3**	**FeO**	
BF	40	36	10	10	-	Granulated wetly glassy
BOF/LD	>35	7-18	0.4-14	0.5-4	10-35	Crystalline, silicates
EAF	22-60	6-34	3-13	3-14	10-40	Crystalline, silicates
CS	2-3	25-33	0.8-0.9	3-4	54-62	

The following section examines carbonation in general, as illustrated in Equation 1. Analysis of the available data suggests that the MgO/CaO system exhibits better thermodynamic performance than iron silicates or oxides.

This process can be controlled using various parameters. Relevant influencing factors include temperature, pressure, the amount of CO_2, the type of carbonation, activation, the liquid-to-solid ratio (L/S), and other factors.[4]

First, the various types of carbonation are defined. A distinction is made between direct and indirect carbonation. In the indirect process, ion exchange is performed first, followed by the addition of CO_2. With regard to direct carbonation, a further classification can be made into dry and wet methods. In the case of direct carbonation, the slag is immediately mixed with CO_2. Only a single reaction step takes place. In this context, factors such as pressure, L/S, and Temperature can play a more significant role.[4]

An analysis of the scientific literature on the carbonation of SS reveals that a large number of publications on this topic have already been published. It can be observed that the temperatures and pressures involved are relatively mild (T = higher 20 °C, t = up to 24 h).[5] This hypothesis is supported by an analysis of the thermodynamic data.

However, an analysis of the scientific literature shows that there are very few studies on this topic. It was subsequently determined that direct carbonation works at high pressures and temperatures. Furthermore, it becomes clear that the reaction is of high yield because of the reflections of the diffractogram. The original slag (Abb. 2)) shows reflections of fayalite and after the carbonation the diffractogram shows siderite ($FeCO_3$) reflections, which shows that the reaction worked at a temperate of 150 °C within 48 h.

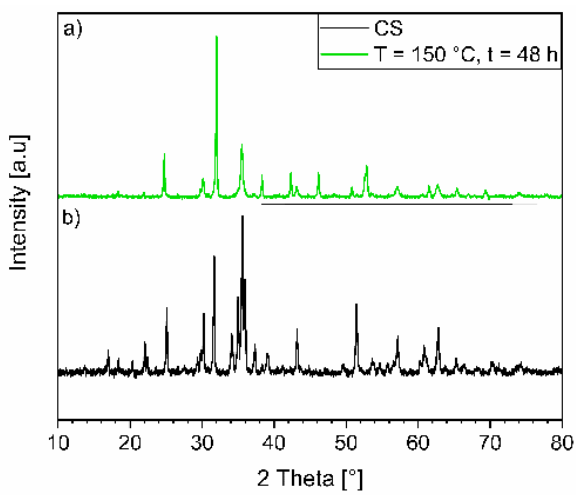
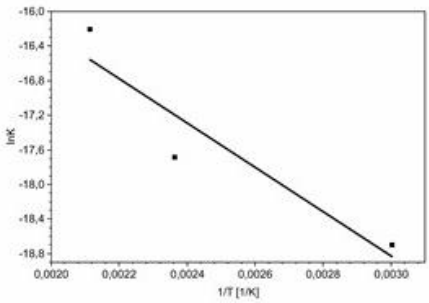


Abb. 2: Diffractogram of the CS (b)) and the carbonated CS (a)).

The preliminary activation energy is given as E_a = 21.3 kJ/mol. It should be noted, however, that this value has currently uncertainties, as it is based on only three data points (
Abb. 3).

Furthermore, it was found that prior mechanical activation of the CS is necessary to enable carbonation. However, further clarification is needed regarding whether particle size, specific surface area, or particle volume is of decisive importance.

a)



b)

Time [d]	Temp [°C]	Amount Siderite [%]
21	60	85
1	150	27
1	200	90

Abb. 3: a) Determination of the activation energy based on the carbonation rate depending on time and temperature (cf. table in b)).

3 CONCLUSION AND OUTLOOK

The carbonation of SS has been well studied, but not that of non-ferrous slags, particularly CS. In contrast to the initial experiments on the carbonation of CS, the parameters for SS are moderate. This phenomenon can be explained by thermodynamic data. Nonetheless, it is possible to accelerate the process by making adjustments to the parameters or the carbonation method.
To achieve more accurate results, as mentioned earlier, additional parameters must be tested.
If suitable parameters are found, consideration can be given to whether the carbonated copper slag can be used, for example, as a construction material in concrete.

REFERENCES

[1] X. Huang, J. Zhang, L. Zhang, “Accelerated carbonation of steel slag: A review of methods, mechanisms and influencing factors” *Construction and Building Materials* **2024**, *411*, 134603.
[2] E. Van Roijen, S. A. Miller, S. J. Davis, “Building materials could store more than 16 billion tonnes of CO2 annually” *Science* **2025**, *387*, 176–182.
[3] F. Abdul, A. Iizuka, H.-J. Ho, K. Adachi, E. Shibata, “Potential of major by-products from non-ferrous metal industries for CO2 emission reduction by mineral carbonation: a review” *Environ Sci Pollut Res* **2023**, *30*, 78041–78074.
[4] A. Baras, J. Li, W. Ni, Z. Hussain, M. Hitch, “Evaluation of Potential Factors Affecting Steel Slag Carbonation” *Processes* **2023**, *11*, 2590.
[5] G. Biava, L. E. Depero, E. Bontempi, “Accelerated Carbonation of Steel Slag and Their Valorisation in Cement Products: A Review” *Span. J. Soil Sci.* **2024**, *14*, 12908.

CONTACT

M. Sc. Ann-Kathrin Hans
ann-kathrin.hans@lithiuminstitut.de
CRR
ITEL – Institute of Technologies and Economics of Lithium
www.lithiuminstitut.com/

Verbesserung der SO_2-Abscheidung in bestehenden AGR-Anlagen durch hygroskopische Additive und Puzzolane aus Reststoffen

Joel da Silva Félix[1], Daniel Wohter[1] & Peter Quicker[1]
[1)] RWTH Aachen University, Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft (TEER), Aachen, Deutschland

Kurzfassung: Verschärfte Emissionsgrenzwerte und zunehmender wirtschaftlicher Druck erfordern eine höhere Abscheideleistung bestehender Rauchgasreinigungsverfahren in der thermischen Abfallbehandlung. Die gezielte Additivierung kalkbasierter Sorbentien stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, um die Abscheidung säurebildender Schadstoffe zu verbessern, ohne umfangreiche verfahrenstechnische Anpassungen an den Anlagen und Apparaten vorzunehmen. Im Rahmen der Arbeit wurden ausgewählte hygroskopische Additive sowie puzzolanische Zuschlagstoffe systematisch untersucht und deren Einfluss auf die SO_2-Abscheidung anhand von Durchbruchskurven bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Additivierung von Kalkhydrat und den Einsatz von Puzzolanen aus Reststoffen Verbesserungen der Abscheideleistung erzielt werden können. Daraus ergeben sich vielversprechende Ansatzpunkte zur Optimierung bestehender Abgasreinigungssysteme unter praxisnahen Bedingungen.

1 HINTERGRUND

Die thermische Abfallbehandlung (TAB) nimmt innerhalb der Kreislauf- und Abfallwirtschaft eine zentrale Rolle zur sicheren und umweltgerechten Entsorgung von Restabfällen ein. Durch die Verbrennung des heterogenen Abfallgemischs entsteht ein komplexes Emissionsprofil, das eine aufwändige nachgeschaltete Abgasreinigung (AGR) erfordert. Die Grenzwerte für bereits reglementierte Schadstoffe, wie die säurebildenden Gase Schwefeldioxid (SO_2), Chlorwasserstoff (HCl) oder Fluorwasserstoff (HF), werden regelmäßig verschärft, zuletzt mit der Novellierung der 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (17. BImSchV) 2024. Der Einsatz neu aufkommender Materialien und Chemikalien, die über industrielle oder private Anwendungen in den Restabfallstrom eingetragen werden, lässt zudem die Bildung neuer Schadstoffe erwarten. Stand der Technik zur Abscheidung säurebildender Gase ist der Einsatz von natrium- und/oder calciumbasierten Sorbentien (Verein Deutscher Ingenieure e. V. 2017). Aufgrund des hohen wirtschaftlichen Drucks für Anlagenbetreiber und des Inkrafttretens schärferer Grenzwerte gilt es, Optimierungspotenziale für vorhandene AGR-Anlagen auszuschöpfen (Neuwahl et al. 2019).
Ziel der Arbeiten war es, die Abscheideleistung bestehender Rauchgasreinigungsverfahren durch gezielte Additivierung kalkbasierter Sorbentien zu steigern. Vor dem Hintergrund verschärfter Emissionsgrenzwerte und begrenzter wirtschaftlicher Spielräume für Anlagenbetreiber besteht ein hoher Bedarf, die Leistungsfähigkeit vorhandener Systeme, ohne umfangreiche verfahrenstechnische Anpassungen zu erhöhen. Dabei stellen kalkbasierte Sorbentien aufgrund ihrer breiten Verfügbarkeit und ihres Potenzials zur Abscheidung säurebildender Schadstoffe eine zentrale Komponente der Rauchgasreinigung dar, weisen jedoch unter realen Rauchgasbedingungen häufig reaktive Limitierungen auf. Die Additivierung bietet einen vielversprechenden Ansatz, bekannte physikalische und chemische Wirkmechanismen gezielt zu verstärken (Karpf 2006) und damit bestehende Reaktionshemmnisse zu überwinden.

2 METHODIK

2.1 Materialauswahl und Sorbentien-Additivierung

Für die Materialauswahl wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, auf deren Basis eine Vorauswahl an Additiven erstellt wurde. Dabei wurden Reinstoffe, industrielle Rest- und Nebenprodukte sowie Naturprodukte berücksichtigt. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft lag der Fokus auf Reststoffen mit kaskadierten Nutzungsmöglichkeiten. Die Vorauswahl der Materialien erfolgte anhand der erwarteten physikalischen und chemischen Wirksamkeit. Die Priorisierung der Additive wurde in enger Abstimmung mit Industrievertretern im Rahmen eines projektbegleitenden Ausschusses vorgenommen, wodurch deren industrielle Relevanz und Anwendbarkeit sichergestellt wurde.
Zur Untersuchung der Wirkung hygroskopischer Additive wurden Calciumchlorid ($CaCl_2$), Natriumhydroxid (NaOH) und Natriumsilikat (Na_2SiO_3) ausgewählt. Ziel war es, die Partikelfeuchte der kalkbasierten Sorbentien zu erhöhen und dadurch die Abscheideleistung gegenüber SO_2 zu verbessern. Zusätzlich wurden Puzzolane aus Papierschlammasche (PS) oder aus Flugasche (FA) eines Braunkohlekraftwerks hergestellt und sowohl als eigenständige Sorbentien als auch als Additive zum Kalkhydrat untersucht.
Zur Charakterisierung der physikalischen Materialeigenschaften wurde die spezifische Oberfläche mittels Brunauer–Emmett–Teller-Analyse (BET) bestimmt. Ergänzend erfolgte eine bildgebende Bewertung der Partikelmorphologie anhand von Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen (REM). Die elementare Zusammensetzung der Materialien wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ermittelt.

2.2 Versuchsstand und Betriebsbedingungen

Zur reproduzierbaren Aufnahme von Durchbruchskurven wurde ein Versuchsstand im Technikumsmaßstab („MiniPlant“) errichtet, der die synthetische Erzeugung von Gasen zur Nachbildung industrieller Emissionsprofile ermöglicht. Der Versuchsstand (siehe Abb. 1) besteht im Wesentlichen aus den drei Modulen Gaskonditionierung, Wirbelschichtreaktor und Gewebefilter. Über die Gaskonditionierung wird ein Trägergas aus Sauerstoff (O_2), Stickstoff (N_2) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) gemischt, das anschließend bis zu einem Wassergehalt von etwa 30 Vol.-% befeuchtet und auf Temperaturen von bis zu 500 °C erhitzt werden kann. Daran schließt sich die Injektion der Schadgase SO_2 und HCl an, wobei praxisrelevante Konzentrationen (z. B. Klärschlammverbrennung) von jeweils über 5000 mg/m^3 eingestellt werden können. Die Einstellung der jeweiligen Volumenströme erfolgt über Flaschengase mittels Mass-Flow-Controllern (MFC). Der stationäre Wirbelschichtreaktor dient der intensiven Durchmischung von Feststoff (Batch von 100 g) und Gas zur Optimierung der Abscheidewirkung.
Als Versuchsparameter wurden praxisnahe Konzentrationen und Temperaturen gewählt. Die Temperatur des Wirbelschichtreaktors ($T_{Reaktor}$) betrug jeweils etwa 140 °C. Das Trägergas bestand aus 8 Vol.-% $O_{2,\,tr.}$, 11 Vol.-% $CO_{2,\,tr.}$, 25 Vol.-% H_2O sowie N_2 als Restgas. Die SO_2-Konzentration betrug ca. 2.500 mg/m$^3_{\,tr}$. Bei zusätzlicher Zugabe von HCl wurde ein molares Chlor/Schwefel-Verhältnis von 2 eingestellt. Daraus resultierte eine HCl-Konzentration von etwa 2.850 mg/m$^3_{tr}$.
Zur Bewertung der Abscheidewirkung der eingesetzten Sorbentien und Sorbensmischungen wurden Durchbruchskurven erstellt. Hierzu wurde die SO_2-Ausgangskonzentration (C_{SO2}) der SO_2-Eingangskonzentration ($C_{0,SO2}$) gegenübergestellt. Sobald das Verhältnis $C_{SO2}/C_{0,\,SO2}$ einen Wert von 0,9 erreicht, wird nur noch 10 % des einströmenden SO_2 abgeschieden. Dieser Zeitpunkt wird als vollständiger Durchbruch definiert und der zugehörige Zeitpunkt t_{90} als Kenngröße zur relativen Bewertung der Abscheideleistung herangezogen. Die SO_2-Eingangskonzentration wurde vor der Zugabe des jeweiligen Feststoffs anhand von Nullmessungen ohne Sorbens bestimmt. Zur Messung der Gaskomponenten wurde ein Infrarotfilterfotometer MCS100E (Fa. SICK) mit beheizter Entnahmesonde verwendet.

Der Umsatzgrad (siehe Gl. 1) des eingesetzten Kalkhydrats wurde auf Grundlage der während der Versuchsdauer von 30 Minuten abgeschiedenen SO_2-Menge bestimmt. Hierzu wurde die aus der Differenz zwischen SO_2-Eintritts- und Austrittskonzentration abgeschiedenen SO_2-Stoffmenge ins Verhältnis zur verfügbaren Stoffmenge des eingebrachten Kalkhydrats gesetzt (davon 91,5 % $Ca(OH)_2$ verfügbar gemäß Herstellerangabe). Eine Bestimmung des Umsatzgrades war für die Puzzolane nicht möglich, da die für die SO_2-Abscheidung verfügbare reaktive Stoffmenge des Calciums nicht quantifiziert wurde.

$$X_{Ca(OH)_2} = \frac{n_{SO_2,abgeschieden}}{n_{Ca(OH)_2,verfügbar}} \quad (1)$$

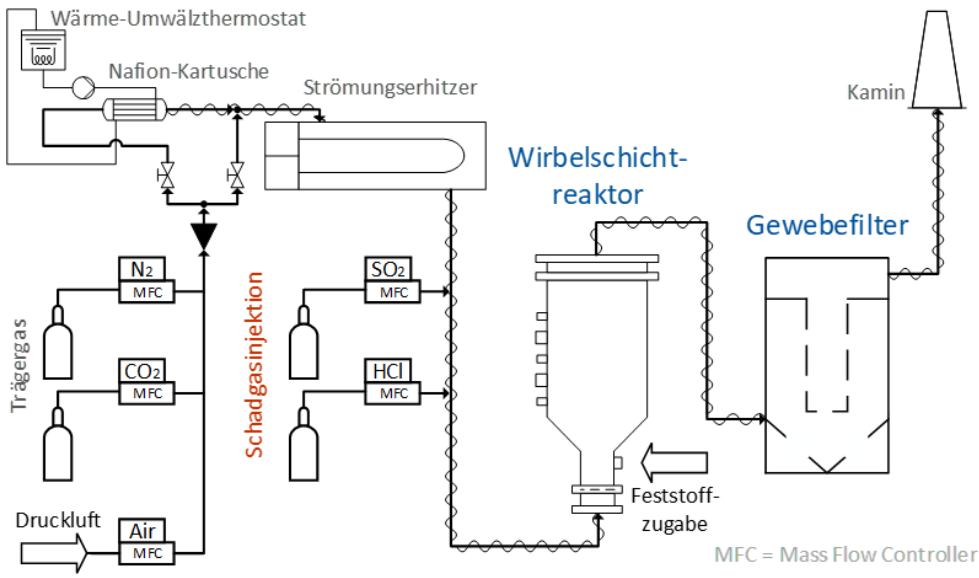


Abb. 1: Vereinfachtes R&I-Schema der Versuchsanlage zur Herstellung synthetischer Abgase

3 ERGEBNISSE

3.1 Sorbentien aus Reststoffen

Abb. 2 zeigt die morphologischen Veränderungen der Ausgangsmaterialien PS (a) und FA (b) infolge der thermisch unterstützten Hydratisierung bei 75 °C im Labormaßstab. Die spezifische Oberfläche der Papierschlammasche konnte dabei von 7,27 m²/g auf 49,18 m²/g gesteigert werden und übertrifft damit die des in der Versuchsreihe eingesetzten Kalkhydrats (ca. 18 m²/g) deutlich. Das aus Flugasche hergestellte Puzzolan erreichte mit 16,30 m²/g in etwa das Niveau des Kalkhydrats, ausgehend von einer spezifischen Oberfläche von 1,53 m²/g. Die REM-Aufnahmen bestätigen die ausgeprägten Veränderungen der Partikeloberfläche infolge der Aufbereitung der PS sowie der FA zur Herstellung von Puzzolanen im Labormaßstab.
Die Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse zeigen, dass das Puzzolan aus Papierschlammasche mit 39,60 Gew.-% einen deutlich höheren Calciumanteil aufweist als das aus Flugasche hergestellte Puzzolan (29,04 Gew.-%). Für das in der Versuchsreihe eingesetzte Kalkhydrat wurde ein Calciumgehalt von 55,65 Gew.-% bestimmt. Die übrigen Bestandteile der Puzzolane sind im Wesentlichen Silizium, Eisen und Aluminium, die eine überwiegend inerte Matrix bilden. Während das Puzzolan aus PS etwa 8 Gew.-% dieser inerten Bestandteile enthält, liegt der Anteil beim FA-Puzzolan bei etwa 17 Gew.-%.

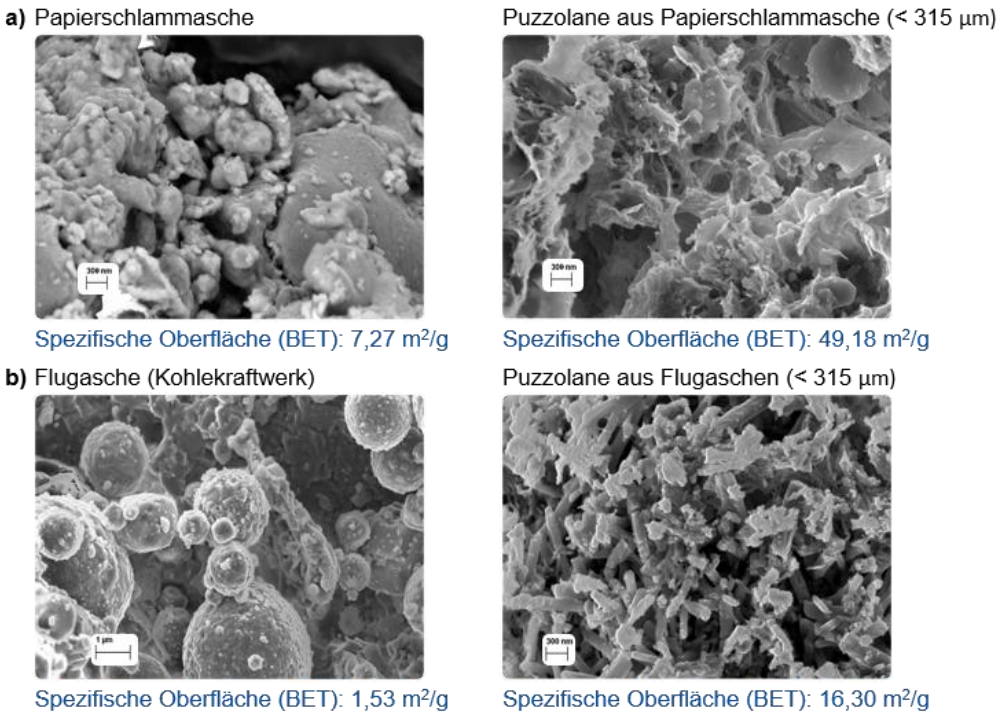


Abb. 2: REM-Aufnahmen: Ausgangsmaterial im Vgl. zu Puzzolanen aus a) PS b) FA (da Silva Félix et al. 2026)

3.2 Durchbruchskurven - puzzolanische Zuschlagstoffe & hygroskopische Stoffe

Zunächst wurde der Einfluss des Cl/S-Verhältnisses auf die SO_2-Abscheidung mit Kalkhydrat (KH) untersucht. Abb. 3 und Abb. 4 zeigen neben dem Einfluss der hygroskopischen Additive sowie der puzzolanischen Zuschlagstoffe auf die SO_2-Abscheidung auch die Referenzversuche mit reinem KH, wobei sich die Versuchsparameter lediglich hinsichtlich der HCl-Zugabe unterschieden (Cl/S-Verhältnis = 2). Während KH ohne HCl im Abgas nach 30 min lediglich ca. 8 % des zugeführten SO_2 abschied, wurden bei KH mit HCl im Abgas ca. 22 % erreicht. Dies spiegelt sich auch im Umsatzgrad des KH wider, der nach 30 min von 1,65 % im HCl-freien Abgas auf 2,52 % im HCl-haltigen Abgas anstieg. Relativ zur Referenz ohne HCl entspricht dies einer Verbesserung des Umsatzgrades von ca. 53 %.

Für die Untersuchung wurden entweder 100 g Kalkhydrat (KH) mit jeweils 2 Ma.-% des Additivs oder 100 Ma.-% des jeweiligen Puzzolans verwendet. Versuche mit 100 Ma.-% reinem KH dienten als Referenz. Durch die Additivierung mit hygroskopischen Stoffen konnte in allen untersuchten Fällen eine Verbesserung der Abscheideleistung beobachtet werden. Nach einer Versuchsdauer von 30 min wurde eine Erhöhung des t_{90}-Werts um mehr als 40 % gegenüber dem Referenzsorbens (100 Ma.-% KH ohne HCl) erreicht. Das Abflachen der Konzentrationsanstiege bei Einsatz von $CaCl_2$, NaOH und Na_2SiO_3 deutet auf einen verbesserten Stofftransport hin. Die berechneten Umsatzgrade bestätigen den positiven Einfluss der hygroskopischen Additive. Die größte relative Verbesserung gegenüber KH (ohne HCl) wurde für NaOH mit ca. 38 % ermittelt, gefolgt von $CaCl_2$ mit ca. 21 % und Na_2SiO_3 mit ca. 15 %.

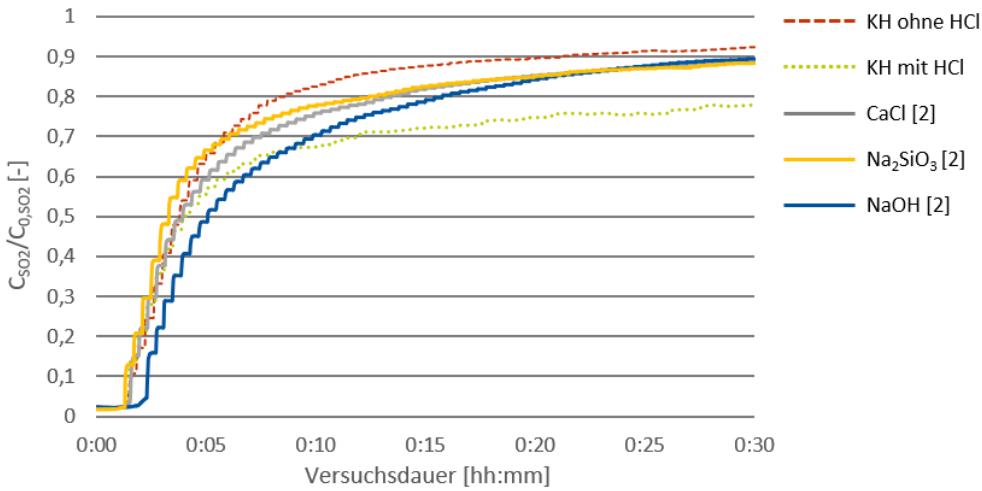


Abb. 3: SO_2-Durchbruchskurven bei Additivierung von Kalkhydrat mit hygroskopischen Stoffen sowie Referenzversuche mit Kalkhydrat in HCl-freiem und HCl-haltigem Abgas; bei $T_{Reaktor}$ = 140 °C, $O_{2,\,tr.}$ = 8 Vol.-%, $CO_{2,\,tr.}$ = 11 Vol.-%, H_2O = 25 Vol.-%, $SO_{2,\,tr.}$ = 2.500 mg/m³ ($HCl_{\,tr.}$ = 2.850 mg/m³); Massenanteil in [Ma.-%] bezogen auf jeweils 100 g Kalkhydrat

Der Einsatz von FA als Additiv zeigte einen positiven Effekt auf die Abscheideleistung mit einer Erhöhung des t90-Werts um mehr als 40 %, während die Verwendung als eigenständiges Sorbens zu einer Reduktion der Abscheideleistung um etwa 37 % führte. Dieses Verhalten ist auf den vergleichsweise geringen Calciumgehalt zurückzuführen. Das Puzzolan aus PS verbesserte die Abscheideleistung als eigenständiges Sorbens um etwa 17 %. Als Additiv wurde hingegen ein früherer Durchbruch (ca. 24 %) beobachtet. Der verzögerte Konzentrationsanstieg bei höheren PS-Anteilen weist auf eine verbesserte Verfügbarkeit der reaktiven Calciumzentren hin.

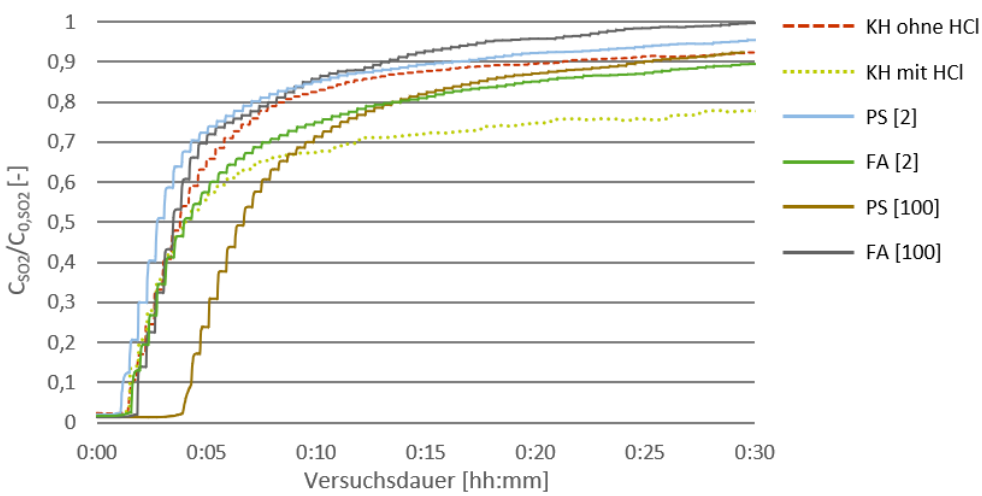


Abb. 4: SO_2-Durchbruchskurven bei Einsatz puzzolanischer Zuschlagstoffe aus Papierschlammasche (PS) bzw. Flugasche (FA) sowie Referenzversuche mit Kalkhydrat in HCl-freiem und HCl-haltigem Abgas; bei $T_{Reaktor}$ = 140 °C, $O_{2,\,tr.}$ = 8 Vol.-%, $CO_{2,\,tr.}$ = 11 Vol.-%, H_2O = 25 Vol.-%, $SO_{2,\,tr.}$ = 2.500 mg/m³ ($HCl_{\,tr.}$ = 2.850 mg/m³); Massenanteil in [Ma.-%] bezogen auf jeweils 100 g Kalkhydrat

4 AUSBLICK

Die vorgestellten Ergebnisse stellen erste Indikatoren für das Potenzial der Additivierung kalkbasierter Sorbentien dar und bedürfen einer weiterführenden Validierung im Technikumsmaßstab. Zukünftige Arbeiten konzentrieren sich auf die vertiefte Untersuchung der zugrunde liegenden physikalischen und chemischen Wirkmechanismen, um die beobachteten Effekte besser einordnen zu können. Parallel dazu sollen die Ergebnisse auf industrielle Anwendungen übertragen werden. Hierfür werden bereits Versuche an der Wirbelfeuerung des Lehr- und Forschungsgebiets TEER geplant, die eine Monoklärschlammverbrennung mit anschließender Rauchgasreinigung ermöglicht (Peters, Schnell, Stark, & Quicker, 2025). Dort werden hergestellte Sorbentien oder Sorbensmischungen unter realen Bedingungen erprobt.

Das Projekt Ca-ADD (22821 BG) wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über das Programm der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) für zwei Jahre (2023 - 2025) gefördert.

Dieser Beitrag ist weitestgehend text- und vollständig inhaltgleich mit dem folgenden Artikel: Da Silva Félix, J.; Wohter, D.; Quicker, P. (2026): Optimierung der industriellen Rauchgasreinigung durch Additivierung kalkbasierter Sorbentien zur SO2-Abscheidung. doi: 10.15203/99106-187-8

LITERATURVERZEICHNIS

da Silva Félix, J., Wohter, D., & Quicker, P. (2026). Optimierung der industriellen Rauchgasreinigung durch Additivierung kalkbasierter Sorbentien zur SO2-Abscheidung. *15. DGAW-Wissenschaftskongress.*

Karpf, R. (2006). *Prozessoptimierung an kalkbasierenden Rauchgasreinigungsverfahren.* Seminar 435918: VDI Wissensforum .

Neuwahl, F., Cusano, G., Gómez Benavides, J., Holbrook, S., & Roudier, S. (2019). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration; EUR 29971 EN.* Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/761437

Peters, E., Schnell, M., Stark, K., & Quicker, P. (2025). Betriebserfahrungen aus der kleinsten Klärschlammverbrennungsanlage der Welt. *Wasser und Abfall*. Von https://www.springerprofessional.de/betriebserfahrungen-zur-verbrennung-von-klaerschlamm-im-kleinstm/51696572 abgerufen

Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2017). *VDI 3928 - Abgasreinigung durch Chemisorption.* Berlin: Beuth Verlag.

KONTAKT

Joel da Silva Félix, M. Sc.
dasilvafelix@teer.rwth-aachen.de
+49 241 80-96575
Arbeitsgruppe Emissionsminderung/Wissenschaftlicher Mitarbeiter
RWTH Aachen University/ Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft (TEER)
www.teer.rwth-aachen.de

Das Kreislaufzentrum der Zukunft

Verena Schmid[1], Josef Adam[1], Roland Pomberger[1], Roland Wernik[2], Thomas Maierhofer[2] & Stefan Schnöll[2]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] Salzburg Wohnbau GmbH, Salzburg, Österreich

KURZFASSUNG: Das Kreislaufzentrum der Zukunft ist eine moderne, dem Stand der Technik entsprechende Weiterentwicklung eines Altstoffsammelzentrums, Recyclinghofs oder vergleichbarer Anlagen. Hier treffen Bürger und Bürgerinnen mit der Abfallwirtschaft, speziell der Alt- und Problemstoffsammlung zusammen. Die bestehenden Standorte in Österreich weisen starke regionale Unterschiede auf, da es keine bundesweite Vorgabe für diese gibt. Für das Bundesland Salzburg mit seinen zum großen Teil veralteten Recyclinghöfen wurde im Besonderen ein Konzept für zukunftsfitte Kreislaufzentren entwickelt, das die Ebenen der Konzeption, des Baus, der Organisation und der Kommunikation beleuchtet. In der letztgenannten werden Ansätze aus der Abfallpsychologie und -soziologie implementiert, um die Bürger und Bürgerinnen bestmöglich zu informieren und das Kreislaufzentrum als Ort der Begegnung und Bewusstseinsbildung zu forcieren.

1 EINLEITUNG

Altstoffsammelzentren (ASZ), Recyclinghöfe, Müllplätze, Ressourcenparks und ähnliche Standorte sind Schlüsselorte, an denen es zu Berührungen zwischen Bürgern sowie Bürgerinnen und der Abfallwirtschaft kommt. Im österreichischen Abfallsammelsystem existiert keine einheitliche gesetzliche Vorgabe oder Regelung für diese Einrichtungen. Dementsprechend variieren die Systeme und Organisationsformen in den neun Bundesländern.
Für das Bundesland Salzburg ist ein Konzept für die Transformation von bestehenden, teils veralteten Recyclinghöfen zu modernen, zukunftsorientierten Kreislaufzentren gewünscht. Die rund 120 momentan bestehenden Anlagenstandorte weisen zu einem großen Teil Modernisierungsbedarf auf, da die Bedürfnisse der Nutzer und Nutzerinnen, die komplexe Marktsituation bei den Altstoffen, die Anforderungen an die Sammlung im gesetzlichen und technischen Bereich und die Recyclingziele der Europäischen Union einem stetigen Wandel unterworfen sind (Kreuzeder et al., 2021). Gegenwärtige Altstoffsammelzentren sind häufig veraltet, schlecht ausgestattet, zu klein für die steigende Anzahl der zu sammelnden Fraktionen und weisen Sicherheitsrisiken beispielsweise bei der Problemstoffsammlung auf (vgl. Abbildung 1).



Abb. 1: Problemstofflagerung mit Gefahrenpotenzial.

Durch Erhebung des Standes der Technik im Bereich von Altstoffsammelzentren in Salzburg und über die Landesgrenzen hinaus und die Erarbeitung sowie Sammlung neuer Ideen im Rahmen eines Workshops wurde ein Konzept für ein lokales Kreislaufzentrum der Zukunft erarbeitet. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Kommunikation des Nutzens eines solchen Projektes an den Bürger/ die Bürgerin unter Verwendung von Methoden aus der Abfallpsychologie und -soziologie gelegt. Die Erkenntnisse sollen zukünftig in die Planung von Kreislaufzentren in interessierten Gemeinden einfließen.

2 METHODIK UND DURCHFÜHRUNG

2.1 Erhebung des Ist-Standes

Das Bundesland Salzburg stellt seinen Gemeinden Leitlinien für die Errichtung und Bewilligung von Recyclinghöfen sowie die Problemstoffsammlung zur Verfügung, um in Behördenverfahren bei Umbau- und Neubauvorhaben eine Orientierungshilfe und Entscheidungsgrundlage bieten zu können. Zusätzlich werden Checklisten (z.B. für die Problemstoffsammlung), Infoblätter (z.B. für Elektrogeräte und Batterien), ein Muster-Brandschutzplan, eine EAG-Zuordnungsliste und ein Recyclinghof-Handbuch mit Farbcodierung der Abfallarten angeboten (Land Salzburg, 2025).

In Oberösterreich organisiert das Landes-Abfallverwertungsunternehmen (LAVU) bundeslandweit die Planung, Betriebsführung und das Personal aller 177 Altstoffsammelzentren. Die über 80 verschiedenen angenommenen Alt- und Problemstoffe werden gesammelt verwaltet und verwertet. Die erzielten Erlöse dienen dem Ausbau der ASZ-Infrastruktur und der Entlastung der Abfallgebühren (O.Ö. Landes-Abfallverwertungsunternehmen GmbH, 2025).

Digitale Lösungen in der Abfallwirtschaft stellen den Fokus der Wiegon GmbH aus Tirol dar. Durch die Digitalisierung von Wertstoffhöfen soll es möglich werden, dass die Bürger und Bürgerinnen immer dann ihren Abfall entsorgen können, wenn dieser anfällt und die Menschen Zeit für die Anlieferung haben (Öffnungszeiten rund um die Uhr). Das modular aufgebaute Angebot enthält verschiedene Stufen: eine Einstiegsstufe, eine weiterführende Aufbaustufe und eine vollautonome Stufe. Letztere beinhaltet eine Abgabeüberwachung, eine Leitstelle, Bezahlsysteme, Fehlwurfmanagement, ein visuelles Leitsystem, eine autonome Abgabestelle, einen autonomen Müllsackautomat sowie ein autonomes Oberflur- und Unterflursystem (Wiegon GmbH, 2026).

Das Land Steiermark setzt in der Altstoffsammlung auf das Konzept der Ressourcenparks (RP). Diese Altstoffsammelzentren verfügen über eine moderne, technische Ausstattung, ausreichend dimensionierte Lager- und Manipulationsflächen, eine hohe Sortiertiefe und eine professionelle, kundenorientierte Führung des Betriebes. Am Gelände sollen ein Reuse-Shop betrieben und Möglichkeiten für Veranstaltungen wie Repair-Cafés geboten werden. Alternativ sind Kooperationen mit geeigneten Partnerunternehmen im Bereich Reuse denkbar. Pro AWV-Verbandsgebiet soll mindestens ein Ressourcenpark in einer gemeindeübergreifenden Kooperation mit einem Mindesteinzugsgebiet von 20.000 Einwohnern errichtet werden. Eine verkehrsgünstige Lage der Anlagen mit einer Erreichbarkeit in maximal 20 Minuten für 98 % der Bevölkerung ist angedacht. Geöffnet sollen die Sammelzentren an mindestens fünf Tagen in der Woche sein (Land Steiermark, 2025).
Entsprechend dieser ASZ-Strategie wurden bereits mehrere Ressourcenparks in der Steiermark erfolgreich umgesetzt. Beispielhaft sind als Vorbildanlagen der RP Graz und die beiden RPs im Verbandsgebiet des AWV Leibnitz zu erwähnen. Dort sind noch zwei weitere Anlagen in Planung.

2.2 Workshop

In einem als „World Café“ gestalteten Workshop wurden neue Ideen und Rahmenbedingungen für ein Kreislaufzentrum der Zukunft in Salzburg von Vertretern aus der universitären Forschung, dem Wohnbaubereich und von interessierten Gemeinden diskutiert und erarbeitet. Die gegenständlichen Fragen waren folgende:

- Was brauchen wir in einem Kreislaufzentrum?
- Welche Herausforderungen ergeben sich für die einzelnen Stakeholder?
- Welche Chancen bieten sich für eine Gemeinde durch ein Kreislaufzentrum?
- Mein Kreislaufzentrum 2035!
- Nutzersicht – Was ist interessant?
- Erfolgsfaktoren – Was macht es erfolgreich?

Die Ergebnisse aus diversen Diskussionsrunden sind zusammen mit den Erkenntnissen aus der Erhebung des Ist-Standes in das Konzept des Kreislaufzentrums der Zukunft eingeflossen. Insbesondere die Ressourcenparks in der Steiermark können als Vorbildanlagen betrachtet werden.

3 KONZEPT „KREISLAUFZENTRUM DER ZUKUNFT“

Das Kreislaufzentrum der Zukunft wird auf unterschiedlichen Ebenen der Gestaltung betrachtet. Diese sind die Konzeptionsebene, die Bauebene, die Organisationsebene und die Kommunikationsebene (siehe Abbildung 2).



Abb. 2: Ebenen der Gestaltung eines Kreislaufzentrums.

3.1 Die Konzeptionsebene

Die Umsetzung eines Kreislaufzentrums in einer Gemeinde, einer Gemeindegruppe oder einem Verband muss in das bestehende Gesamtkonzept und die laufende Projekttätigkeit eingebunden werden. Potenzielle Partnergemeinden und Beteiligungen sind bei einer interkommunalen Zusammenarbeit festzulegen. Idealerweise wird eine überregionale Einbindung der neuen Anlage in die bestehenden Strukturen realisiert. Die entstehenden Kosten müssen in die laufenden Gebühren eingebunden werden, wobei abzuschätzen ist, ab wann mit einem rentablen Betrieb des Kreislaufzentrums gerechnet werden kann.
Den interessierten Gemeinden, die ein Kreislaufzentrum umsetzen möchten, wird ein „Bauteilkasten“ mit einer Auflistung von Elementen auf allen Ebenen der Gestaltung zur Verfügung gestellt. Weiters beinhaltet dieser „Werkzeugkoffer“ Empfehlungen, welche Elemente für welche

Größenordnungen der Anlagen als sinnvoll und umsetzbar erachtet werden. Es macht einen Unterschied, ob eine Gemeinde allein, ein Zusammenschluss einiger Gemeinden oder eine Stadt/ ein Verband eine Anlage errichtet.
Nachfolgend werden einige Elemente auf der Bau-, Organisations- und Kommunikationsebene angeführt.

3.2 Die Bauebene

Der erste Punkt, der vor dem Bau beachtet werden muss, ist die Wahl eines geeigneten, verkehrsgünstigen Standortes, der innerhalb einer akzeptablen Zeitspanne (z.B. 20 min wie in der ASZ-Strategie der Steiermark) für den überwiegenden Teil der Bevölkerung erreicht werden kann. Weiters bietet die Nähe zu Einkaufsmöglichkeiten oder Behörden die Option, Besorgungs- und Entsorgungswege zu verbinden. Das Terrain und eventuell vorhandene Bausubstanz können und sollen genutzt werden (z.B. für eine Sägezahnrampe). Ein ansprechendes Design und ein einheitliches Erscheinungsbild von Kreislaufzentren fördern die Attraktivität. Empfehlenswert ist eine Gliederung des Areals in Zonen, beispielsweise gibt es im RP Graz eine Wertstoff-, Reuse-, Reststoff- und Problemstoffzone. Für die Lagerung und Manipulation der Abfälle sind ebenfalls Flächen einzuplanen. Räumlichkeiten für Veranstaltungen, soziale Interaktion und das Personal dürfen nicht fehlen. Bei größeren Anlagen wäre die Trennung von Individual- und Betriebsverkehr von Vorteil, um gegenseitige Behinderungen zu minimieren. Der Einsatz einer nachhaltigen Bauweise mit Recyclingbaustoffen, Photovoltaik, Dachbegrünung und Ähnlichem ist angedacht.

3.3 Die Organisationsebene

Ziel auf der Organisationsebene ist die Etablierung eines intuitiven Leitsystems in einer funktional gestalteten Anlage. Die Anzahl der gesammelten Fraktionen ist in Abhängigkeit vom bisherigen Anfall, den Abnahmemöglichkeiten und dem Platzangebot festzulegen. Synergien sollen geschaffen und genutzt werden, z.B. in Form von Kooperationen mit lokalen Behandlungs- und Entsorgungsbetrieben. Die Logistik kann zusammen mit anderen Gemeinden organisiert werden, um potenziell Einsparungen zu erzielen. Im Verkehrsbereich ist ein Einbahnsystem von Vorteil, zusätzlich können Miet-Kleintransporter angeboten werden, die die Bürger:innen ausleihen dürfen. Für einige, nicht kostenlos zu sammelnde Fraktionen, kann ein geeignetes Gebührenmodell bedacht werden (z.B. für mehr als haushaltsübliche Mengen von Sperrmüll, Bauschutt oder Strauchschnitt wie in Graz). Die Öffnungszeiten sind an den Lebensalltag der Einwohner:innen anzupassen und auch abends oder am Wochenende anzusetzen. Teilweise kann eine Überwachung des Areals zweckdienlich sein, beispielsweise in frei zugänglichen Bereichen.

3.4 Die Kommunikationsebene

In der Kommunikation sowohl während der Genehmigungsphase als auch im laufenden Betrieb soll das Konzept des Nudgings implementiert werden. Damit sind kleine Anstöße oder ein Schubs gemeint, durch den Personen oder Personengruppen auf etwas aufmerksam gemacht, an etwas erinnert oder sanft gewarnt werden sollen (Thaler & Sunstein, 2018). In der Abfallsammlung gibt es zahlreiche Beispiele, wie folgende:

- Bewusste, gezielte Platzierung von Sammelbehältern (McCoy et al., 2018), z.B. differenzierte, gewinnbringende Fraktionen vorne.
- Wahl konkreter, anschaulicher Beschilderungen (Cao et al., 2023) und durchgängige Verwendung von Signalfarben.
- Sichtbare Kennzeichnung gut trennender Haushalte auf den Sammelbehältern (Höppner, 2025).
- Ausführung von Sammelbehältern als Wahlurnen (Höppner, 2025) (siehe Abbildung 3).

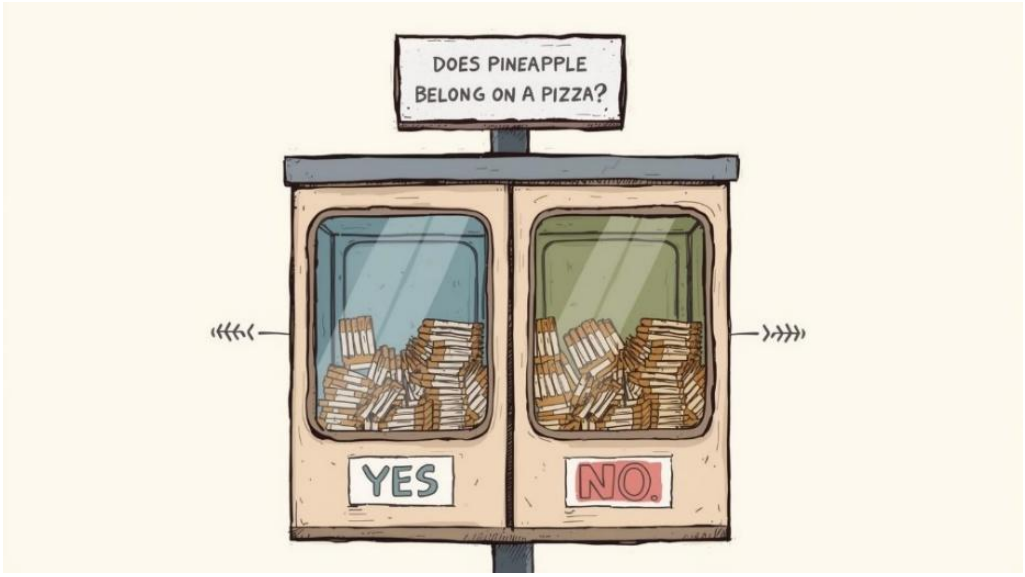


Abb. 3: Ausführung eines Sammelbehälters für Zigarettenstummel als Wahlurne (Abbildung erstellt mit CanvaAI).

In der Öffentlichkeitsarbeit sollen sämtliche zur Verfügung stehenden Medien wie die Gemeindezeitung, Social-Media-Kanäle, die Gemeindehomepage und wenn vorhanden die Gemeinde-App verwendet werden. Auch der Einsatz von dezidierten Abfallapps und QR-Codes ist denkbar, um zum Beispiel Vergünstigungen für Gemeindeeinwohner:innen umzusetzen. Am Standort können Bildschirme, Videos oder Plakate platziert werden. Im Allgemeinen soll der Fokus in der Kommunikation auf das Positive gelegt werden. Veranstaltungskonzepte und Angebote in der Abfallberatung sollen das Kreislaufzentrum als Ort der Begegnung und Bewusstseinsbildung sowie als Leuchtturmprojekt im Bereich der Nachhaltigkeit präsentieren.

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Das System der Altstoffsammlung ist in Österreich nicht einheitlich geregelt. Während es in einigen Regionen bereits sehr gut funktionierende, fortschrittliche Modelle wie die Ressourcenparks in der Steiermark gibt, besteht in anderen Bereichen wie in Teilen Salzburgs noch Nachholbedarf. Inwieweit Methoden der Digitalisierung implementiert werden können und sollen wie im Beispiel der Wiegon GmbH ist individuell zu prüfen. Dieser Ansatz kann im Widerspruch zum Wunsch eines Kreislaufzentrums als Ort der Begegnung diskutiert werden.

Durch die Umsetzung sämtlicher vorgeschlagener Maßnahmen in Kreislaufzentren auf den unterschiedlichen Ebenen der Gestaltung ist es das Ziel, dort die Sammeltiefe, die Recyclingquoten und die Mitarbeit der Bürger und Bürgerinnen zu erhöhen sowie die Abfallwirtschaft zentraler mitten ins Leben zu rücken. Methoden aus der Abfallpsychologie wie das Nudging bieten leicht umsetzbare, praktikable Möglichkeiten, um potenziell kleine Verbesserungen zu erzielen und Aufmerksamkeit auf das Thema der Mülltrennung zu lenken.

LITERATURVERZEICHNIS

Cao, G., Cao, R., & Liu, P. (2023). How does abstract and concrete garbage classification signage influence waste sorting behavior? *PeerJ, 11*. Von https://doi.org/10.7717/peerj.16597 abgerufen

Höppner, M. (2025). *Green Nudges für effektives Recycling und Abfallvermeidung*. Von https://www.haufe.de/sustainability/strategie/green-nudges-recycling-und-abfallvermeidung_575772_618074.html abgerufen

Kreuzeder, A., Siegl, M., & Resch, T. (2021). *Leitlinien für Recyclinghöfe - Errichtung und Bewilligung eines Recyclinghofs.* Abteilung 5 – Natur- und Umweltschutz, Gewerbe, Referat Abfallwirtschaft und Umweltrecht, Salzburg.

Land Salzburg. (2025). *Abfallwirtschaftliche Servicestelle für Gemeinden*. Von https://www.salzburg.gv.at/sir/sir-abfallwirtschaft abgerufen

Land Steiermark. (2025). *ASZ-Strategie des Landes Steiermark im Überblick*. (Amt der Steiermärkischen Landesregierung - Abteilung 14 Referat Abfall- und Ressourcenwirtschaft) Von https://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/12817419/162393419/ abgerufen

McCoy, K., Oliver, J., Borden, D., & Cohn, S. (2018). Nudging waste diversion at Western State Colorado University: application of behavioral insights. *IJSHE, 19*, 608-621. Von https://doi.org/10.1108/IJSHE-05-2017-0063 abgerufen

O.Ö. Landes-Abfallverwertungsunternehmen GmbH. (2025). *Home - Altstoffsammelzentrum (ASZ)*. Von https://www.altstoffsammelzentrum.at/home.html abgerufen

Thaler, R. H., & Sunstein, C. R. (2018). *Nudge: Wie man kluge Entscheidungen anstößt* (13. Ausg.). Berlin: Ullstein Verlag.

Wiegon GmbH. (2026). *Digitaler Recyclinghof: Die Zukunft in der Abfallwirtschaft*. Von https://www.wiegon.at/de/ abgerufen

KONTAKT

Dipl.-Ing. Verena Schmid
verena.schmid@unileoben.ac.at
0676/ 84 53 86-5112
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben
https://www.unileoben.ac.at/avaw/

Der Begriff „Repurpose“ in einer textilen Kreislaufwirtschaft

Verena Schmid[1], Silvia Jölli[2] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] Verein Fensterplatz, Arbeitsprojekt heidenspass, Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Die Textilwirtschaft bedarf einer Transformation von der linearen zu einer zirkulären Wirtschaftsweise. Eine Kategorisierung potenzieller Ansatzpunkte bieten die zehn Kreislaufwirtschaftsgrundsätze (R-Grundsätze), wobei in diesem Beitrag insbesondere auf „Repurpose“ (R8), das „anders Weiternutzen“, im Zusammenhang mit Textilien eingegangen wird. Dieser Begriff wird im textilen Bereich unterschiedlich aufgefasst und verwendet, es gibt keine allgemein gültige Definition. Allen Herangehensweisen gemein ist aber, dass die Produkte, die aus Teilen der Ausgangsmaterialien hergestellt werden, eine neue Funktion erfüllen müssen. Diese Ausgangsmaterialien können textile oder nicht-textile Stoffe sein, aus dem Pre-Consumer-, Consumer- und Post-Consumer-Feld stammen. Weiters findet Repurposing im Designsektor statt, wo die Praktik zu „Upcycling“-Ansätzen gezählt wird.

1 EINLEITUNG

Um den Übergang von der bisher vorherrschenden, linearen Wirtschaftsform zur Kreislaufwirtschaft zu forcieren, greift die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie die zehn R-Grundsätze von Potting et al. (2017) auf. Ihre Reihenfolge spiegelt ihre Bedeutung für diese Transformation wider. Bei „Refuse“, „Rethink“ und „Reduce“ (R1 bis R3) verändern sich die Produktions- und Verbrauchsmuster. Eine Verlängerung der Nutzungsdauer wird durch „Reuse“, „Repair“, „Refurbish“, „Remanufacture“ und „Repurpose“ (R4 bis R8) erzielt, wobei der Wert des Produktes auf einem höchstmöglichen Niveau bleiben soll. „Recycle“ und „Recover“ (R9 und R10) umfassen eine bestmögliche Rückführung der Materialien in den Stoffkreislauf als Sekundärrohstoffe (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022; Potting, Hekkert, Worrell, & Hanemaaijer, 2017).
Einer der in der Kreislaufwirtschaftsstrategie explizit genannten Ansatzpunkte für die Transformation ist die Textilwirtschaft. Nachfolgend wird darauf eingegangen, was der achte Kreislaufwirtschaftsgrundsatz „Repurpose“ allgemein und besonders im textilen Bereich bedeutet.

2 BEGRIFFSABGRENZUNG „REPURPOSE“

Der Begriff „Repurpose“ wird in der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie folgendermaßen definiert:
„Anders weiternutzen. Teile aus defekten Produkten für neue Produkte nutzen, die andere Funktionen erfüllen.“ (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022).

Betrachtet man die Stellung von Repurpose entlang der Produktlebenskette, findet es nach der Sammlung für (Wieder-) Aufbereitung und vor der Rückführung in die Textilproduktion statt. Alternativ könnte an derselben Stelle ein Remanufacturing durchgeführt werden, bei dem die neuen Produkte ihre ursprünglichen Funktionen beibehalten. Fällt stattdessen die Entscheidung auf ein Recycling des Materials, erfolgt die Rückführung des Stoffstroms in die Faserherstellung.
Abbildung 1 zeigt eine adaptierte Version der Produktlebenskette mit der Stellung der verschiedenen R-Grundsätze von Potting et al. (2017), die veranschaulichen soll, wie die Begriffe im Kontext von Textilien zu verwenden sind.

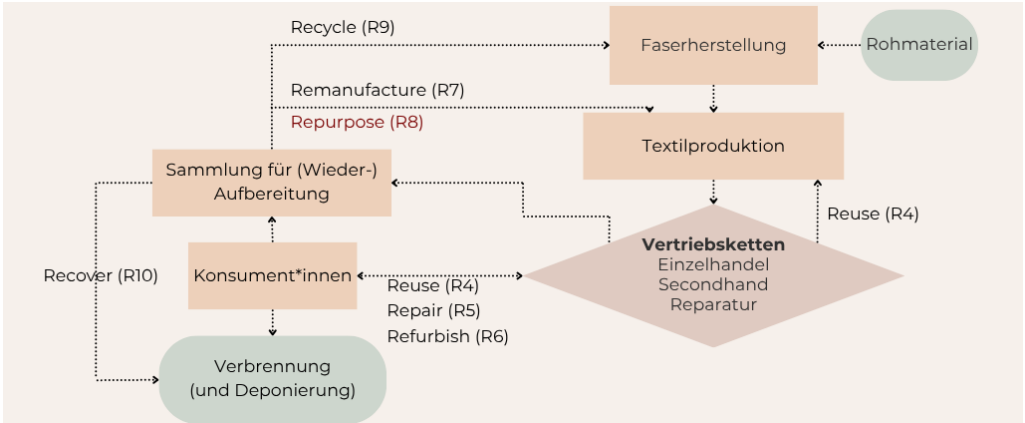


Abb. 1: Adaptierte Produktlebenskette mit Stellung der R-Grundsätze im Kontext von Textilien nach Potting et al. (2017).

3 METHODIK

Um einen Überblick über die Verwendung vom Begriff „Repurpose“ in einer textilen Kreislaufwirtschaft zu gewinnen, wurde eine extensive Literaturrecherche betrieben. Die verwendeten Schlagworte lauteten „textile repurpose“, „repurpose textiles Austria“, „Upcycling textile“, „repurpose clothes“ und „repurpose fabrics“. Genutzt wurden die Plattformen „PRIMO“, „Science Direct“, „Google Scholar“, „Web of Science”, „Scopus”, „Elicit” und „Perplexity”. Ziel dieser Literaturrecherche war es, zu evaluieren, wie der Begriff verwendet und verstanden wird, und herauszufinden, welche anderen Begriffe verwendet werden, die auch „Repurpose“ sind. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein Auszug aus den gefundenen Ergebnissen präsentiert, da die Länge limitiert ist.

4 VERSTÄNDNIS VOM BEGRIFF „REPURPOSE“ IN TEXTILER KREISLAUFWIRTSCHAFT

Der Begriff Repurpose wird im textilen Zusammenhang unterschiedlich verwendet, verstanden und kategorisiert. Abhängig vom Ausgangsstoff kann Repurposing auf verschiedene Arten erfolgen. Einerseits können nicht-textile Produkte als Rohstoffe für textile Produkte fungieren (Non-textile to textile). Andererseits können entsorgte Textilien in einer anderen Funktion zum Einsatz kommen. Überschüssiges textiles Material aus Herstellungsprozessen kann ebenso zur Herstellung neuer Produkte dienen (Manufacturing side streams). Das Kriterium für Repurposing ist hier, dass sich der Zweck des Produktes oder Materials ändert (Winquist, et al., 2023).
Eine andere Kategorisierung differenziert zwischen Repurposing in der Consumption-Stage und in der Post-Consumption-Stage. Ersteres bedeutet, dass wegzuwerfende Produkte oder deren Teile für einen neuen Zweck benutzt werden (z.B. Putzlappen oder Spielzeugherstellung). Repurposing in der Post-Consumption-Stage bedient sich recycelter Stoffe oder Fasern, um beispielsweise Dämmmaterialien, Decken oder Lappen herzustellen (Shirvanimoghaddam, Motamed, Ramakrishna, & Naebe, 2020).
Zudem kommt der Begriff im Designbereich vor. Kreatives Repurposing kann durch Designer:innen im Rahmen eines Designprozesses, als Dienstleistung bzw. Geschäftsmodell, durch Konsumenten und Konsumentinnen selbst oder vor einem kulturellen Hintergrund erfolgen (Nyante, Vigbedor, Ahiabor, Awuyah, & Samadu, 2025).
Repurposing in einem Design-Prozess kann nach zwei Hauptherangehensweisen geschehen, einer zielorientierten und einer ressourcenorientierten Herangehensweise. Beim zielorientierten Vorgehen initiiert der Kunde eines Design-Studios den Design-Prozess, indem er eine Arbeit in Auftrag gibt. Im Gegensatz dazu startet ein Designer beim ressourcenorientierten Vorgehen mit

dem Material und der Form des entsorgten Produktes (Leede, Lepelaar, Groote Schaarsberg, van Vorsselen, & Oskam, 2021).
Als Überbegriff über einige R-Grundsätze im Designbereich wird zum Teil die Bezeichnung „Upcycling“ verwendet. Dies kann als Prozess gesehen werden, in dem Produkte oder Stoffe, die nicht mehr benutzt werden oder entsorgt werden sollen, stattdessen einem Repurposing, Repairing, Upgrading oder Remanufacturing in einer Art und Weise zufallen, die den Wert steigert (Singh, Sung, Cooper, West, & Mont, 2019).
Nachhaltige Praktiken können auch durch die Konsumenten und Konsumentinnen selbst erfolgen im Bereich der Anschaffung (z. B. Kauf von Second-Hand-Artikeln), der Nutzung und Instandhaltung (z. B. Repair) und Entsorgung (z. B. Spende an gemeinnützige Organisationen). Zum Feld der Nutzung und Instandhaltung kann auch Repurposing gezählt werden, wenn die Form eines Bekleidungsstücks zugunsten eines neuen Einsatzbereichs verändert wird (z. B. Shirt wird zu Kissenbezug) (Zhang & Hale, 2022).
Eike et al. (2026) nennen vier Repurposing-Level, wobei die Verbraucherbeteiligung von diversen Treibern abhängt. Konsumenten und Konsumentinnen können sowohl Benutzer:innen als auch Hersteller:innen sein. Die genannten Level sind (1) Restyling, (2) subtraktives Repurposing, (3) additives Repurposing und (4) bewusste Schnittkonstruktion. Zu den beeinflussenden Treibern zählen Näherfahrung, künstlerischer Ausdruck, Umweltbedenken, monetäre Anreize und Alter (Eike, Hashemian, Burton, Hustvedt, & Cho, 2026).

Nachfolgend werden Beispiele für die unterschiedlichen Ansatzpunkte genannt und es wird versucht, Gruppen ähnlicher Ansätze zu bilden.

4.1 Beispiele für Repurposing

4.1.1 Technische Ansätze

Non-textile to textile-Ansätze
Winquist et al. (2023) nennen als Beispiel für Non-textile to textile ein Polyester-T-Shirt, das aus recycelten PET-Flaschen produziert wird. Dieser Ansatz wird auch in der zugehörigen Publikation Repurpose genannt (Horn, Mölsä, Sorvari, Tuovila, & Heikkilä, 2023).
Altpapier und Kartonagen können weiters als Ausgangsmaterial für textile Anwendungen fungieren. Die zellulosehaltigen Abfälle werden in einer möglichen Herangehensweise in einer ionischen Flüssigkeit gelöst, um die erhaltenen Fasern anschließend neu verspinnen zu können. Hier wird die Bezeichnung Upcycling verwendet (Ma, et al., 2016).

Textilien in anderer Funktion
Es existieren unterschiedliche technische Repurposing-Anwendungsvorschläge für Textilabfälle. In den Studien werden die Versuche aber vermehrt mit neuen Stoffen durchgeführt (Guzman & Payano, 2023; In-na, Lee, & Caldwell, 2022). Diese Beispiele aus den genannten Paper mit den verwendeten Bezeichnungen befinden sich in Tabelle 1.

Tab. 1: Beispiele für technische Repurposing-Ansätze von Textilien.

Ausgangsmaterial	Anwendung	Verwendete Bezeichnung	Veröffentlichung
Polyesterkleidung in kleine Stücke geschnitten (neu) mit Sand	Bodenstabilisierung	Use of repurposed whole textile	(Guzman & Payano, 2023)
100 % Baumwolle, 100 % Polyester und Gemische (neu) als festes Substrat	Lebende Bio-Verbundwerkstoffe	Upcycling end-of-life textiles, repurpose materials	(In-na, Lee, & Caldwell, 2022)

Shirvanimoghaddam et al. (2020) listen diverse Publikationen zu Versuchen hauptsächlich aus dem Post-Consumption-Bereich mit recycelten Fasern auf. Die entstehenden Produkte sind für die Bereiche Schalldämpfung, Absorption von elektromagnetischer Strahlung, Füllstoffe, Aktivkohle, Adsorption von Schwermetallen, Biokohle, Kohlenstoff-Mikroröhrchen und Anodenmaterial gedacht. Die Anwendungen werden in den Publikationen selbst aber tedenziell nicht als Repurposing bezeichnet.

Eine in mehreren Veröffentlichungen beschriebene Herangehensweise für die Anwendung von Textilabfällen in der Innenarchitektur und der Baubranche umfasst die Zerkleinerung von Textilien, die Mischung mit einem Bindemittel und eventuell das Pressen oder Aushärten zu Blöcken oder anderen Bausteinen. Beispiele dafür befinden sich in Tabelle 2.

Tab. 2: Beispiele für Repurposing aus Innenarchitektur und Bau.

Ausgangsmaterial	Erhaltenes Produkt	Verwendete Bezeichnung	Veröffentlichung
Textilabfälle von Textilherstellern	Optisch ansprechende und funktionale Blöcke oder Platten	Repurpose textile waste	(Gambhire, Sehgal, & Shokeen, 2024)
Teppich-Abfälle, Matratzen-Abfälle, Second-Hand-Kleidung, Stoffreste, Wäscheflusen mit biobasierten und bioabbaubaren Bindemitteln	Zirkuläre Materialien für Design, Innenarchitektur, Bau	Repurposing textile waste	(Ruiz Suarez, 2023)
Pre-Consumer Abfälle, unbenutzte Stoffreste mit Klebstoffen	Materialien für Möbeldesign, Modeaccessoires, architektonische Komponenten	Textile waste Upcycling approaches	(Aliah & Ciptandi, 2025)
Recycelte Fasern: Kevlar, Nomex, Nylon Gemische mit Mörtel	Zementmatrix für nachhaltigen Bau	Repurposing of blended fabric waste	(Tran, Gunasekara, Law, Houshyar, & Setunge, 2023)
Baumwollfasern aus Blue Jeans-Abfall mit Beton	Polyesterbeton	Recovery of cotton fibers from waste	(Peña-Pichardo, Martínez-Barrera, Martínez-López, Ureña-Núñez, & dos Reis, 2018)

4.1.2 Konzepte aus dem Designsektor

Im Rahmen eines Designwettbewerbs erstellten Teilnehmende ein Konzept für einen langen Mantel aus Textilien von Flugzeugsitzen und Metallaccessoires von Gurten. Die Veranstaltung wurde als „Upcycling Contest“ tituliert (Marques, Moreira, Cunha, & Moreira, 2019).
In Österreich gibt es diverse Geschäftsmodelle im Repurposing-Bereich, die eine Zweckentfremdung unterschiedlichster Materialien forcieren. Beispiele sind

- Brillen aus Büchern und Jeans (*bean spectacles*),
- Taschen aus Büchern und Krawatten (*Bernanderl*),
- Kleidung aus gebrauchten Militärseesäcken/-zelten (*Beware of Mainstream*),
- Taschen aus Kletterseilen, Gürteln, Feuerwehrschläuchen und Schwimmwesten (*Wieslbag*),
- Gürtel und Geldbörsen aus Fahrradschläuchen (*Nu-cycl*) und
- Taschen aus LKW-Planen, Werbeplanen und Fahrradschläuchen (*gute dinge*).

5 DISKUSSION

Schwierigkeiten in der Recherche und der Kommunikation zwischen Stakeholdern entstehen daraus, dass die Bezeichnungen der R-Grundsätze und damit auch des Repurposing nicht einheitlich verwendet und klar abgegrenzt werden. Das zeigen die unterschiedlich formulierten Beschreibungen der angeführten Beispiele, die teilweise Repurposing genannt werden, obwohl die Bezeichnung nicht ganz treffend ist oder anders tituliert werden, wenngleich es sich um Repurpose handelt.

Nimmt man die Definitionen und Erläuterungen von Potting et al. (2017) als Grundlage, findet vor dem Repurposing kein Recycling statt. Repurpose ist eine übergeordnete Kreislaufwirtschaftsstrategie zu Recycling, da der Wert des Produktes auf einem höheren Niveau bleibt.

Bei der Betrachtung der Produktlebenskette nach Potting et al. (2017) selbst kann man sich aber die Frage stellen, ob das Repurposing anstatt VOR der Rückführung in die Textilproduktion nicht DURCH die Textilproduktion passiert.

Vergleicht man Potting et al. (2017) mit den Einteilungsansätzen von „Repurpose“ nach Winquist et al. (2023) und Shirvanimoghaddam et al. (2020), besteht insoweit Einigung, dass sich der Zweck bzw. die Funktion des Produktes oder Stoffes durch den jeweils angewandten Prozess ändert. Es entsteht aber Diskussionspotenzial, wenn vor dem Repurpose ein Recycling stattfindet wie bei der Post-Consumption-Stage von Shirvanimoghaddam et al. (2020). Möglicherweise wäre in diesen Fällen der Ausdruck „Downcycling“ treffender.

Das von Winquist et al. (2023) genannte Beispiel zu non-textile to textile mit dem T-Shirt aus PET-Flaschen beinhaltet den Recyclingschritt der Flaschen zu einem Textil. Zu diesem ist weiters zu sagen, dass die Herstellung von Textilien aus PET-Flaschen nicht im Sinne des EU-Kreislaufmodells für die Textilien ist. Im Textilrecyclingbereich sollen sich die Bemühungen auf Faser-zu-Faser-Recycling konzentrieren (Europäische Kommission, 2022).

Andere Werke verwenden die Bezeichnung „Repurposing-Methoden“ als Überbegriff über mechanische, chemische und biologische Recyclingtechniken (Nallarajah, 2025). Auch diese Namensgebung harmoniert nicht mit Potting et al. (2017).

Teilweise werden Upcycling und Repurposing im Designbereich synonym verwendet, wobei Upcycling eher als ein Überbegriff über diverse kreative Praktiken zu sehen ist wie Singh et al. (2019) vorschlagen.

Angesichts dieser Vielzahl an Ansätzen bedarf es einer Übereinkunft über die korrekte Verwendung der Begriffe Repurpose, Upcycling und ähnlichen, um zukünftig auf Basis eines gemeinsamen Wissensstandes kommunizieren und forschen zu können.

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des Projektes "textilREICH" erstellt. Dieses Projekt wird von der FFG gefördert (FO999934671).

LITERATURVERZEICHNIS

Aliah, M. R., & Ciptandi, F. (2025). Exploring the potential of textile waste as sustainable material through upcycling approaches. *International Journal of Environmental Sciences*, 219-229.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2022). Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft- Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie. 84. (U. E. Bundesministerium für Klimaschutz, Hrsg.) Wien.

Eike, R., Hashemian, B., Burton, M., Hustvedt, G., & Cho, S. (2026). External Drivers of Apparel Repurposing: A Multilevel Analysis Linking Skills, Motivations, and Repurposing Pathways. *Journal of Sustainability Research*, 1-26.

Gambhire, V., Sehgal, J., & Shokeen, A. S. (2024). Creative Ways to Repurpose Textile Waste for Sustainable Interior Design. *International Research Journal on Advanced Engineering and Management*, 3061-3064.

Guzman, I. L., & Payano, C. (2023). Use of repurposed whole textile for enhancement of pavement soils. *International Journal of Geo-Engineering*.

Horn, S., Mölsä, K. M., Sorvari, J., Tuovila, H., & Heikkilä, P. (2023). Environmental sustainability assessment of a polyester T-shirt - Comparison of circularity strategies. *The Science of the total environment*.

In-na, P., Lee, J., & Caldwell, G. (2022). Living textile biocomposites deliver enhanced carbon dioxide capture. *Journal of Industrial Textiles*.

Kommission, E. (2022). EU-Strategie für nachhaltige und kreislauffähige Textilien.
Leede, A. d., Lepelaar, M., Groote Schaarsberg, N., van Vorsselen, J., & Oskam, I. (2021). Repurpose driven design - a practice-based evaluation of design methods for repurposing. *4th PLATE 2021 Virtual Conference*.
Ma, Y., Hummel, M., Määttänen, M., Särkilahti, A., Harlin, A., & Sixta, H. (2016). Upcycling of waste paper and cardboard to textiles. *Green Chemistry*.
Marques, A. D., Moreira, B., Cunha, J., & Moreira, S. (2019). From waste to fashion – a fashion upcycling contest. *Procedia CIRP*, 1063–1068.
Nallarajah, J. E. (2025). Repurposing Polymeric Waste from the Textile Industry for Sustainable Biodegradable Composites: Challenges and Opportunities. Von https:// doi.org/10.26434/chemrxiv-2025-2mc0h abgerufen
Nyante, B., Vigbedor, D., Ahiabor, R., Awuyah, I. K., & Samadu, K. (2025). Upcycling Indigenous Woven Textile Waste in Wa Municipality: Developing Sustainable Folk Art Practices. *Fashion and Textiles Review*, 313-332.
Peña-Pichardo, P., Martínez-Barrera, G., Martínez-López, M., Ureña-Núñez, F., & dos Reis, J. M. (2018). Recovery of cotton fibers from waste Blue-Jeans and its use in polyester concrete. *Construction and Building Materials*, 409-416.
Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain.* Den Haag: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
Ruiz Suarez, A. (2023). Sustainable Pathways For Repurposing Textile Waste. Kalifornien.
Shirvanimoghaddam, K., Motamed, B., Ramakrishna, S., & Naebe, M. (2020). Death by waste: Fashion and textile circular economy case. *The Science of the total environment*.
Singh, J., Sung, K., Cooper, T., West, K., & Mont, O. (2019). Challenges and opportunities for scaling up upcycling businesses – The case of textile and wood upcycling businesses in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*.
Tran, N. P., Gunasekara, C., Law, D. W., Houshyar, S., & Setunge, S. (2023). Repurposing of blended fabric waste for sustainable cement-based composite: Mechanical and microstructural performance. *Construction and Building Materials*.
Winquist, E., Horn, S., Tuovila, H., Lavikko, S., Sorvari, J., Joutsjoki, V., . . . Ilvesniemi, H. (2023). R-strategies in circular economy - Textile, battery, and agri-food value chains. *Natural resources and bioeconomy studies*.
Zhang, L., & Hale, J. (2022). Extending the Lifetime of Clothing through Repair and Repurpose: An Investigation of Barriers and Enablers in UK Citizens. *Sustainability*(14). Von https://doi.org/10.3390/su141710821 abgerufen

KONTAKT

Dipl.-Ing. Verena Schmid
verena.schmid@unileoben.ac.at
0676/ 84 53 86-5112
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben

Automatisierte Demontageanleitungen für EOL-Elektrofahrzeuge: Ein hybrides CV- und VLM-Konzept

Nils Baumann[1] & Sabine Flamme[1]
[1)] FH Münster, IWARU, Münster, Deutschland

KURZFASSUNG: Der wachsende Absatz von Elektrofahrzeugen und neue EU-Vorgaben fordern eine effiziente, innereuropäische Kreislaufwirtschaft für End-of-Life (EOL)-Fahrzeuge. Die wirtschaftliche Umsetzung scheitert jedoch oft an manuellen, kaum standardisierten Demontageprozessen. Reale Störfaktoren wie Verschmutzung, Deformation und hohe Bauteilvarianz erschweren zudem den Einsatz bisheriger theoretischer Optimierungsmodelle, die meist perfekte digitale Daten voraussetzen. Um diese Lücke zu schließen, präsentiert dieser Beitrag ein Konzept für ein hybrides Assistenzsystem zur automatisierten Erstellung von Demontageanleitungen. Die Methodik stützt sich auf umfassend dokumentierte, reale Demontagedaten zweier Versuchsfahrzeuge. In dem entwickelten Konzept werden mit einem Objekterkennungsnetzwerk zunächst aktuelle Bilddaten verarbeitet, um Verbindungselemente zu erkennen. Diese visuellen Ergebnisse werden mittels Retrieval-Augmented Generation mit einer Demontagedatenbank verknüpft und einem Vision-Language-Modell (VLM) übergeben. Auf dieser Basis generiert das VLM abschließend kontextsensitive, schrittweise Demontageanleitungen für die Bauteile der EOL-Fahrzeuge.

1 MOTIVATION

Durch die stark steigenden Zulassungszahlen von Elektrofahrzeugen in der EU werden Strategien für das End-of-Life (EOL) immer wichtiger. Ein innereuropäischer Verbleib dieser EOL-Fahrzeuge ermöglicht die Rückführung kritischer Materialien in geschlossene Kreisläufe, wodurch Emissionen und Lieferkettenabhängigkeiten reduziert werden können.

Die industrielle Umsetzung einer solchen Kreislaufwirtschaft scheitert jedoch meist an wirtschaftlichen Hürden. Die Demontage erfolgt in der Regel manuell, was in Hochlohnländern oft nicht wirtschaftlich ist. Erschwert wird dies durch die hohe Variantenvielfalt und fehlende standardisierte Prozesse. Da meist keine detaillierten Demontageanleitungen vorliegen, basiert der Prozess auf der impliziten Erfahrung der Demonteure. Bisherige Modelle im Disassembly Sequence Planning (DSP) setzen oft perfekte digitale Bauteilinformationen voraus (Xiwang et al., 2021), die in der Realität bei EOL-Fahrzeugen nicht gegeben sind, da diese Daten oft nicht verfügbar sind und nicht den Zustand der Gebrauchtteile widerspiegeln (Verschmutzung, Korrosion, Deformation).

Um die Demontagetiefe und Kreislauffähigkeit von EOL-Fahrzeugen praxisnah zu erhöhen, adressiert dieser Beitrag folgende Forschungsfragen:

- **Frage 1:** Wie robust identifizieren Computer-Vision-Systeme Verbindungselemente an EOL-Bauteilen unter realen Störfaktoren wie Verschmutzung, Korrosion und Deformation?
- **Frage 2:** Wie lassen sich Informationen der Verbindungselemente, aktuelle Bilddaten und bestehende Demontagedatenbanken in Vision-Language-Modellen (VLMs) kombinieren, um möglichst fehlerfreie, kontextsensitive Demontageanleitungen zu generieren?

2 RECHTLICHER RAHMEN UND STAND DER TECHNIK

2.1 Rechtlicher Rahmen

Das regulatorische Umfeld für Fahrzeugrecycling in der Europäischen Union befindet sich in einer tiefgreifenden Transformation. Der neue Kommissionsvorschlag (Europäische Kommission & Generaldirektion Umwelt, 2023) sieht vor, die bisherige Altfahrzeugrichtlinie (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2023) durch eine neue Verordnung abzulösen und direkt mit Konstruktionsanforderungen zu verknüpfen. Hersteller sollen künftig zu einem kreislaufgerechten Design verpflichtet werden (Design-for-Disassembly), das unter anderem die zerstörungsfreie Entfernung von Bauteilen wie Elektroantriebsmotoren und Batterien sicherstellen muss. Zudem umfasst der neue Vorschlag einen „Kreislaufpass für Fahrzeuge“, über den Fahrzeughersteller kostenlos Informationen wie z. B. Position, Gewicht und detaillierte Anleitungen für das Entfernen und Ersetzen von wichtigen Komponenten, u. a. der Elektrofahrzeugbatterien oder der Elektromotoren, bereitstellen müssen.

2.2 Stand der Technik

Um ein automatisiertes Demontage-Assistenzsystem zu entwickeln, werden mehrere Technologien benötigt. Disassembly-Sequence-Planning (DSP) umfasst Methoden, die eine möglichst optimale Reihenfolge von Arbeitsschritten aufstellen, um z. B. EOL-Produkte zu demontieren. Dabei gibt es unterschiedliche Zielfunktionen wie z. B. Kosten oder Zeit. Durch ihre Komplexität ist DSP für die Demontage von Elektrofahrzeugen von besonderer Relevanz (Xiwang et al., 2021). Um aus Bilddaten Objekte wie Bauteilverbindungen zu erkennen, hat sich die "You Only Look Once" (YOLO)-Architektur als One-Stage-Detektor etabliert, der eine gute Balance aus sehr hoher Erkennungsgeschwindigkeit und Präzision bietet. Die Architektur wird in der Literatur z. B. genutzt, um verschiedene Schraubenkopfarten in Echtzeit zu lokalisieren und zu klassifizieren (Mangold et al., 2022). Um Informationen aus Bild- und Textdaten zu verknüpfen, kommen Vision-Language-Modelle (VLMs) zum Einsatz. VLMs erweitern große Sprachmodelle (LLMs) um eine visuelle Domäne und ermöglichen so Anwendungen wie visuelle Assistenten. Obwohl es beeindruckende Fortschritte gibt, ist die zuverlässige Verknüpfung von Bild und Sprache noch nicht vollständig gelöst. Aktuelle Modelle haben oft Schwierigkeiten, räumliche Beziehungen, Zählaufgaben oder spezifische Attribute korrekt zu erfassen, und neigen dazu, fehlerhafte oder irrelevante Inhalte zu "halluzinieren" (Bordes, et al., 2024).

3 METHODIK

Zur Entwicklung des Demontage-Assistenzsystems wird in diesem Kapitel zunächst die Auswahl der Versuchsfahrzeuge und die Datenerfassung erläutert, bevor anschließend die Architektur detailliert vorgestellt wird.

Im Rahmen des Graduiertenkollegs „Circular E-Cars“ werden mehrere Elektrofahrzeuge vollständig und weitgehend zerstörungsfrei demontiert. Als Untersuchungsfahrzeuge dienen ein vollelektrischer Renault Kangoo Express Z.E. (Baujahr 2011), der den aktuellen europäischen Fahrzeugrücklauf repräsentiert, sowie ein moderner Chery T26 Plug-in-Hybrid (PHEV), um den Untersuchungsraum auf ein aktuelles Hybridfahrzeug zu erweitern.

3.1 Datenerfassung

Während der Demontage der Untersuchungsfahrzeuge werden die einzelnen Demontageschritte per Video aufgezeichnet. Um eine möglichst lückenlose Erfassung zu gewährleisten, werden insgesamt sechs Kameras in verschiedenen Positionen platziert, wie in Abb. 1 dargestellt. Vier Kameras filmen die Demontage von den Ecken aus, eine Kamera filmt die Demontage von oben und eine Kamera ist von der Windschutzscheibe aus auf den Innenraum des Fahrzeugs gerichtet. Die Videoaufnahmen der einzelnen Kameras werden nach der Demontage manuell synchronisiert und jeweils der Demontage eines Bauteils mit dessen eindeutiger ID zugewiesen.

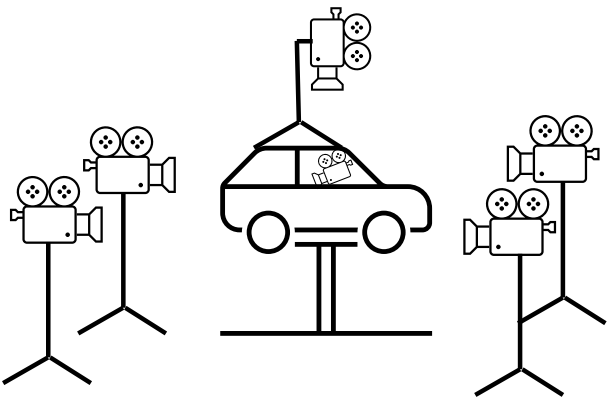


Abb. 1: Schematischer Aufbau von sechs Videokameras zum Filmen der Demontage.

Zusätzlich zu den Videoaufnahmen werden Bildaufnahmen von jedem demontierten Bauteil aufgenommen. Die Bilder werden vor einem neutralen Hintergrund mit physischem Maßstab von mindestens zwei Seiten (Vorder-/Rückseite) fotografiert und der eindeutigen Bauteil-ID zugewiesen. Ein Beispiel befindet sich in Abb. 2.



Abb. 2: Stoßdämpfer des Chery T26.

3.2 Demontage-Assistenzsystem

Das technische Konzept des Assistenzsystems besteht aus einer mehrstufigen Pipeline, wie in Abb. 3 dargestellt. Die Eingabe ist ein RGB-Bild, welches aus der Perspektive des Demonteurs aufgenommen wird (z. B. via XR-Brille). Dieses Bild wird in Echtzeit von einem YOLO-Objekterkennungsnetzwerk verarbeitet, welches sichtbare Verbindungen klassifiziert, lokalisiert und als strukturiertes Datenobjekt ausgibt. Das Datenobjekt enthält Informationen über die Anzahl, die Typen, die Konfidenzwerte und die zweidimensionalen Koordinaten der erkannten Verbindungen.

Parallel dazu wird eine mitlaufende Datenbank aus bisherigen Demontageerfahrungen aufgebaut. Während das Assistenzsystem im Einsatz ist, wird die Datenbank um die neu gesammelten Erfahrungen erweitert. Die relevanten Informationen der Datenbank werden dann mittels Retrieval-Augmented Generation (RAG) an den vorhandenen Prompt angehängt.

Als Sprachmodell wird ein Vision-Language-Modell (VLM) gewählt, um sowohl die gesammelten Informationen als Text zu übergeben als auch das aktuelle RGB-Bild als Kontext zu liefern. Das VLM erhält somit drei Eingangsdaten: (1) Das aktuelle visuelle Ist-Bild, (2) die vom YOLO-Modell verifizierten Verbindungselemente und (3) das Kontextwissen aus der Demontagedatenbank. Mit diesen Informationen generiert das VLM eine bedarfsgerechte Schritt-für-Schritt-Demontageanleitung.

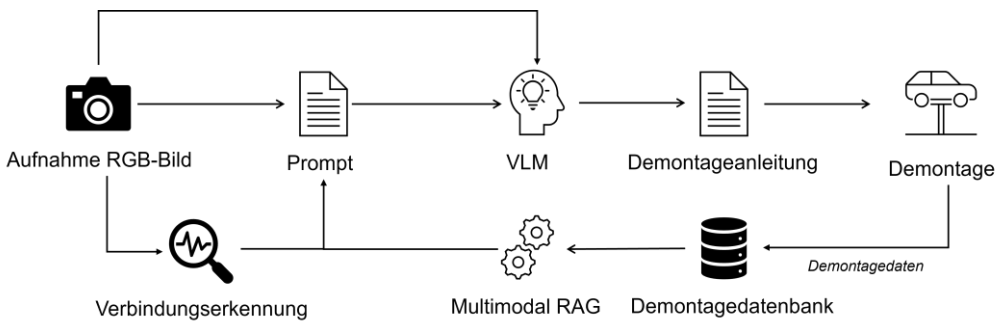


Abb. 3: Konzept für ein Assistenzsystem zur Erstellung von Demontageanleitungen.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wurde ein methodisches Konzept zur automatisierten Generierung von Demontageanleitungen für EOL-Elektrofahrzeuge vorgestellt. Mit der skizzierten Architektur werden reale Bilddaten, erkannte Objekte und kontextsensitives Wissen in einem VLM verknüpft. Die weitere Arbeit fokussiert sich auf die Evaluation konkreter Machine-Learning-Modelle, die Erweiterung der Demontagedatenbank sowie die nahtlose Integration der Anleitungen in das Sichtfeld der Demonteure mittels Augmented-Reality-Systemen.

LITERATURVERZEICHNIS

Bordes, F., Pang, R. Y., Ajay, A., Li, A. C., Bardes, A., Petryk, S., . . . Jayakum. (2024). An introduction to vision-language modeling. *arXiv preprint arXiv:2405.17247*. doi:10.48550/arXiv.2405.17247

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. Juli 2023, Brüssel*.

Europäisches Parlament, & Rat der Europäischen Union. (2023). Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge. *Richtlinie 2000/53/EG, Erstveröffentlichung: 18. September 2000, Fassung: 30. März 2023*.

Eurostat. (2026). *Neue Personenkraftwagen, nach Art der Antriebsenergie*. doi:10.2908/ROAD_EQR_CARPDA

Mangold, S., Steiner, C., Friedmann, M., & Fleischer, J. (2022). Vision-Based Screw Head Detection for Automated Disassembly for Remanufacturing. *Procedia CIRP*, 1-6. doi:10.1016/j.procir.2022.02.001

Xiwang, G., Zhou, M., Abusorrah, A., Alsokhiry, F., & Sedraoui, K. (2021). Disassembly Sequence Planning: A Survey. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, S. 1308-1324. doi:10.1109/JAS.2020.1003515

Pilot-Pyrolyse als methodisches Instrument zur Prozessbewertung heterogener Post-Consumer-Kunststoffabfallströme

Angelika Luckeneder[1] & Daniela Meitner[1]
[1)] Next Generation Elements GmbH, R&D, Feldkirchen, Österreich

KURZFASSUNG: Die Bewertung von Aufbereitungsschritten bei heterogenen Post-Consumer-Kunststoffabfällen stellt eine zentrale Herausforderung im Kunststoffrecycling dar. Konventionelle Laboranalysen erfassen aufgrund geringer Probenmengen die Heterogenität solcher Stoffströme häufig nur eingeschränkt. Im vorliegenden Ansatz wird eine Pilot-Pyrolyseanlage im Labormaßstab als analytisches Werkzeug eingesetzt, um repräsentative Probenmengen von etwa 3–5 kg entlang einer Recyclinglinie zu untersuchen. Durch die thermochemische Umsetzung und die Analyse der entstehenden Öl-, Gas- und Feststofffraktionen können Veränderungen der Materialqualität sowie der Einfluss von Störstoffen und Verunreinigungen bewertet werden. Der Vergleich von Proben vor und nach einzelnen Aufbereitungsschritten ermöglicht eine objektive Beurteilung ihrer Wirksamkeit und liefert Hinweise auf die Effizienz der Störstoffentfernung. Die Methode stellt damit eine praxisnahe Ergänzung zur klassischen Laboranalytik dar und unterstützt die datenbasierte Bewertung und Optimierung von Aufbereitungsprozessen für Kunststoffabfälle.

1 LABOR-PYROLYSEANLAGE UND VERSUCHSABLAUF

1.1 Anlagenkonzept und Prozessbeschreibung

Die Untersuchungen wurden an einer batchweise betriebenen Pilot-Pyrolyseanlage im Technikumsmaßstab durchgeführt.



Abb. 1: Technikumsanlage

Die Anlage dient im Rahmen dieser Arbeit als analytisches Werkzeug zur Charakterisierung von Materialströmen und zur Bewertung des Aufbereitungserfolgs entlang einer Recyclinglinie. Die maximal mögliche Betriebstemperatur beträgt 550 °C.

Für die Versuche wird das Probenmaterial in den Reaktor eingebracht und unter einer Stickstoffatmosphäre auf 430-460 °C erhitzt. Durch die thermische Zersetzung entstehen kondensierbare und nicht kondensierbare gasförmige Produkte sowie feste Rückstände. Die kondensierbaren Bestandteile werden in zwei aufeinanderfolgenden Kondensationsstufen als Schweröl-(HF) und Leichtölfraktion (LF) abgeschieden. Die gewählten Kondensationsbedingungen dienen primär der Prozessstabilität sowie dem Schutz nachgeschalteter Anlagenteile und stellen keine gezielte stoffliche Fraktionierung dar. Nicht verdampfbare Bestandteile verbleiben als Koksfraktion im Reaktor. Die nicht kondensierbaren Gase werden nach Durchströmen eines Wasserschlosses der Abluftführung des Technikums zugeführt. Die Gasprobenahme erfolgt unmittelbar von der Einleitung in das Abluftsystem.

Aus den Massen der Produktfraktionen Öl, Gas und Koks wird eine Massenbilanz erstellt. Die Ausbeuten sowie die analytische Charakterisierung der Produktfraktionen ermöglichen Rückschlüsse auf die Zusammensetzung und Qualität der untersuchten Materialströme. Dadurch kann der Einfluss einzelner Aufbereitungsschritte auf die Stoffstromqualität bewertet und der Aufbereitungserfolg quantitativ erfasst werden.

Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchsanlage und die entstehenden Produktströme.

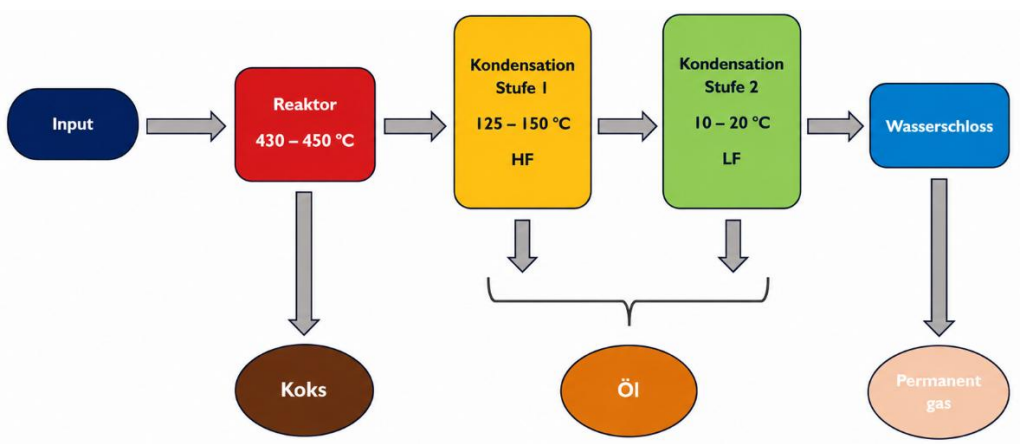


Abb. 2 Fließbild

1.2 Qualifizierung von Einsatzstoffen mittels Labor-Pyrolyse

Die Qualifizierung von Kunststoff- und Abfallströmen erfolgt in der industriellen Praxis überwiegend auf Basis klassischer Laboranalytik. Verfahren wie thermogravimetrische Analysen (TGA) oder Gaschromatographie werden typischerweise mit sehr geringen Probenmengen (<1g) durchgeführt. Diese Methoden liefern grundlegende materialwissenschaftliche Kennwerte, stoßen jedoch bei stark heterogenen Post-Consumer-Stoffströmen hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Repräsentativität an Grenzen.

Insbesondere die Übertragung der Ergebnisse auf reale, großvolumige Inputströme ist eingeschränkt, da lokale Inhomogenitäten im Material nur unzureichend abgebildet werden. Dadurch

ist eine belastbare Vorhersage des Verhaltens im thermochemischen Prozess sowie der resultierenden Produktverteilung nur bedingt möglich.

Zur Schließung dieser Lücke wird die Labor-Pyrolyse als ergänzende Methode eingesetzt. Im Gegensatz zu mikroanalytischen Verfahren ermöglicht sie den Einsatz repräsentativer Probenmengen im Kilogramm-Maßstab (ca. 3-5 kg) und bildet damit reale Prozessbedingungen deutlich besser ab. Die thermochemische Umsetzung unter inertem Gas (Stickstoff) erlaubt eine direkte Bewertung der Produktverteilung in Öl- Gas- und Feststofffraktionen.

Auf Basis der ermittelten Massen- und Stoffbilanzen können Rückschlüsse auf die Zusammensetzung, die Störstoffbelastung sowie die prozessrelevante Qualität des Einsatzmaterial gezogen werden. Die Methode stellt damit ein Bindeglied zwischen klassischer Laboranalytik und verfahrenstechnischer Bewertung dar und ermöglicht eine praxisnahe Feedstock-Qualifizierung für Recycling und Pyrolyseprozesse.

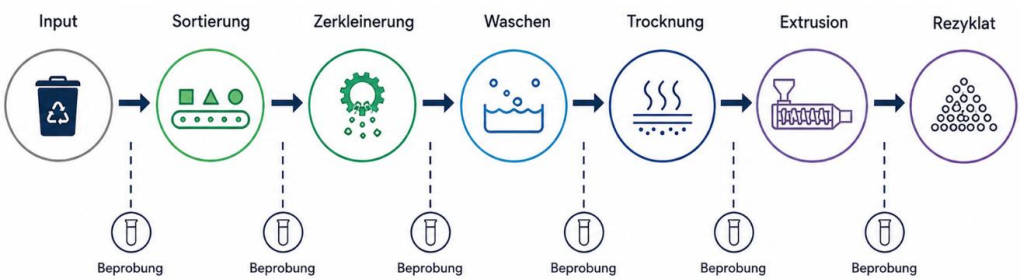


Abb. 3: Beispiel für die Beprobungslinie

Die Ergebnisse zeigen, dass eine verbesserte Aufbereitung unmittelbar mit einer höheren Produktqualität und einer gesteigerten Ölausbeute bei gleichzeitig sinkender Kontamination korreliert. Damit eignet sich die Methode als integrales Werkzeug zur Feedstock-Qualifizierung und zur datenbasierten Optimierung von Recyclingprozessen.

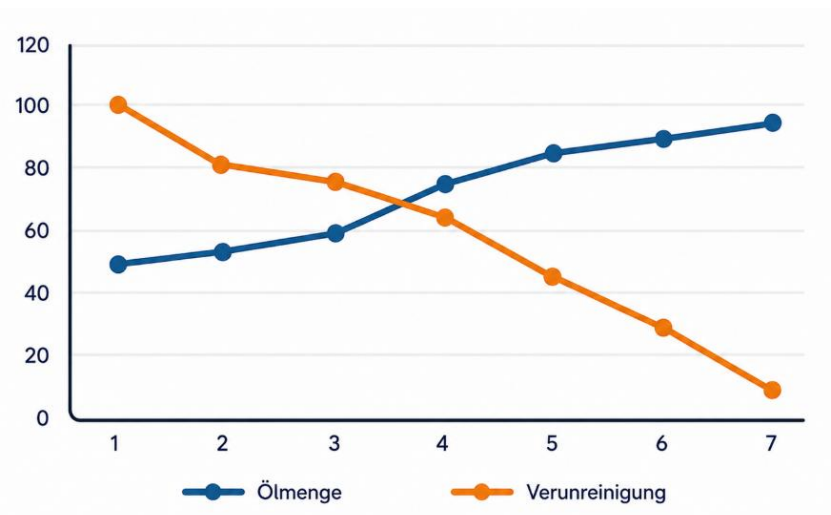


Abb. 4: Ergebnisse der Aufbereitungsschritte

2 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass die Labor-Pyrolyse im Kilogramm-Maßstab eine praxisnahe und aussagekräftige Methode zur Charakterisierung und Bewertung heterogener Post-Consumer-Kunststoffströme darstellt. Während etablierte analytische Verfahren wie Thermogravimetrie (TGA) oder Gaschromatographie wertvolle Informationen über Materialeigenschaften liefern, ist ihre Aussagekraft bei komplex zusammengesetzten Abfallströmen aufgrund der sehr geringen Probenmengen begrenzt. Insbesondere lokale Inhomogenitäten sowie die tatsächliche Variabilität industrieller Stoffströme können dadurch nur unzureichend erfasst werden.

Durch den Einsatz repräsentativer Probenmengen von etwa 3 bis 5 kg ermöglicht die vorgestellte Methode eine deutlich realitätsnähere Bewertung der Materialqualität. Die thermochemische Umsetzung unter definierten Bedingungen liefert eine direkte Abbildung des Verhaltens der Materialien im Pyrolyseprozess und erlaubt die Bestimmung der Produktverteilung in Öl-, Gas- und Feststofffraktionen. Die Kombination aus Massenbilanzierung und analytischer Untersuchung der erzeugten Produkte schafft damit einen ganzheitlichen Ansatz zur Beurteilung von Einsatzstoffen.

Besonders hervorzuheben ist die Möglichkeit, Proben an unterschiedlichen Stellen einer Recyclinglinie zu untersuchen und die Auswirkungen einzelner Aufbereitungsschritte direkt zu vergleichen. Veränderungen in der Produktverteilung sowie in den Eigenschaften der erzeugten Fraktionen liefern wertvolle Informationen über den Verschmutzungsgrad, die Störstoffbelastung und die generelle Qualität des Materials. Dadurch kann die Wirksamkeit einzelner Verfahrensschritte objektiv bewertet und quantitativ beschrieben werden.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass verbesserte Aufbereitungsschritte mit einer steigenden Ölausbeute und einer gleichzeitigen Verringerung der Kontamination einhergehen. Die Labor-Pyrolyse liefert somit nicht nur Informationen über die Eignung eines Materials für nachgelagerte thermochemische Prozesse, sondern kann auch als Werkzeug zur Prozessoptimierung eingesetzt werden. Schwachstellen innerhalb der Aufbereitungskette werden sichtbar, wodurch gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Stoffstromqualität abgeleitet werden können.

Insgesamt stellt die Methode ein wichtiges Bindeglied zwischen klassischer Laboranalytik und verfahrenstechnischer Prozessbewertung dar. Sie ermöglicht die Erstellung eines integralen „Material-Fingerabdrucks“, der sowohl die stoffliche Zusammensetzung als auch das thermochemische Verhalten eines Einsatzstoffes abbildet. Damit leistet die Labor-Pyrolyse einen wertvollen Beitrag zur datenbasierten Auslegung, Bewertung und Optimierung moderner Recycling- und Feedstock-Recycling-Prozesse und unterstützt die Entwicklung effizienterer und robusterer Kreislaufwirtschaftssysteme.

KONTAKT

DI Angelika Luckeneder
Angelika.luckeneder@nge.at
+43 664 825 75 94
Research & Development
Next Generation Elements GmbH
www.nge.at

Quantifizierung und Charakterisierung von Verunreinigungen landwirtschaftlich genutzter Böden durch Mikrokunststoffe

Clemens Lang[1]
[1)] wpa Beratende Ingenieure GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Aufgrund ihrer weiten Verbreitung und Persistenz in der Umwelt sind Mikrokunststoffe in landwirtschaftlich genutzten Böden ein relevantes Forschungsfeld. Die vorliegende Arbeit vergleicht die Mikrokunststoffbelastung in Böden unterschiedlich bewirtschafteter Flächen. Die Analysen erfolgten mittels Stereo- und FTIR-Spektroskopie. Die Bewirtschaftungsformen zeigen deutliche Unterschiede, wobei in Böden Klärschlamm gedüngter Flächen die höchsten Partikelanzahlen zu finden sind, gefolgt von Flächen, die mit Mineral- bzw. Wirtschaftsdünger versorgt werden.

1 EINLEITUNG

Mikrokunststoffe gelangen über mehrere Eintragspfade (bspw. Bewässerungssysteme, die Ausbringung organischer Düngemittel und Bodenverbesserer, sowie diverse Abriebe, etc.) in landwirtschaftlich genutzte Böden und reichern sich dort an. Ziel dieser Arbeit ist es, die Mikrokunststoffgehalte in Ackerböden unterschiedlicher Düngesysteme zu quantifizieren und deren Polymerarten zu bestimmen.

2 MATERIAL UND METHODEN

Untersucht wurden Bodenproben von 13 Ackerflächen, auf die entweder Klärschlamm, Wirtschaftsdünger oder Mineraldünger aufgebracht wurde. Pro Fläche wurden 15 Einzelproben aus der Tiefenstufe 0-30 cm gemäß ÖNORM L 1054 und L 1055 entnommen und zu Sammelproben vereinigt. Nach Trocknung (<60 °C) erfolgte die Fraktionierung mittels Nasssiebung und weiterer Aufbereitung der Proben am Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien.

In sämtlichen Proben der Grobfraktion wurde die Partikelanzahl bestimmt. Für jede Fläche wurden dabei drei Wiederholungen angefertigt. Aus der Feinfraktion wurden insgesamt 18 Proben untersucht. Die Auswahl erfolgte anhand der Maximal-, Minimal- und Medianwerte der Grobfraktion sowie ergänzend durch zufällig ausgewählte Proben je Düngeregime.

Tab. 1: Übersicht der untersuchten Flächentypen und Probenanzahl

Flächentyp	Anzahl an Flächen	Gesamtanzahl Proben
Klärschlammflächen	3	9
Wirtschaftsdüngerflächen (Rindergülle)	3	9
Wirtschaftsdüngerflächen (Schweinegülle)	3	9
Mineraldüngerflächen	4*	12
Gesamt	**13**	**39**

* Die vier Mineraldüngerflächen stammen aus zwei unterschiedlichen Regionen, wobei je zwei Flächen pro Region beprobt wurden.

2.1 Grobfraktion (500 µm–5000 µm)

Die Grobfraktion wurde nach der Nasssiebung mittels Stereomikroskop auf potenzielle Mikrokunststoffpartikel visuell untersucht. Verdächtige Partikel wurden händisch aussortiert und mittels ATR-FTIR-Spektroskopie (Modell: Bruker ALPHA II) charakterisiert.

2.2 Feinfraktion (20–500 µm)

Die Feinfraktion wurde durch zweifache Dichtetrennung mit $ZnCl_2$ (Dichte ≥ 1,6 kg/dm^3) und oxidativer Zerstörung organischer Matrixanteile (Fenton-Reaktion) aufbereitet. Anschließend erfolgte die Charakterisierung der Mikrokunststoffe mittels FPA-FTIR-Mikroskopie (Modell: Bruker LUMOS II).

3 ERGEBNISSE

3.1 Grobfraktion

In den 39 Proben wurden insgesamt 169 Verdachtspartikel mittels Mikroskopie identifiziert wovon mittels ATR-FTIR-Spektroskopie 37 Partikel als Mikrokunststoffe bestätigt wurden. 34 davon konnten auf den mit Klärschlamm gedüngten Flächen nachgewiesen, während lediglich zwei auf Wirtschaftsdüngerflächen und einer auf Mineraldüngerflächen entfielen. Auf allen untersuchten Klärschlammflächen konnten Mikrokunststoffe nachgewiesen werden, wobei sieben von neun Proben positive Befunde aufwiesen. Das am häufigsten identifizierte Polymer war Polystyrol, während Polypropylen, Polyethylenterephthalat und Polyvinylchlorid jeweils nur vereinzelt vorkamen.

3.2 Feinfraktion

Die Untersuchung der Feinfraktion (20–500 µm) erfolgte mittels FPA-FTIR-Mikroskopie, wobei die Ergebnisse sowohl anhand der Partikelanzahl als auch der Partikelfläche ausgewertet wurden. Insgesamt wurden sechs Proben von mit Klärschlamm gedüngten Flächen, sechs Proben von mineralisch gedüngten Flächen sowie vier Proben von mit Wirtschaftsdünger gedüngten Flächen analysiert (drei Schweinegülleflächen und eine Rindergülleflächе). Die reduzierte Probenanzahl in der Kategorie Wirtschaftsdünger ist auf wiederholt aufgetretene technische Schwierigkeiten während der Messungen zurückzuführen.

Die höchsten Mikrokunststoffkonzentrationen sind in der Feinfraktion der mit Klärschlamm gedüngten Flächen festgestellt worden. Insgesamt wurden in den sechs untersuchten Proben rund 4,1 Millionen Partikel nachgewiesen, was einer durchschnittlichen Belastung von etwa 680.000 Partikeln pro Kilogramm Trockenmasse entspricht. Die Belastung der Einzelproben schwankte dabei um den Faktor 20 (159.000 - 1,4 Millionen Partikeln je kg TM). Auffällig war die Dominanz von Polystyrol, das mit rund 98 % nahezu alle detektierten Partikel ausmachte. Daneben wurden lediglich geringe Anteile weiterer Polymere wie Polypropylen, Polyamid und Polyethylen nachgewiesen.

Tab. 2: Mikrokunststoffverteilung partikelbasiert (Klärschlamm gedüngte Flächen, Feinfraktion 20–500 µm)

Probe	Partikelanzahl/kg TM[1]	PS (%)	PA (%)	PP (%)	PE (%)	Sonstige (%)*
Probe 1	158.866	98,0	2,0	0	0	<0,1
Probe 2	1.333.051	97,6	0,8	0,6	0,4	0,6
Probe 3	1.436.851	98,5	<0,1	0,6	0,2	0,7
Probe 4	177.226	96,1	0	0	0	3,9
Probe 5	638.681	95,3	0	0,1	0	4,6
Probe 6	355.800	99,0	0	0	0	1,0

* „Sonstige“ umfasst Polymere mit sehr geringen Anteilen

[1)] Um mögliche Laborverunreinigungen zu berücksichtigen, wurden die Ergebnisse um die Werte einer Blindprobe korrigiert.

Auf den mit Mineraldünger versorgten Flächen wurden insgesamt rund 119.000 Partikel detektiert. Die durchschnittliche Belastung betrug etwa 20.000 Partikel je kg TM, wobei die Werte zwischen 847 und knapp 60.000 Partikeln je kg TM variierten. Es zeigte sich eine vielfältige Polymerzusammensetzung. Am häufigsten wurde Polystyrol (48 %) nachgewiesen, gefolgt von Polyamid (26 %), Polypropylen (11 %) und Polyethylen (7 %). Die Auswertung der Partikelflächen zeigte deutliche Unterschiede zur Partikelanzahl, was auf unterschiedliche Partikelgrößen der jeweiligen Polymere hinweist.

Tab. 3: Mikrokunststoffverteilung partikelbasiert (Mineraldünger gedüngte Flächen, Feinfraktion 20–500 µm)

Probe	Partikelanzahl/kg TM[1]	PS (%)	PA (%)	PP (%)	PE (%)	Sonstige (%)*
Probe 1	14.503	6,9	77,8	2,1	10,1	3,1
Probe 2	5.007	8,9	81,1	0	0	10,0
Probe 3	59.189	65,8	7,0	5,4	9,4	12,4
Probe 4	8.190	70,0	22,1	0	3,4	4,5
Probe 5	847	84,6	0	15,4	0	0
Probe 6	31.408	33,1	32,4	31,6	3,0	0

* „Sonstige“ umfasst Polymere mit sehr geringen Anteilen

Die mit Wirtschaftsdünger gedüngten Flächen wiesen insgesamt rund 198.000 Partikel auf. Rechnerisch ergibt sich daraus eine durchschnittliche Belastung von etwa 50.000 Partikeln je kg TM. Allerdings wurde dieser Wert maßgeblich durch eine einzelne Probe beeinflusst, die rund 185.000 Partikel je kg TM enthielt. Ohne diesen Ausreißer reduziert sich die durchschnittliche Anzahl auf rund 4.300 Partikel je kg TM. Das dominierende Polymer war Polyamid (87 %), gefolgt von Polypropylen und Polystyrol.

Tab. 4: Mikrokunststoffverteilung partikelbasiert (Wirtschaftsdünger gedüngte Flächen, Feinfraktion 20–500 µm)

Probe	Partikelanzahl/kg TM[1]	PA (%)	PE (%)	PET (%)	PP (%)	PS (%)	Sonstige (%)
Probe 1	3.259	0	0	0	100	0	0
Probe 2	9.917	57,2	9,9	7,3	18,4	3,3	4,0
Probe 3	126	0	0	0	0	100	0
Probe 4	184.953	90,5	1,8	0,2	1,8	2,7	3,0

* „Sonstige“ umfasst Polymere mit sehr geringen Anteilen

Zusammenfassend zeigte die Analyse der Feinfraktion deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Düngekategorien. Die höchsten Mikrokunststoffgehalte wurden auf den mit Kärschlamm gedüngten Flächen festgestellt, gefolgt von den Mineral- und Wirtschaftsdüngerflächen (unter Ausschluss des Ausreißers). Während auf Klärschlammflächen nahezu ausschließlich Polystyrol dominierte, wiesen die übrigen Flächen eine deutlich heterogenere Polymerzusammensetzung auf.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede in der Polymerzusammensetzung und eine starke Dominanz einzelner Polymere in bestimmten Proben, insbesondere Polystyrol in der Feinfraktion von Proben aus den mit Klärschlamm gedüngten Flächen, während Proben der mit Gülle und Mineraldünger versorgten Flächen ein deutlich heterogeneres Spektrum (u. a. Polyamid, Polypropylen, Polyethylen) aufweisen.

Zusätzlich zeigt sich eine hohe Schwankung innerhalb der Bewirtschaftungssysteme, allerdings teilweise durch Ausreißer beeinflusst. Insgesamt zeigen die Daten, dass Polymerzusammensetzung, Partikelgröße und räumliche Unterschiede die Belastungsmuster deutlich beeinflussen.

LITERATURVERZEICHNIS

Austrian Standards International. (2023). *ÖNORM L 1054: Probenahme von Böden – Allgemeines, Terminologie*. Wien, Österreich: Austrian Standards International.

Austrian Standards International. (2023). *ÖNORM L 1055: Bodenuntersuchungen – Probenahme ohne Aufrechterhaltung der Bodenstruktur*. Wien, Österreich: Austrian Standards International.

KONTAKT

DI Clemens Lang
clemens.lang@wpa.at
wpa Beratende Ingenieure GmbH
https://www.wpa.at/

GreenHost – Nachhaltige Beherbergungsbetriebe durch Gamification

Hannah Hofbauer[1] & Maximilian Wagner[1]
[1)] Österreichisches Ökologie-Institut, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die Beherbergungsbranche ist ein bedeutender Ressourcenverbraucher und gleichzeitig ein wichtiger Partner für die Umsetzung von Kreislaufwirtschaft. Hotels und andere Beherbergungsbetriebe erzeugen täglich Abfälle durch Lebensmittel, Verpackungen, Reinigung, Ausstattung und Beschaffung. Der Übergang von linearen Wirtschaftsweisen hin zu Kreislaufmodellen stellt die Branche vor Herausforderungen, eröffnet aber auch Chancen für Ressourceneffizienz und Kostenreduktion. Das Erasmus+-Projekt GreenHost entwickelt Tools, die kleine und mittlere Beherbergungsbetriebe bei dieser Transformation unterstützen können. Der vorliegende Beitrag beantwortet die Frage, welche Rolle die Beherbergungsbranche für die Kreislaufwirtschaft spielt – und was sie für eine nachhaltige Veränderung benötigt.

1 EINLEITUNG: GREENHOST UND DIE VERBINDUNG ZWISCHEN HOTELLERIE UND KREISLAUFWIRTSCHAFT

GreenHost ist ein Erasmus+-Projekt, das kleine und mittlere Unternehmen (KMU) im Beherbergungssektor bei ihrer nachhaltigen Transformation unterstützt. Das Projekt mit Laufzeit von Dezember 2024 bis Mai 2027 verbindet Projektpartner aus Österreich (Österreichisches Ökologie-Institut), Deutschland (Fachhochschule des Mittelstands), Polen (PAIZ Konsulting Sp. z o.o.), Bulgarien (Yambol Chamber of Commerce and Industry) und Italien (Fondazione Toscana Sostenibile). Im Mittelpunkt steht die Veränderung täglicher Gewohnheiten und Prozesse im Betrieb. Herzstück ist die Entwicklung einer kostenlosen Lernplattform mit Gamification-Elementen, die die Anwender:innen Schritt für Schritt spielerisch anleitet – sei es Angestellte:r oder Geschäftsführer:in. Diese wird Anfang 2027 veröffentlicht.

Die Abfall- und Kreislaufwirtschaft ist dabei essenziell: Ein Gefühl von Überfluss ist in der Hotellerie häufig ein zentraler Bestandteil des Gästeerlebnisses. Unterkünfte sind Orte mit kontinuierlichem Materialfluss. Lebensmittel werden eingekauft, verarbeitet und entsorgt, Verpackungen fallen täglich an, Reinigungs- und Verbrauchsmaterialien werden eingesetzt und Ausstattung wird regelmäßig erneuert. Für die Abfallwirtschaft bedeutet dies: Die Hotellerie ist nicht nur Abfallerzeuger, sondern auch ein wichtiger Partner für die Umsetzung von Kreislaufwirtschaft. Beherbergungsbetriebe müssen sich die Frage stellen: Wie erzeugen wir ein Gefühl von Überfluss ohne Verschwendung von Ressourcen?

2 NACHHALTIGKEIT UND KREISLAUFWIRTSCHAFT IN DER HOTELLERIE HEUTE

Die Grundlage des Projekts bildet eine Literaturstudie zum Stand der Umsetzung von Nachhaltigkeitsmaßnahmen in den Partnerländern des Projekts. Österreich hat dabei eine besondere Ausgangslage. Es gehört zu den weltweit führenden Tourismusdestinationen und belegte im Jahr 2022 den zehnten Platz bei den internationalen Ankünften, was einem Anteil von 2,73 % am globalen Markt entspricht (United Nations World Tourism Organisation 2024). Mit über 151 Millionen Übernachtungen im Jahr 2023 bleibt der Tourismus ein wichtiger Sektor der österreichischen Wirtschaft. Die Tourismusbranche trug im Jahr 2022 6,2 % zum österreichischen BIP bei, wobei rund 1,8 % davon auf den Beherbergungssektor entfielen (Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft 2023). Der Sektor wird von KMU dominiert, die 99,9 % der in Österreich registrierten Hotels ausmachen (Wirtschaftskammer Österreich 2024). Mit dem Masterplan für Tourismus „Plan T“, dem Österreichischen Umweltzeichen und verschiedenen Beratungs- und

Förderangeboten bestehen bereits wichtige Rahmenbedingungen. Gleichzeitig fehlt vielen kleineren Betrieben die Kapazität, Nachhaltigkeit strategisch neu zu verankern.

Daraus entstehen zentrale Widersprüche: Beherbergungsbetriebe erzeugen Umweltschäden, die die (Winter-)Landschaften, das Klima und die natürlichen Ressourcen zerstören, die Gäste anziehen und den Betrieben erst ihren Wert verleihen. Nachhaltigkeit wird politisch, gesellschaftlich und wirtschaftlich zunehmend gefordert - aber gerade jene Betriebe, die den Großteil der Branche ausmachen, verfügen häufig nicht über ausreichend Zeit, Personal oder finanzielle Mittel für umfangreiche Veränderungen.

Zu den gängigsten in der Beherbergungsbranche gesetzten Maßnahmen zählen die Senkung des Energie- und Wasserverbrauchs, die Installation von LED-Beleuchtung, das Angebot von Bio- und regionalen Lebensmitteln sowie die Minimierung von Lebensmittelabfällen von Buffets (Dolnicar et al. 2020). Das nächste Kapitel wirft einen genaueren Blick auf Lebensmittelabfälle in der Beherbergungsbranche, welche eine besondere Herausforderung darstellen.

2.1 Lebensmittelabfälle in der Beherbergungsbranche

Lebensmittelverluste entstehen in Beherbergungsbetrieben entlang der gesamten Prozesskette: bei Beschaffung und Lagerung, bei der Speisenzubereitung sowie durch Tellerreste der Gäste. Besonders die in der Hotellerie weit verbreiteten (Frühstücks-) Buffets sind herausfordernd: Betriebe möchten einerseits ein vielfältiges Angebot und eine hohe Verfügbarkeit bieten, können andererseits aber nicht exakt vorhersehen, welche Mengen tatsächlich konsumiert werden. Die im Rahmen des Projekts durchgeführte Literaturstudie zeigt, dass Lebensmittelabfälle nicht nur durch betriebliche Abläufe, sondern auch durch das Verhalten und die Erwartungen der Gäste beeinflusst werden. Kulturelle Unterschiede spielen dabei eine wichtige Rolle: In manchen Kulturen wird ein übervolles Buffet mit gutem Service verbunden, wodurch ein gewisses Maß an Überschuss ein Teil des Gästeerlebnisses wird (Dolnicar et al. 2020). Gleichzeitig können Faktoren wie Tellergröße, Portionswahl oder Präsentation der Speisen die Menge der Tellerreste beeinflussen. Kallbekken & Sælen (2013) zeigen, dass gezielte Verhaltensanreize („Nudges“) – beispielsweise kleinere Teller oder bewusstere Kommunikation – dazu beitragen können, Lebensmittelabfälle zu reduzieren, ohne das Gästeerlebnis wesentlich einzuschränken.

Erschwerend kommt hinzu, dass die Weitergabe übrig gebliebener Speisen von Buffets aus Gründen der Lebensmittelhygiene und rechtlicher Anforderungen kaum möglich ist, während nicht ausgegebene Lebensmittel teilweise weiterverwendet werden können. Dadurch liegt ein essenzieller Hebel in der Vermeidung von Buffetresten bereits in der Planung der Speisen und der Ausgabe. Neue digitale Ansätze bieten zusätzliche Möglichkeiten zur Prozessoptimierung: KI-gestützte Systeme können beispielsweise Tellerreste erfassen, Abfallmengen analysieren und Muster erkennen, um Speisenauswahl, Portionsgrößen und Einkaufsentscheidungen laufend anzupassen. Dadurch können Betriebe datenbasiert verstehen, wo vermeidbare Verluste entstehen. Bei der Beschaffung, Produktion, Ausgabe und Kommunikation mit Gästen muss die Vermeidung von Lebensmittelabfällen mitgedacht werden (Dolnicar et al. 2020). Gerade kleinere Beherbergungsbetriebe benötigen hierfür jedoch praxisnahe Unterstützung.

3 MOTIVATION DER BRANCHE FÜR NACHHALTIGKEIT UND KREISLAUFWIRTSCHAFT

Die Literaturstudie zeigt: Die Beweggründe für die Einführung nachhaltiger Praktiken sind sowohl interner als auch externer Natur. Kosteneinsparungen sind ein wesentlicher Treiber (Cigir 2017, Eskerod & Đurić 2018). Viele Hotels setzen auf Nachhaltigkeit in erster Linie aus Gründen der betrieblichen Effizienz und kommunizieren diese Bemühungen möglicherweise nicht effektiv, insbesondere gegenüber den Mitarbeitern (Calisto et al. 2021, Schaffler 2020). Kleineren

Unternehmen fehlt es oft an qualifizierten Nachhaltigkeitsbeauftragten, was die strategische Umsetzung behindert.

Eine im Rahmen des Projekts durchgeführte Befragung von 81 in der Branche tätigen Personen aus den fünf Partnerländern zeigt ein anderes Bild: Der am häufigsten zitierte Beweggrund für Nachhaltigkeit im Betrieb ist der Wunsch, Umwelt und Gemeinschaft zu schützen. An zweiter Stelle stehen Kosteneinsparungen. Was die beiden Studien verbindet: Nachhaltigkeit wird nicht ausschließlich als Belastung gesehen, sondern zunehmend auch als Möglichkeit, effizient zu wirtschaften (GreenHost 2025). Gleichzeitig zeigt die Literaturstudie, dass Management-Engagement und geschulte Mitarbeitende entscheidend dafür sind, ob Nachhaltigkeitsmaßnahmen tatsächlich im Alltag umgesetzt werden (Carlisle et al. 2022).

4 HÜRDEN BEI ABFALLREDUKTION UND KREISLAUFWIRTSCHAFT

Auch nach den Hürden am Weg zur Umsetzung wurden die Betriebe in den Partnerländern gefragt. Rund 67 % nannten fehlende finanzielle Möglichkeiten als wesentliches Hindernis. Zusätzlich spielen Zeitmangel, fehlendes Wissen und komplexe Anforderungen eine wichtige Rolle. Zertifizierungsverfahren werden mitunter als aufwendig empfunden, und die Bereitschaft der Gäste, für nachhaltige Angebote einen Aufpreis zu zahlen, ist ungewiss.

Besonders für kleinere Betriebe ist es schwierig, komplexe Nachhaltigkeitsanforderungen in den Arbeitsalltag zu integrieren. Im Bereich Abfallmanagement betrifft dies beispielsweise die Einführung neuer Trennsysteme (Stichwort Pfand), die Optimierung von Lebensmittelströmen oder die Zusammenarbeit mit externen Partnern. Ein wiederkehrendes Thema in den Interviews ist der Bedarf an niederschwelligen Informationen. Zusätzlich äußerten manche Befragte Zweifel, ob Nachhaltigkeitskommunikation immer mit handfesten Maßnahmen verbunden ist. Mit der am 27. September 2026 in Kraft tretenden Empowering-Consumers-Directive der EU hat Greenwashing auch rechtliche Konsequenzen (Bundeskanzleramt Österreich, kein Datum). Beherbergungsbetriebe müssen daher aktiv werden, um rechtssicher zu kommunizieren.

5 UNTERSTÜTZUNGSBEDARF UND LÖSUNGSANSÄTZE

Die Branche benötigt laut Selbsteinschätzung vor allem finanzielle Unterstützung, praktische Leitfäden und leicht zugängliche Werkzeuge. Zertifizierungen allein werden weniger häufig als Lösung gesehen. Entscheidend ist, dass Betriebe konkrete nächste Schritte erkennen und umsetzen können. GreenHost setzt genau an dieser Lücke zwischen Wissen und Umsetzung an. Das Projekt entwickelt eine Good-Practice-Collection, ein Toolkit und eine spielerische Lernplattform. Der Fokus liegt darauf, Nachhaltigkeit nicht nur theoretisch zu vermitteln, sondern konkrete Gewohnheiten im Betriebsalltag zu verändern. Der Gamification-Ansatz verbindet Lernen mit praktischen Aufgaben. Mitarbeitende werden angeleitet, um Verbesserungsmöglichkeiten in Arbeitsprozessen zu erkennen und umzusetzen. Nachhaltigkeit wird dadurch spielerisch in alltägliche Betriebsabläufe integriert.

6 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Beherbergungsbranche ist ein wichtiger Partner für die Umsetzung von Kreislaufwirtschaft. Besonders in Österreich bestehen gute politische und institutionelle Voraussetzungen, gleichzeitig benötigen viele KMU weiterhin Unterstützung bei Wissen, Umsetzung und Integration nachhaltiger Routinen. GreenHost zeigt einen Weg auf, wie Nachhaltigkeit durch Bildung, digitale Werkzeuge und praktische Anwendungen stärker im betrieblichen Alltag verankert werden kann. Für die Abfallwirtschaft eröffnet sich dabei ein wichtiger Kooperationsbereich: Hotels und andere Beherbergungsbetriebe können von reinen Abfallerzeugern zu aktiven Partnern einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Bundeskanzleramt Österreich. (kein Datum). *Green-Claims – die Dos and Don'ts*. Abgerufen am 17.06.2026 von https://www.usp.gv.at/aktuelles/newsliste/green-claimes.html

Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft. (2023). *Nachhaltigkeit im Tourismus*. Abgerufen am 04.02.2025 von ttps://www.bmaw.gv.at/Themen/Tourismus/nachhaltigkeit.html

Calisto, M., Umbelino, J., Gonçalves, A., & Viegas, C. (2021). Environmental sustainability strategies for smaller companies in the hotel industry: doing the right thing or doing things right? *Sustainability, 13*(18). doi:10.3390/su131810380

Carlisle, S., Ivanov, S., Dijkmans, C., & Marco-Lajara, B. (2022). Environmental Skills Gaps in Tourism and Hospitality Organisations. *Tourism, 70*(3), 411–431. doi:10.37741/t.70.3.6

Cigir, K. (2017). Analyzing CSR related issues in the hotel industry -a supply chain approach. *Conference Proceedings of the International Scientific Conference*, S. 353-384. Abgerufen am 17.06.2026 von https://www.researchgate.net/profile/Daniel-Tomic/publication/322823854_Spectral_analysis_of_macroeconomic_series_for_Croatia/links/5f97eb3b458515b7cfa1898d/Spectral-analysis-of-macroeconomic-series-for-Croatia.pdf#page=355

Dolnicar, S., Juvan, E., & Grün, B. (2020). Reducing the plate waste of families at hotel buffets – A quasi-experimental field study. *Tourism Management, 80*, 104103. doi:https://doi.org/10.1016/j.tourman.2020.104103

Eskerod, P., & Đurić, J. (2018). Motivations for and Comparisons of Green Certificates within the Hotel Industry. *Universal Journal of Management, 6*(6), 179–189. doi:10.13189/ujm.2018.060601

GreenHost. (2025). *Room for improvement? Sustainability in lodging industry SMEs.* Von https://www.fh-mittelstand.de/fileadmin/greenhost-project/content/summary_of_findings_wp2_task_1.pdf abgerufen

Kallbekken, S., & Sælen, H. (2013). 'Nudging' hotel guests to reduce food waste as a win–win environmental measure. *Economics Letters, 119*(3), 325-327. doi:10.1016/j.econlet.2013.03.019

Schaffler, S. (2020). Nachhaltiges Beschaffungsmanagement in der österreichischen Hotellerie. *Master Thesis*. Klagenfurt: Alpen-Adria-Universität Klagenfurt. Von https://netlibrary.aau.at/obvuklhs/content/titleinfo/7075135/full.pdf abgerufen

United Nations World Tourism Organisation. (2024). *World Tourism Barometer.* Abgerufen am 03.02.2025 von https://ttr.tirol/sites/default/files/2024-02/UNWTO_Barom24_01_January_Statistical_Annex_en_0.pdf

Wirtschaftskammer Österreich. (2024). *Hotellerie: Branchendaten.* Abgerufen am 03.02.2025 von https://www.wko.at/statistik/BranchenFV/b-602.pdf

KONTAKT

DI Hannah Hofbauer
hofbauer@ecology.at
+43 699 1 523 61 12
Österreichisches Ökologie-Institut
https://www.ecology.at/

Clean Dregs – Strategien zur Reduktion, Aufbereitung und Nutzung von Grünlaugenschlamm

Andreas Klöckl[1,2], Markus Ellersdorfer[2], Johannes Leitner[3], Klaus Eibinger[4], Michael Strach[5] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]

[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Leoben, Österreich
[3)] Mondi AG, R&D MondiLabs, Hausmening, Österreich
[4)] Zellstoff Pöls AG, Pöls, Österreich
[5)] Smurfit Westrock Nettingsdorf AG & Co KG, Ansfelden, Österreich

KURZFASSUNG: Grünlaugenschlamm (engl.: green liquor dregs; GLD) ist ein bislang überwiegend deponierter Reststoff der Sulfat-Zellstoffproduktion. Die österreichischen Zellstoffproduzenten streben bis 2030 die Implementierung einer Lösung im betrieblichen Kontext an, bei der GLD nicht mehr deponiert werden. Das Projekt Clean Dregs zielt darauf ab, die anfallenden Mengen durch verbesserte Entwässerung zu reduzieren, Prozesschemikalien zurückzugewinnen und einen stofflich verwertbaren Rückstand bereitzustellen. Hierzu wurden GLD aus mehreren österreichischen Werken über ein Jahr hinweg beprobt und umfassend charakterisiert. Die hierbei gewonnen Daten bilden in Kombination mit der systematischen Erhebung und Bewertung von Technologien zur Schlammentwässerung, Rückgewinnung von Na und S sowie zur Abtrennung von Störstoffen und potentieller Verwertungsrouten die Grundlage zur Erreichung der Projektziele. Vielversprechende Verfahren zur Qualitätsverbesserung werden in Laborversuchen erprobt, analytisch begleitet und resultierende Materialströme hinsichtlich Stör- und Schadstoffgehalte bewertet. Erste Ergebnisse zeigen eine ausgeprägte Variabilität der physikalischen, chemischen und mineralogischen Eigenschaften von GLD sowohl innerhalb einzelner als auch zwischen verschiedenen Zellstoffwerken. Unabhängig davon konnten alle untersuchten GLD als Ca-dominierte Materialien mit Mg-haltigem Calcit als vorherrschender mineralogischer Phase beschrieben werden.

1 EINLEITUNG

Grünlaugenschlamm (engl.: green liquor dregs; GLD) fällt bei der Herstellung von Sulfat-Zellstoff nach dem Kraft-Verfahren an. Dabei werden Holzhackschnitzel in Weißlauge (diese besteht hauptsächlich aus NaOH und Na_2S) aufgeschlossen, wobei das im Rohstoff enthaltene Lignin gelöst und Cellulosefasern für die weitere Verarbeitung freigelegt werden. Die dabei entstehende verbrauchte Kochlauge wird als Schwarzlauge bezeichnet und enthält neben den gelösten organischen Bestandteilen auch die eingesetzten Chemikalien. Die Schwarzlauge wird aufkonzentriert und anschließend im Rückgewinnungskessel verbrannt. Dabei werden die organischen Bestandteile energetisch genutzt, während Prozesschemikalien in Form einer Schmelze zurückgewonnen werden. Nach Auflösen der maßgeblich aus Na_2CO_3 und Na_2S bestehenden Schmelze in Wasser spricht man von Grünlauge. Bevor aus dieser in der Kaustizierung gemäß der Reaktion $Ca(OH)_2 + Na_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2\ NaOH$ wieder Weißlauge hergestellt werden kann, müssen enthaltene suspendierte Feststoffe abgetrennt werden. Hierzu werden üblicherweise Sedimentationsklärer oder Cross-Flow-Filtrationseinheiten eingesetzt. Der Sedimentationsrückstand (GLD) wird in ein bis zwei Prozessschritten entwässert und nach derzeitigem Stand der Technik überwiegend unter dem europäischen Abfallcode 03 03 02 – Sulfitschlämme (aus der Rückgewinnung von Kochlaugen) deponiert. Mit ca. 15.000 t/a in Österreich und 0,7–2 Mio. t/a weltweit stellen GLD den größten ungenutzten Abfallstrom aus Sulfat-Zellstoffwerken dar (Kinnarinen et al. 2016).

1.1 Aktuelle Situation

Angesichts steigender Deponierungskosten und Bestrebungen, Materialkreisläufe zu schließen, stellt der Status quo im Umgang mit GLD keine zufriedenstellende Lösung dar. Die stoffliche Verwertung von GLD wird bereits in einigen Fallbeispielen in der Literatur beschrieben, dazu gehören der Einsatz als:

- Deckschicht für sulfidische Abraumhalden (Stahre et al. 2024),
- Ersatzrohstoff in der Klinkerproduktion (Castro et al. 2009),
- Füllstoff in Baumaterialien (Pasandín et al. 2016),
- Dünge- bzw. Bodenverbesserungsmittel in der Land- und Forstwirtschaft (Żołnowski et al. 2019) und
- Neutralisationsmittel für saure Abwässer (Pöykiö et al. 2006).

Trotz der Vielzahl möglicher Anwendungsgebiete konnte die großflächige Nutzung dieses Abfallstroms bisher nicht realisiert werden. Ursachen hierfür sind u. a. die stark variierende Zusammensetzung von GLD sowie einzelne Komponenten, die den Einsatz in den jeweiligen Anwendungsgebieten limitieren (z. B. Alkali- oder Schwermetallgehalte).

2 PROJEKT CLEAN DREGS

2.1 Neuheit und Ziele

Während GLD in der Literatur bisher meist direkt für die Verwertung eingesetzt und bewertet wurden, verfolgt Clean Dregs einen ganzheitlicheren Ansatz (Abb. 1). Das übergeordnete Projektziel ist es, die Mengen an zu deponierendem GLD zu reduzieren, indem der Trockengehalt erhöht wird (A), Wertstoffe wie Na, S und K abgetrennt und in den Produktionskreislauf rückgeführt werden (B) und unter Ausschleusung prozessimmanenter Störstoffe (C) letztlich ein stofflich verwertbarer Rückstand entsteht (D).

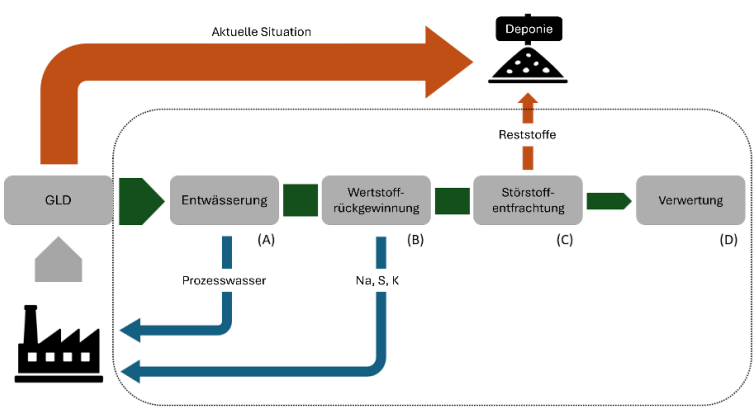


Abb. 1: Clean Dregs-Konzept

Die Kombination aus einer über den Jahresverlauf angelegten Probenahmekampagne, umfassender Analytik von GLD aus mehreren Werken, der gezielten Qualitätsverbesserung und einer holistischen Herangehensweise bildet das Alleinstellungsmerkmal von Clean Dregs. Die branchennahe Forschung adressiert vor dem Hintergrund des Klimawandels und geopolitischer Verwerfungen die resiliente und nachhaltige Versorgung mit Prozesschemikalien. Anders als bisherige Ansätze verknüpft das Projekt die Qualitätsschwankungen von GLD systematisch mit den zugrundeliegenden Prozesstechnologien und den Anforderungen der Kreislaufwirtschaft.

2.2 Methodik

In Zusammenarbeit mit mehreren österreichischen Industriepartnern wurden GLD für die Dauer eines Jahres in regelmäßigen Abständen an verschiedenen Anfallstellen beprobt und hinsichtlich physikalischer, chemischer und mineralogischer Eigenschaften analysiert. Die Probenahme erfolgte in allen Werken nach dem jeweils letzten Entwässerungsschritt. Aufgrund standortspezifischer Unterschiede in den eingesetzten Entwässerungstechnologien wurden an ausgewählten Aufbereitungsstufen zusätzliche Probenahmepunkte definiert.

Durch die wiederholte Beprobung in verschiedenen Werken können sowohl standortspezifische Unterschiede als auch jahreszeitliche Schwankungen der Materialzusammensetzung erfasst werden. Darüber hinaus können Zusammenhänge zwischen Prozessführung, eingesetzten Rohstoffen und den Eigenschaften von GLD identifiziert werden. Die Beprobung an unterschiedlichen Aufbereitungsstufen innerhalb einzelner Werke diente der Erhöhung des allgemeinen Prozessverständnisses im Hinblick auf die Wäsche und Entwässerbarkeit von GLD sowie der Evaluierung verschiedener Technologien bzgl. Effizienz der Chemikalienrückgewinnung und Output-Zusammensetzung.

Ein eigens entwickelter Filtrations-Versuchsstand mit beheizbarer Filternutsche ermöglicht die Erhebung der Filtrationseigenschaften von Grünlauge unter Verwendung verschiedener Prozesshilfsmittel zur Fest-Flüssig-Trennung (Flockungsmittel, Filterhilfsmittel) unter möglichst industrienahen Bedingungen. Die Wirkung von Flockungsmitteln mit verschiedenen Eigenschaftsprofilen wird zudem in weitgehend automatisierten Sedimentationsversuchen (Auswertung von Sedimentationskurven mittels Methoden der digitalen Bildverarbeitung) untersucht.

Zur Charakterisierung kommen unter anderem Elementanalysen nach unterschiedlichen Aufschlussverfahren mittels Massenspektrometrie bzw. Optischer Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS, ICP-OES), Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), Röntgendiffraktometrie (XRD), thermogravimetrische Analysen (TG/DSC), Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR) sowie Eluatanalysen zum Einsatz (Abb. 2). Zur Analyse gelangen sowohl Originalproben aus den beteiligten Werken als auch Proben, die im Zuge von Laborversuchen zur Qualitätsverbesserung von GLD generiert werden.

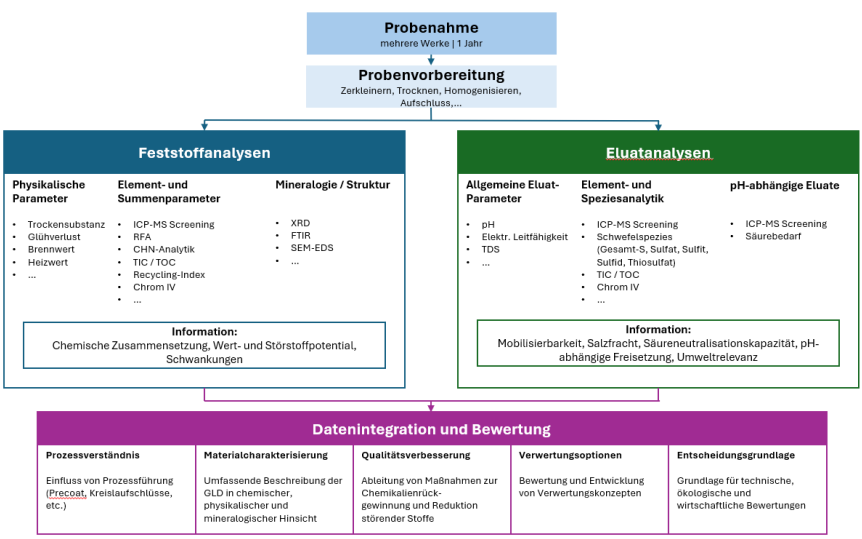


Abb. 2: Schematischer Überblick des Untersuchungsprogramms zur Charakterisierung von GLD sowie anschließender Datenintegration und Bewertung.

Auf Grundlage der Charakterisierung der Ausgangsmaterialien sowie qualitätsverbesserter GLD werden potentielle Verwertungsoptionen systematisch bewertet. Hierzu werden jene Branchen betrachtet, deren Prozesse oder Produkte Rohstoffe mit einer vergleichbaren stofflichen Zusammensetzung erfordern. Neben der umwelttechnischen Eignung auf Basis der erhobenen Materialeigenschaften werden auch die abfallrechtlichen Rahmenbedingungen analysiert, die technische und wirtschaftliche Machbarkeit bewertet sowie Grundlagen für nachfolgende Bewilligungsverfahren erarbeitet. Ergänzend werden Verfahren zur Rückgewinnung von Prozesschemikalien und zur Abreicherung potentiell störender Begleitstoffe entwickelt und untersucht.

3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die über einen Zeitraum von einem Jahr durchgeführte Probenahme ist inzwischen abgeschlossen und bildet eine umfassende Datengrundlage für die weitere Projektbearbeitung. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass GLD sowohl innerhalb eines Werks als auch zwischen verschiedenen Zellstoffwerken eine hohe Variabilität hinsichtlich ihrer physikalischen, chemischen und mineralogischen Eigenschaften aufweisen. Unabhängig von der Herkunft können sämtliche untersuchte GLD als Ca-dominierte Materialien mit Mg-haltigem Calcit als vorherrschender mineralogischer Phase beschrieben werden.
Darüber hinaus deuten die bisherigen Ergebnisse darauf hin, dass insbesondere der Einsatz von Precoat-Filtern mit Kalkschlamm als Filterhilfsmittel sowie unterschiedliche interne Kreislaufschlüsse die Eigenschaften der anfallenden GLD maßgeblich beeinflussen. Die in der Literatur empfohlene Unterscheidung zwischen GLD mit und ohne Kalkzugabe (Precoat) erscheint daher auch für die betrachteten Zellstoffwerke zweckmäßig (Rasmus et al. 2026).
Derzeit liegt der Schwerpunkt des Projekts auf der detaillierten Untersuchung einzelner Elementspezies, um Verfahren zur Rückgewinnung von Prozesschemikalien sowie zur gezielten Abreicherung störender Begleitstoffe entwickeln zu können.
Die bislang gewonnenen Erkenntnisse legen nahe, dass aufgrund der ausgeprägten Heterogenität der GLD standortspezifische Konzepte zur Qualitätsverbesserung und anschließenden Verwertung erforderlich sein werden. Die weitere Projektbearbeitung wird zeigen, inwieweit durch geeignete Aufbereitungsverfahren die Materialqualität gezielt verbessert und dadurch neue Verwertungsoptionen erschlossen werden können.

LITERATURVERZEICHNIS

Castro, F., Vilarinho, C., Trancoso, D., Ferreira, P., Nunes, F., & Miragaia, A. (2009). Utilisation of pulp and paper industry wastes as raw materials in cement clinker production. *International Journal of Materials Engineering Innovation, 1*(1).

Kinnarinen, T., Golmaei, M., Jernström, E., & Häkkinen, A. (2016). Separation, treatment and utilization of inorganic residues of chemical pulp mills. *Journal of Cleaner Production*(133), pp. 953–964.

Pasandín, A. R., Pérez, I., Ramírez, A., & Cano, M. M. (2016). Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with paper industry wastes as filler. *Journal of Cleaner Production, 112*, pp. 853-862.

Pöykiö, R., Nurmesniemi, H., Kuokkanen, T., & Perämäki, P. (2006). Green liquor dregs as an alternative neutralizing agent at a pulp mill. *Environmental Chemistry Letters, 4*(1), pp. 37-40.

Rasmus, J., Kinnarinen, T., & Yliniemi, J. (2026). Perspectives for utilization of green liquor dregs: Considerations for future studies. *Waste Management, 219*, p. 115573.

Stahre, N., Sartz, L., & Bäckström, M. (2024). Chemical characterization of green liquor dregs from 16 Swedish pulp and paper mills between 2017 and 2019. *Environmental Science and Pollution Research, 31*, pp. 45011-45034.

Żołnowski, A. C., Sądej, W., Suski, M. S., Wyrwas, A., & Skrocki, D. (2019). Impact of Paper Mill Waste on Physicochemical Properties of Soil, Crop Yield, and Chemical Composition of Plants. *Clean – Soil, Air, Water, 47*(8), p. 1900080.

Vom Recyclingmaterial zum Infrastrukturbeton: CO_2-reduzierter Recyclingbeton für zwangsbeanspruchte Tunnelbauteile

Joachim Juhart[1], Amr HM Hassan[1], Michael Autischer[1] & Dirk Schlicke[2]
[1)] Technische Universität Graz, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit TVFA, Österreich
[2)] Technische Universität Graz, Institut für Betonbau, Österreich

KURZFASSUNG: Zwangsspannungen infolge von Temperatur- und Schwindverformungen stellen bei massiven Stahlbetonbauteilen im Tunnelbau eine wesentliche Ursache für Rissbildung dar. Parallel dazu erfordert die Dekarbonisierung des Bauwesens eine deutliche Reduktion der CO_2-Emissionen sowie der Primärrohstoffverbräuche von Beton und Stahl. Der Beitrag zeigt einen innovativen CO_2-reduzierten Recyclingbeton für zwangsbeanspruchte Tunnelbauteile im Vergleich zu einem konventionellen Infrastrukturbeton. Der entwickelte Beton kombiniert klinkerreduzierte Bindemittel mit rezyklierten Gesteinskörnungen mithilfe einer optimierten Betontechnologie. Untersucht wurden insbesondere Temperaturentwicklung, Schwindverhalten, Druck- und Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul sowie das Treibhauspotenzial der Mischungen. Die Ergebnisse zeigen, dass trotz eines hohen Anteils an Recyclinggesteinskörnungen die funktionalen Anforderungen für Infrastrukturbauteile erfüllt werden können. Aufgrund der geringeren Hydratationswärme und des reduzierten Elastizitätsmoduls weist der entwickelte Recyclingbeton zudem Potenzial zur Verringerung von Zwangsspannungen und damit des Rissrisikos auf. Insgesamt ist eine Reduktion der Treibhauspotenziale gegenüber dem Referenzbeton mit konventioneller Auslegung um rund 25 % für den Beton und 50 % für die rissbreitenbegrenzende Bewehrung zu erwarten.

1 EINLEITUNG

1.1 Projekthintergrund & Ziele

Massive Infrastrukturbauteile aus Stahlbeton bestehen einerseits aus großen Mengen natürlicher Ressourcen und generieren andererseits bedeutende CO_2-Emissionen, insbesondere durch die vorgelagerte Zementklinker- sowie Stahlproduktion. Zudem sind massive Bauteile wie zum Beispiel Tunnelinnenwände, infolge von Schwind- und Temperaturbeanspruchungen während der Erhärtung besonders anfällig für zwangsspannungsbedingte Rissbildung. Zur Vermeidung von Rissen bzw. Begrenzung der Rissbreiten werden wiederum betontechnologische Maßnahmen und erhöhte Bewehrungsgrade eingesetzt. Beide Ansätze können jedoch zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch und zusätzlichen CO_2-Emissionen führen.
Gleichzeitig gewinnen die Kreislaufwirtschaft und Dekarbonisierung im Betonbau zunehmend an Bedeutung. Sowohl die Stahl- als auch Betonmenge und inkorporierte CO_2-Emissonen können im Sinne der Ressourcenschonung durch optimierte Materialeigenschaften einhergehend mit neuen Berechnungsverfahren reduziert werden.
Im Forschungsprojekt „GreenInfrastructures“ wurde daher ein CO_2-reduzierter Recyclingbeton für zwangsbeanspruchte Tunnelbauteile im U-Bahnbau entwickelt, der folgende Zielsetzungen erfüllen sollte:

- Reduktion des Treibhauspotenzials (Global Warming Potential, GWP)
- Verringerung des Primärrohstoffverbrauchs, Verwertung von Betonabbruchmaterial als rezyklierte Gesteinskörnung in neuem Beton für Innenschalen (Abb. 2)
- ausreichende Verarbeitbarkeit des Betons, mechanische und dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften
- Vermeidung zwangsspannungsbedingter Rissbildung und somit Reduktion der Betonstahlbewehrungsmenge für die Risskontrolle

1.2 Parameter für den Betonentwurf

Besonders während der Erhärtung des Betons besteht die Gefahr der Rissbildung infolge von Zwang (Abb. 1). Durch Verformungsbehinderung entstehen Zugspannungen $\sigma(t)$, welche vereinfacht gemäß Gleichung 1 beschrieben werden können; sie müssen zu jedem Zeitpunkt t der Erhärtung kleiner als die Betonzugfestigkeit $f_{\mathrm{ct}}(t)$ bleiben, um Risse zu vermeiden.

$$\sigma(t) = \int \left(\Delta\varepsilon_{\mathrm{T}}(t) + \Delta\varepsilon_{\mathrm{cs}}(t) + \Delta\varepsilon_{\mathrm{cc}}(t)\right) \cdot a(t) \cdot E(t)\,\mathrm{d}t < f_{\mathrm{ct}}(t) \qquad (1)$$

Die maßgebenden, mit der Zeit (t) veränderlichen Parameter sind:

$\varepsilon_{\mathrm{T}}(t)$ Dehnungen infolge temperaturbedingter Verformungen aus der Temperaturdifferenz ΔT(t) von Hydratationswärme des Betons und Umgebungstemperatur

$\varepsilon_{\mathrm{cs}}(t)$ Dehnungen infolge des Schwindens

$\varepsilon_{\mathrm{cc}}(t)$ Dehnungen infolge des Kriechens von Beton (abhängig von der Spannungsgeschichte des erhärtenden Betons, wobei in unserem Fall das Kriechen nicht untersucht wurde, aber in weiteren Versuchen berücksichtigt werden soll)

$a(t)$ Behinderungsgrad des erhärtenden Bauteils

$E(t)$ effektiver Elastizitätsmodul des Betons

Diese Parameter für die Rissbildung hängen mit dem GWP sowie dem Primärressourcenbedarf über die Rezeptur des Betons eng zusammen. Insbesondere ist der Klinkeranteil des Zements hauptverantwortlich für das GWP und auch für die Hydratationswärme (also letztlich $\varepsilon_{\mathrm{T}}(t)$), der Recyclinggesteinskörnungsanteil wiederum beeinflusst unmittelbar die Steifigkeit ($E(t)$) des Betons. Somit besteht die Chance durch betontechnologische Optimierung (Minimierung des Klinkeranteils, Maximierung des Anteils an Recyclinggesteinskörnungen) eine „win-win“ Situation hinsichtlich Rissvermeidung und CO_2-Reduktion zu schaffen.

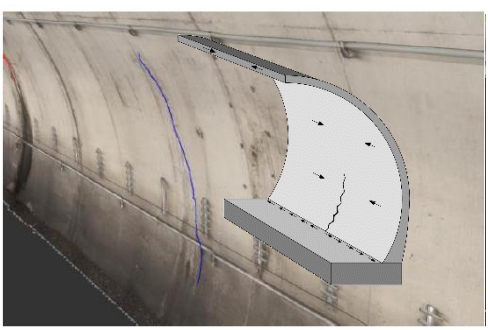


Abb. 1: Rissbildung in einer Tunnelinnenschale infolge Zwangsbeanspruchung



Abb. 2: Abbruch eines Tunnelwiderlagers (temporäres Hilfsbauwerk)

2 MATERIALKONZEPT UND BETONENTWICKLUNG

Im vorliegenden Beitrag werden die relevanten Materialkennwerte eines konventionellen Infrastrukturbetons (REF-BS1A) nach der ÖBV-Richtline Innenschalenbeton (ÖBV, 2012) jenen des entwickelten CO_2-reduzierten Recyclingbetons (CO2r-RB) gegenübergestellt. Der konventionelle Beton entspricht den Anforderungen an eine massive Wand einer U-Bahn Notausstiegsstelle der Wiener Linien der Klasse C25/30 (90) BS1/XW2/XAT-B/XC2 F52. D.h. er muss gemäß ÖNORM B 4710-1 und (ÖBV, 2012) nach 90 Tagen die Festigkeitsklasse C25/30, eine ausreichende Dichtigkeit des Betongefüges (XW2/XAT-B/XC2, nachgewiesen über Wassereindringtiefe < 20mm) und eine ausreichende Pumpbarkeit mit der Konsistenzklasse F52 aufweisen.

2.1 Recyclinggesteinskörnungen

Um Materialkreisläufe zu schließen, wurden rezyklierte Gesteinskörnungen für den Beton aus dem Abbruch eines temporären U-Bahnbauwerks gewonnen (Abb. 2). Das Abbruchmaterial wurde mehrstufig nass aufbereitet (gebrochen, gesiebt und gewaschen) und schließlich in den groben Fraktionen 4/16 mm und 16/32 mm als sortenreiner Betonbruch der Qualitätsklasse RB-A1 eingesetzt. Es zeigte sich, dass die Recyclinggesteinskörnungen eine starke Wasseraufnahme durch kapillare Saugwirkung innerhalb der ersten Minuten bis zur ersten Stunde aufweisen und nach etwa 24 Stunden eine weitgehende Sättigung (von rund 5,5 M.%) erreichen. Durch die volle Vorsättigung der Körnungen konnte eine stabile Verarbeitbarkeit des Frischbetons ohne raschen Konsistenzverlust sichergestellt werden.

2.2 Betonmischungen

In Tab. 1 wird die Referenzmischung (REF-BS1A) mit dem CO_2-reduzierter Recyclingbeton (CO2r-RB) verglichen. Der Recyclingbeton enthielt 50 % rezyklierte grobe Gesteinskörnungen RB-A1 bezogen auf die Gesamtmenge der Kornfraktionen 4 bis 32 mm.

Zur Reduktion der CO_2-Emissionen wurde ein klinkerreduziertes Bindemittel nach dem „Mikro-Füller/Eco-Füller“-Konzept entwickelt (Juhart et al., 2021). Dafür wurde der Anteil von Portlandzement (CEM I SR0) reduziert und durch in ihrer Korngröße abgestufte Kalksteinmehle sowie aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ nach ÖNORM B 3309 (ASI, 2010)) ersetzt. Es wurden Zement CEM SR0 sowie AHWZ verwendet, da beide Stoffe beständig gegen chemischen Angriff sind (in unserem Fall Sulfatangriff) und eine niedrige Hydratationswärmeentwicklung gewährleisten. Zusätzlich erfolgte eine Optimierung der gesamten Sieblinie mithilfe von Füllern und feinen Sanden sowie eine Reduktion des Leimvolumens, wodurch die erforderliche Bindemittelmenge bei ausreichender Verarbeitbarkeit zusätzlich verringert werden konnte.

Tab. 1: Betonrezepturen und GWP Werte der Ausgangsstoffe

Mischung **Bestandteile**	**REF-BS1A** [kg/m³]	**CO2r-RB** [kg/m³]	**GWP (A1)** [kg CO_2e/t]
CEM I 42,5N SR0	240	160	539
AHWZ	80	120	98
Kalksteinmehl in Zementfeinheit	-	40	17
mikrofeines Kalksteinmehl	-	30	44
Sand 0/1, rund	-	240	1,7
Sand 0/2, gebrochen	350	-	1,7
Sand 0/4, rund	715	685	1,7
Kies 4/8, rund	154	135	1.6
Kies 8/16, rund	232	100	1.6
Kies 16/32, rund	480	220	1.6
rezyklierte Gesteinskörnung RB-A1 4/16	-	235	2.2
rezyklierte Gesteinskörnung RB-A1 16/32	-	220	2.2
Fließmittel	1,4	0,99	1530
Luftporenbildner	0,7	0,65	439
Wasser in Mischer zugegeben	170	150	0
Wasser zur Vorsättigung der rezykl. GK		23,4	0
W/B_{per} (performancebasiert, mit 80% Vorsättigungswasser)	0,53	0,48	
W/B (k-Wert 0,8 für AHWZ, mit 80% Vorsättigungswasser)	0,56	0,66	
GWP (Produktionsphase A1) [kg CO2e/m³]	143	105	

3 UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Zur Bewertung des Materialverhaltens wurden Prüfungen gemäß Tab. 2 durchgeführt.

Tab. 2: Durchgeführte Prüfungen

Prüfung	**Kurzbeschreibung** bzw. Verweis auf Norm	**Probekörper** [mm]	**Prüfalter** [d]	**Anzahl**
Druckfestigkeit	ÖN EN 12390-3	Würfel 150	2-5-14-28-56-90	je 2 Stk.
Spaltzugfestigkeit	ÖN EN 12390-6	Würfel 100	2-5-14-28-56	je 3 Stk.
Statischer E-Modul	ÖN EN 12390-13	Zylinder Ø100 × 200	2-5-14-28	je 3 Stk.
Grundschwinden (a) und Trocknungs-schwinden (b)	Messung der Längenänderung vertikal stehender Proben mittels induktiver Wegaufnehmer bei (a) abgedichteter Lagerung sowie (b) unter 50% R.F. und 20°C ab dem 3d nach Herstellung	Zylinder Ø100 × 300	kontinuierliche Messung	je 1 Stk.
Temperaturanstieg des Betons durch Hydratationswärme	ÖN B 4710-3 Messung der Kerntemperaturentwicklung zufolge Hydratation wärmegedämmter Proben	Würfel 200 (in 100 mm XPS)	kontinuierlich bis etwa 14d	je 2 Stk.
Wassereindringtiefe	ÖN B 4710-3	200×200×120	90	je 3 Stk.

In unserem Fall ist betreffend der Schwinddehnungen zwar das Grundschwinden relevant, aber äußerst gering. Das Trocknungsschwinden kann durch eine entsprechend gute Nachbehandlung (Austrocknungsschutz für >2 Wochen) im Zeitraum der Betonerhärtung vernachlässigt werden und bleibt danach für die Makrorissbildung unkritisch. Dehnungen infolge des Kriechens wurden in unserem Fall nicht untersucht, sind abhängig von der Spannungsgeschichte des erhärtenden Betons und sollen in weiteren Versuchen berücksichtigt werden.

Die GWP Berechnung der „embodied CO_2-emissions“ der Produktionsphase A1 des Betons erfolgte nach den Grundsätzen der EN 15804 (ASI, 2022). Das GWP des Frischbetons wurde als Summe der gemäß Stoffanteilen gewichteten GWP-Werte der Ausgangstoffe errechnet (siehe Tab. 1). Diese Werte stammen aus den Umweltproduktdeklarationen (EPDs) der jeweiligen Materialien.

4 ERGEBNISSE UND PERFORMANCE

4.1 Grundanforderungen an Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dichtigkeit

Die geforderten Kennwerte der Verarbeitbarkeit (i.e. ausreichende Konsistenz und Pumpbarkeit über 90 min) und Design-Festigkeit (mind. 39 N/mm² nach 90 d) sowie Dauerhaftigkeitsindikatoren (maximale Wassereindringtiefe < 20 mm) werden von CO2r-RB wie vom Standardbeton (REF-BS1A) erreicht, sind aber im Detail nicht Gegenstand dieses Beitrags.

4.2 Rissrisiko-relevante Materialkennwerte

Die Untersuchungen der Festigkeitsentwicklung über die Zeit ergibt einen ähnlichen Verlauf von CO2r-RB und REF-BS1A, wobei letzterer höhere Absolutwerte erreicht (Abb. 3). CO2r-RB scheint ein etwas günstigeres Verhältnis von Zug- zu Druckfestigkeiten zu haben als REF-BS1A, was allerdings mit einer größeren Anzahl von Prüfkörpern und über einen längeren Zeitraum in weiterführenden Arbeiten verifiziert werden sollte.
Der statische Elastizitätsmodul von CO2r-RB liegt wie für Recyclingbetone zu erwarten unter jenem des Standardbetons (Abb. 4). Der reduzierte E-Modul kann bei zwangsbeanspruchten Bauteilen vorteilhaft sein, da dadurch geringere Spannungen infolge der Verformungsbehinderung entstehen.
Temperatur- und schwindbedingte Verformungen zeigen eine divergierende Tendenz bezüglich des Rissrisikos: Einerseits hat CO2r-RB - wie aufgrund des reduzierten Klinkeranteils zu erwarten – eine etwas geringere Hydratationswärmeentwicklung als REF-BS1A (Abb. 5). Diese reduzierte Hydratationswärmeentwicklung wirkt sich positiv auf die Entstehung thermisch induzierter Zwangsspannungen aus der Differenz von Umgebungstemperatur zu Bauteiltemperatur aus. Andererseits wurde ein etwas ungünstigeres Trocknungsschwindverhalten von CO2r-RB gegenüber dem REF-BS1A beobachtet (Abb.6).

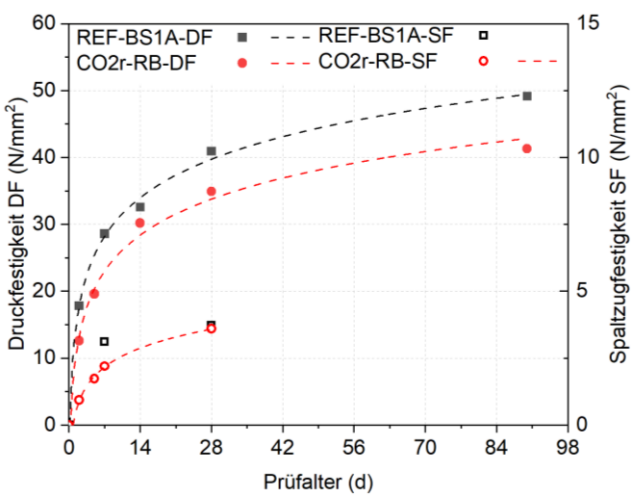


Abb. 3: Druck- und Spaltzugfestigkeit

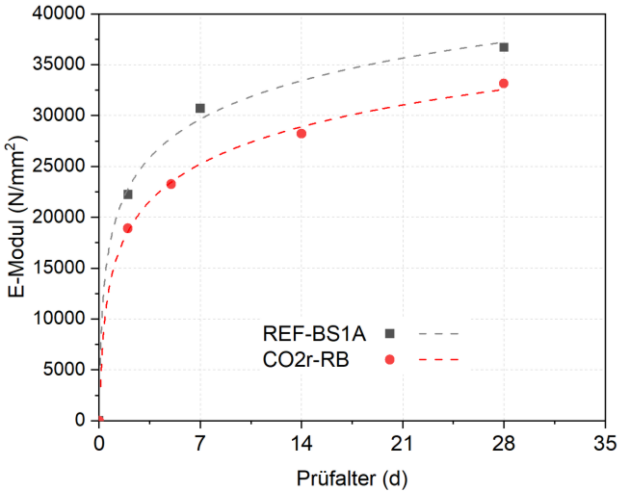
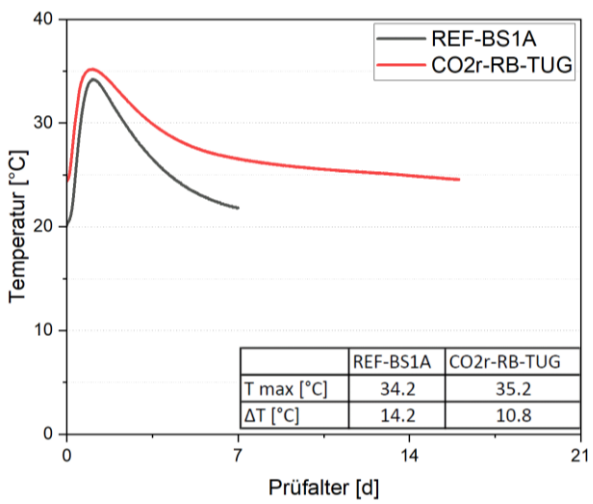


Abb. 4: Elastizitätsmodul



	REF-BS1A	CO2r-RB-TUG
T max [°C]	34.2	35.2
ΔT [°C]	14.2	10.8

Abb. 5: maximale Hydratationstemperatur Tmax und Temperatursteigerung ΔT gegenüber der Frischbeton-temperatur (im Prüfalter 0d)

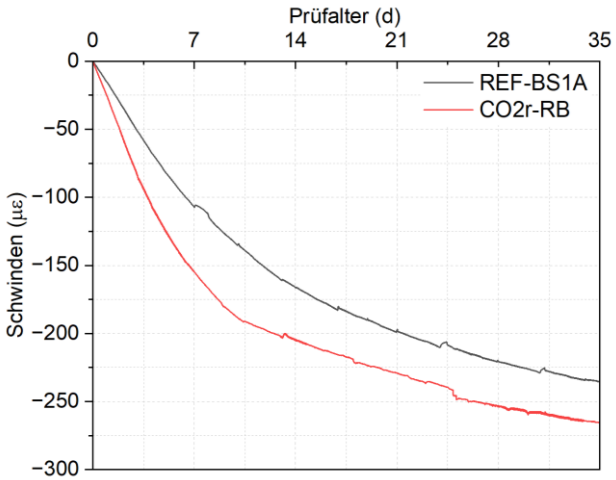


Abb.6: Trocknungsschwinden der Betone bei oberflächlicher Austrocknung (Beginn Zeitpunkt 0 = 3d nach Herstellung)

4.3 Ökologische Bewertung

Die ökologische Bewertung zeigte deutliche Vorteile des entwickelten Recyclingbetons. Durch die Kombination aus klinkerreduziertem Bindemittel und optimierter Betonzusammensetzung konnte das GWP gegenüber dem Referenzbeton um rund 25 % reduziert werden.
Zusätzlich wurde der Verbrauch von Primärrohstoffen deutlich reduziert, indem 50 % der groben, natürlichen Gesteinskörnungen - das sind 25% der gesamten Gesteinskörnungen - durch rezykliertes Material ersetzt wurden.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der Einsatz von Recyclingbeton im Infrastrukturbau wird derzeit häufig durch präskriptive normative Vorgaben der Mischungszusammensetzung eingeschränkt, so ist z.B. der Einsatz von Recyclinggesteinskörnungen für Innenschalenbeton bislang ausgeschlossen. Die vorgestellte Entwicklung eines CO_2-reduzierten Recyclingbetons zeigt jedoch ein hohes Potenzial für den Einsatz in zwangsbeanspruchten Tunnelbauteilen in folgender Hinsicht:

- Alle funktionalen Anforderungen an einen Innenschalenbeton konnten mit dem nach einem performancebasierten Konzept entwickelten, CO_2-reduzierten Recyclingbeton erfüllt werden.
- Durch die Kombination aus klinkerreduziertem Bindemittel und optimierter Sieblinie konnte das Treibhauspotenzial gegenüber dem Referenzbeton um rund 25 % gesenkt werden.
- Der Einsatz von Recyclinggesteinskörnungen führte zu einer deutlichen Reduktion des Primärrohstoffverbrauchs. Darüber hinaus zeigt das Projekt das große Potenzial geschlossener Materialkreisläufe im Infrastrukturbau.
- Der geringere E-Modul sowie die reduzierte Hydratationswärmeentwicklung des CO_2-red. Recyclingbetons verringern das Risiko zwangsspannungsbedingter Rissbildung. Für eine abschließende Bewertung des Rissverhaltens sind ergänzende numerische und experimentelle Untersuchungen im Gange. Es ist eine Reduktion des erforderlichen Bewehrungsgrades um rund 50% und somit weitere Reduktion von CO_2-Emissionen zu erwarten.

Die Ergebnisse zeigen, dass der CO_2-reduzierte Recyclingbeton zukünftig im Infrastrukturbetonbau vorteilhaft angewendet werden könnte, allerdings sind dafür Anpassungen bestehender Regelwerke und Ausschreibungsstandards zu empfehlen (Insbesondere die ÖBV-Richtlinien für Innenschalen und wasserundurchlässige Betonbauwerke).

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des laufenden Branchenforschungsprojekts „Green Infrastructures“, das von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert wird und von der österr. Bautechnikvereinigung ÖBV getragen. Die Autoren danken allen Projektpartnern, insbesondere den österreichischen Infrastrukturbetreibern Wiener Linien, ÖBB und ASFiNAG, der Fa. Wopfinger Transportbeton und den Kolleginnen und Kollegen der Universität für Bodenkultur Wien (Konsortialführung Prof. K. Bergmeister).

LITERATURVERZEICHNIS

ASI (2010). ÖNORM B 3309-1:2010-12-01 Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ) – Teil 1: Kombinationsprodukte (GC/GC-HS). Austrian Standards Institute.

ASI (2022). ÖNORM EN 15804: 2022 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Austrian Standards Institute. https://effects.austrian-standards.at/action/de/private/details/713349/OENORM_EN_15804_2022_02_15

Juhart, J., Autischer, M., Sakoparnig, M. & Krüger, M. (2021). The Realization of Clinker-Reduced, Performance-Based Sustainable Concrete by the Micro-Filler, Eco-Filler Concept. *Materials (Basel, Switzerland)*, *14*(17). https://doi.org/10.3390/ma14174958

ÖBV (2012). *Richtlinie Innenschalenbeton*. Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV).

Entwicklung der ersten Recyclingstufe für PV-Module und Variantenstudie zur weiteren Verarbeitung der anfallenden Rohstoffe

Felix Kiem[1], Matthias Zitterbart[2], Thomas Senfter[1] & Martin Pillei[1]
[1)] MCI Internationale Hochschule, Innsbruck, Österreich
[2)] DAKA Entsorgungsunternehmen GmbH & Co. KG., Schwaz, Österreich

KURZFASSUNG: Durch den zu erwartenden starken Anstieg im Bereich ausgedienter Photovoltaik-Module (PV-Module) ergeben sich für Abfallwirtschaftsunternehmen wirtschaftliche Chancen. Die Zunahme der in Österreich anfallenden Massenströme an End-of-Life(EoL)-PV-Modulen wird von derzeit einigen hundert Tonnen auf kumulative 70 bis 184 kt bis zum Jahr 2040 angegeben, der EU-weite potenzielle Gewinn aus wiedergewonnenen PV-Materialien bis 2050 mit über 20 Mrd. $.
Dieser Beitrag beleuchtet eine mechanische PV-Modul-Zerlegeanlage und somit den ersten Schritt in der Prozesskette der Verwertung von EoL-PV-Modulen. Auch die unmittelbar folgende Weiterverarbeitung und Trennung der anfallenden Fraktionen wurde untersucht. Es werden Empfehlungen für weiterführende, rohstoffrückgewinnende Verfahren präsentiert und diskutiert, wobei eine umfassende Technologierecherche einen Überblick über die aktuellen hydrometallurgischen, physischen und thermischen Aufbereitungsmethoden bietet. In einer Strategie und Ertragsprognose für den Rohstoffhandel wurden lokale Gegebenheiten berücksichtigt und ein grundlegendes Konzept zur Steuerung von regionalen Stoffströmen von EoL-Modulen erstellt.
Es sollen so Kapital-, Transport- und Betriebskosten gesenkt und so ein kostengünstigeres Recycling sowie ein effizienteres Rücknahmesystem ermöglicht werden.

1 ERGEBNISSE

Zu Beginn wurde eine gemeindenspezifische Projektion der zu erwartenden EoL-PV-Module erstellt. Dahinter steckt die Absicht, die Abfallströme in naher Zukunft möglichst genau abzuschätzen, da so vorbereitende logistische Maßnahmen zur Rücknahme der Module getroffen werden können. Anschließend gibt eine Technologierecherche Auskunft über die möglichen Weiterverarbeitungsmöglichkeiten. Diese soll in Kombination mit den untersuchten Rahmenbedingungen wirtschaftlichen Entscheidungen eine fundierte Datengrundlage bieten.

1.1 Projektion der anfallenden EoL-PV-Module

Die Datenbasis für die Analyse umfasst die tatsächlichen Photovoltaik-Daten von PV-Austria und Statistik Austria bis zum Jahr 2025. Ab 2026 werden Prognosedaten verwendet, die sich am geplanten Ausbau in Megawatt-Peak (MWp) orientieren – hier fließen die Angaben des Österreichischen Netzinfrastrukturplans (ÖNIP) sowie die Zielvorgaben aus dem Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (EAG)-Bericht ein. Da andere Autoren wesentlich konservativere Schätzungen zum Ausbau machen, werden auch hier die Werte aus den Zielvorgaben nicht unverändert übernommen (Kastanaki & Apostolos, 2022; Dobra & Wellacher, 2020), s. Abb.1. Die Betrachtung beschränkt sich auf die Bundesländer Tirol und Salzburg und erstreckt sich bis zum Jahr 2040, da darüberhinausgehende Prognosen mit großer Unsicherheit verbunden sind.

Die installierte Leistung (S_t) im Jahr *t* wird über das Weight-to-Power-Ratio (mit 65 t/MWp angenommen, entspricht der stationären Entwicklung in den Jahren 2015-2025) umgerechnet. Für die Modellierung der anfallenden Mengen an EoL-Modulen (O_t) wird über die Weibull-Verteilung die Wahrscheinlichkeit für das Versagen im Jahr *t, F(t)* berechnet. Es werden drei Szenarios beschrieben. Je nach Szenario werden unterschiedliche Faktoren α und β in Gleichung 1 verwendet (Weckend et al., 2016).

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (1)$$

Über Gleichung 2

$$O_t = \sum_{i=0}^{n}\left(S_{t-i} \cdot (F_{i+1} - F_i)\right) \quad (2)$$

wird die Prognose in Abb. 1 erstellt.

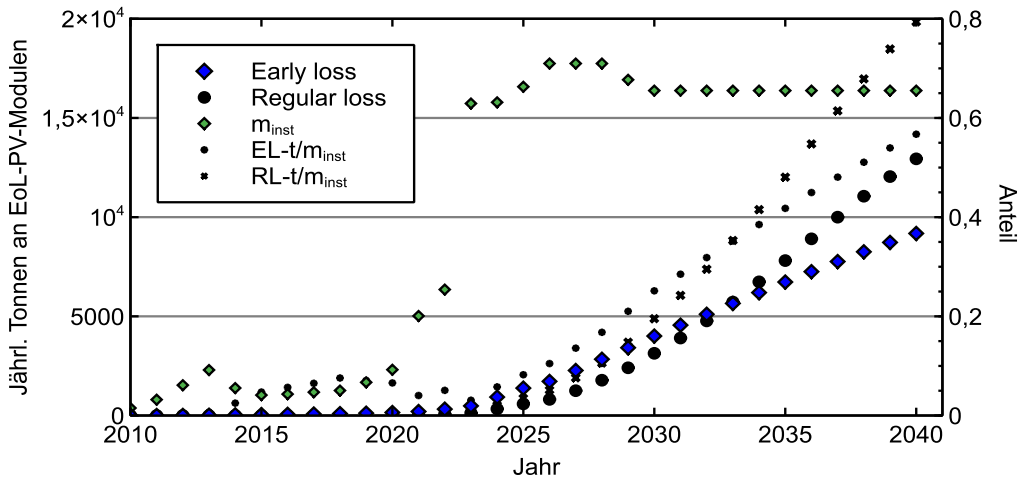


Abb. 1: Prognostizierte jährliche Tonnen an EoL-PV-Paneelen in Tirol und Salzburg nach dem Regular und Early loss Modell der Weibull-Verteilung.

Eine grafischen Visualisierung als Dot Map (Abb. 2) schlüsselt die Daten nach Gemeinde auf. Für jede Gemeinde werden die Abfallmengen für die Jahre 2030, 2035 und 2040 berechnet. Die Größe des Kreises richtet sich nach der Menge in Tonnen. Zusätzlich werden in die interaktive Karte Wertstoffhöfe und die Entfernung nach Schwaz in Stunden an Fahrtzeit eingetragen. Damit sollen logistische Entscheidungen erleichtert werden.

1.2 Technologierecherche zu weiteren Aufbereitungsmöglichkeiten

Das Recycling von PV-Modulen teilt sich im Allgemeinen in fünf Schritte auf (Abb. 3): 1. Die Trennung des Rahmens sowie der Anschlussdose mit Verkabelungen von der eigentlichen Zelle. 2. Die Delaminierung. Für diese stehen zurzeit mechanische, thermische und chemische Verfahren zur Verfügung und unter diesen weitere Varianten. Jedes Verfahren hat sowohl Vor- als auch Nachteile. Thermische Verfahren sind meist mit einem hohen Energiebedarf verbunden, chemische Verfahren bringen einen hohen Verbrauch an giftigen und umweltschädlichen Lösemitteln mit sich und mechanische Verfahren erreichen oft nicht die geforderte Rückgewinnung und Reinheit der Materialien. 3. Die Trennung der in der Delaminierung anfallenden Stoffströme mittels elektrostatischen, optischen oder physikalischen Verfahren. 4. Das Leaching, wobei Metalle durch Säuren aus dem Trägermaterial herausgelöst werden. 5. Die Extraktion der gelösten Metalle durch Fällung, Electrowhinning oder Elektrolyse.

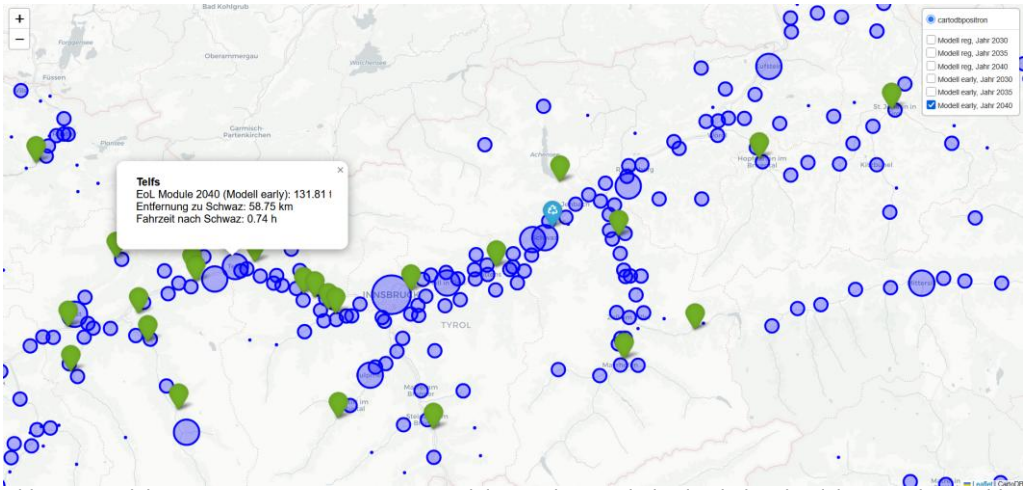


Abb. 2: Interaktive Karte: Mengen an EoL-PV-Modulen nach Gemeinden in Tirol und Salzburg nach verschiedenen Modellen und in den Jahren 2030-2040.

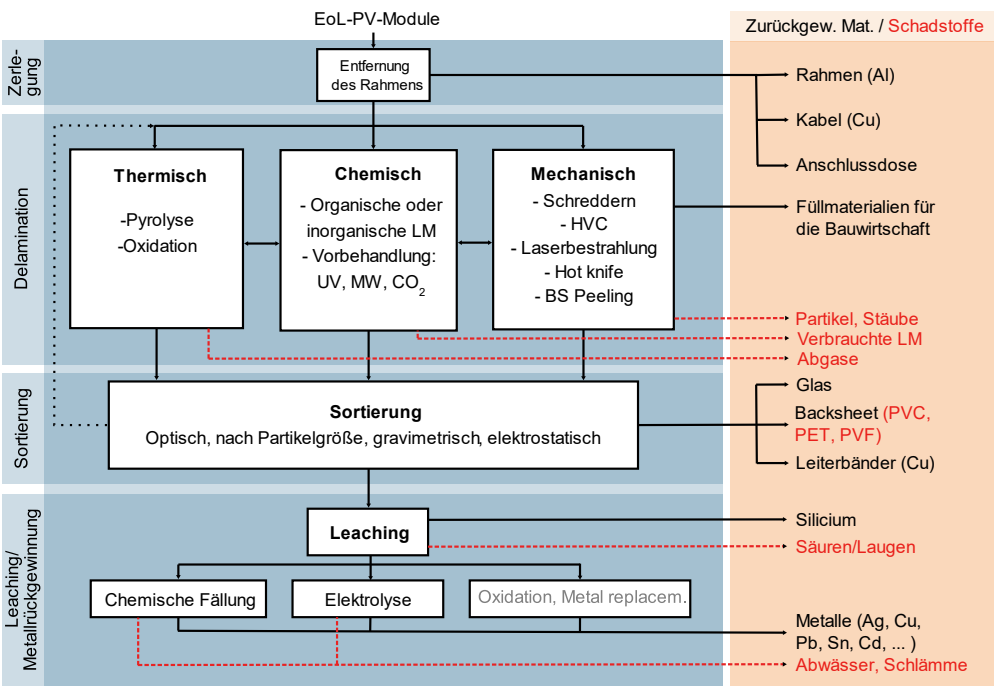


Abb. 3: Mögliche Recyclingverfahren zur Behandlung von End-of-Life PV-Modulen nach (Deng et al., 2022; Tao et al., 2020; Preet & Smith, 2024)

1.3 Marksituation für Sekundärmaterialien, Trends und rechtliche Rahmenbedingungen

Der Markt für Sekundärrohstoffe aus PV-Modulen ist für Metalle wie Silber und Kupfer bereits etabliert, für Glas stellt sich die Situation trotz dessen großen Massenanteils schwieriger dar. Bisher wird Glas meist nur downgecycelt, wobei thermisch oder chemisch aufbereitetes Glas die Qualitätsanforderungen der Hersteller erfüllen kann. Die EVA-Folie hat einen Heizwert ähnlich wie Diesel und kann energetisch verwertet werden. Das Backsheet ist aktuell die einzige nicht recycelbare Komponente in PV-Modulen. Silicium wäre theoretisch als hochreines Material zurückgewinnbar, wobei die Abnehmerpreise je nach Reinheitsgrad variieren. Auch die Aluminium-Paste vom Back Surface Field kann in Kläranlagen oder der Papierindustrie recycelt werden.

Aktuell setzt sich der Trend durch, verschiedene Technologien wie mechanische, chemische und thermische Verfahren zu kombinieren, um die Rückgewinnung effizienter zu gestalten. Unternehmen wie Veolia, Lotus oder Sasil treiben diese Entwicklung voran.

Rechtliche Dokumente von Bedeutung sind die WEEE 2012/19/EU, in Österreich umgesetzt in der EAG-VO, Ausbau- und Förderpläne wie EAG/NEKP/ÖNIP und CRMA.

2 ZUSAMMENFASSUNG

Das Recycling von EoL-PV-Modulen birgt großes ökonomisches Potenzial. Rechtlichen Rahmenbedingungen und Marktbedingungen ändern sich laufend, was Investitionen und langfristige Planungen erschwert.

Aktuell existiert eine breite Palette an Recyclingverfahren, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Bisher lässt sich noch keine klare Tendenz erkennen, welches Verfahren sich durchsetzen wird, vermutlich wird es eine Kombination aus einer Vielzahl sein. Allen ist gemeinsam, dass praktische Erfahrungen mit der Hochskalierung auf industrielle Maßstäbe fehlen.

Die technische Machbarkeit des Recyclings einzelner Materialien aus PV-Modulen ist mittlerweile gegeben. Die Herausforderung liegt nun darin, die Kosteneffizienz der Verfahren zu steigern, um wirtschaftlich tragfähige Lösungen zu entwickeln. Zudem müssen Unternehmen lokale und regionale rechtliche sowie wirtschaftliche Gegebenheiten genau analysieren, da diese den Erfolg oder Misserfolg von Recyclingprojekten maßgeblich beeinflussen können.

LITERATURVERZEICHNIS

Deng R., Zhuo Y., Shen Y. (2022). Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes. *Resources, Conservation and Recycling,* 187, 106612. doi:https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106612

Dobra T. & Wellacher M. (5. 03 2020). End-of-Life Management of photovoltaic panels in Austria: Current situation and outlook, Detritus, *Multidisciplinary Journal for Waste Resources & Residues*, S. 75 – 81. doi:10.31025/2611-4135/2020.13915.

Kastanaki E., Apostolos G. (19. 04 2022). Energy decarbonisation in the European Union: Assessment of photovoltaic waste recycling potential. *Renewable Energy*.

Preet S. & Smith T.S. (2024). A comprehensive review on the recycling technology of silicon based photovoltaic solar panels: Challenges and future out-look. *Journal of Cleaner Production,* 448, 141661. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141661.

Tao M., Fthenakis V., Ebin B., et al. (2020). Major challenges and opportunities in silicon solar module recycling. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications,* 28 (10), 1077–1088. doi:https://doi.org/10.1002/pip.3316

Weckend S., Wade A., Heath G. (2016). *End-of-life management: Solar Photovoltaic Panel.* IRENA. doi:978-92-95111-99-8

Robuste KI-Echtzeitsortierung von Schredderschrott zur Reduktion des intrinsischen Kupfergehalts

Gerald Koinig[1], Walter Martinelli[2], Yves Radmann[2] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] SCHOLZ Austria GmbH, Laxenburg, Österreich

KURZFASSUNG: Die europäische Stahlindustrie transformiert von der Hochofenroute zur Elektroofenroute (EAF), wodurch Energieverbrauch und CO_2-Emissionen sinken, aber Tramp-Elemente wie Kupfer stärker in den Fokus rücken. Kupfer verschlechtert mechanische Eigenschaften und unterliegt Grenzwerten, kann im EAF jedoch nicht über Gasphase oder Schlacke entfernt werden. Im vorliegenden Beitrag wurde untersucht, ob visuell erkennbare Merkmale in Zusammenhang mit dem intrinsischen (legierten) Kupfergehalt stehen und eine Abreicherung durch Ausschleusung spezieller Schredderschrottpartikel ein gangbarer Weg darstellt. Untersucht wurde eine 700-kg-Probe (Eisen-Post-Schredder-Fraktion), die händisch in sechs optisch unterscheidbare Kategorien vorsortiert und mit Handheld-XRF analysiert wurde. Über 4.700 Partikel wurden manuell mittels XRF gemessen. Gussteile zeigten den höchsten intrinsischen Kupfergehalt (gewichteter Median 0,24 Gew.-%), während Bleche die niedrigsten Werte aufwiesen (ca. 0,05 Gew.-%). Ein GoogLeNet-basiertes CNN (Transfer Learning) klassifizierte visuell Gussteile vs. Nicht-Gussteile robust (Gesamtgenauigkeit >94 %, F1: >80 % für Guss, 97 % für Nicht-Guss) trotz Klassenungleichgewicht. Wirksam waren F1-orientierte Verlustfunktionen, gewichtete Data Loader und gewichtete Kreuzentropie. Die Ergebnisse belegen eine Korrelation zwischen Aussehen und intrinsischem Kupfergehalt, wodurch eine gezielte Ausschleusung kupferreicher Teile trotz Limitierungen möglich scheint.

1 EINLEITUNG

Die europäische Stahlindustrie steht vor einem grundlegenden Wandel: Die konventionelle Stahlerzeugung über die Hochofenroute soll zunehmend durch Verfahren auf Basis von Elektrolichtbogenöfen ersetzt werden. Mit dieser Transformation ist das Potenzial verbunden, sowohl den hohen Energieverbrauch als auch die erheblichen CO_2-Emissionen der Stahlproduktion deutlich zu reduzieren (ASISI, 2025; Griffin & Hammond, 2019; IEA, 2020a, 2020b; IEEFA, 2022; KEI, 2022; Spreitzer & Schenk, 2019). Den ökologischen Vorteilen stehen jedoch spezifische Herausforderungen gegenüber, die insbesondere bei der schrottbasierten Stahlerzeugung über die Elektrolichtbogenofen-Route (EAF-Route) auftreten. Dazu gehört der Eintrag unerwünschter Begleitelemente, sogenannter Tramp-Elemente, über den eingesetzten Stahlschrott (Nakajima et al., 2010).

Von besonderer Bedeutung ist hierbei Kupfer, da erhöhte Kupfergehalte die mechanischen Eigenschaften des erzeugten Stahls beeinträchtigen können. Entsprechend enthält bereits die EN 10025-2:2019 Vorgaben für den maximal zulässigen Kupferanteil in verbreiteten Baustählen. Für die Stahlsorte S235 gilt beispielsweise ein Grenzwert von 0,60 Gew.-% (ASISI, 2025). Bei Stählen für anspruchsvollere Einsatzbereiche liegen die zulässigen Werte deutlich niedriger. So darf Feinblech für Anwendungen in der Automobilindustrie etwa 0,20 Gew.-% Kupfer enthalten, während für Tiefziehstähle lediglich 0,06 Gew.-% vorgesehen sind.

Da Kupfer im Elektrolichtbogenofen weder über die Gasphase abgeschieden noch in die Schlacke überführt wird, kann der Kupfergehalt nur durch vorgelagerte Maßnahmen beeinflusst werden. Hierzu zählen insbesondere die Entfernung kupferhaltiger Bestandteile aus dem Eingangsmaterial sowie die Verdünnung des Schrotts durch den Einsatz von Primärstahl (Nakajima et al., 2010; Hiraki et al., 2011). Kupfer ist jedoch nicht ausschließlich als qualitätsminderndes Element

in der Stahlproduktion relevant. Einerseits gibt es spezielle Stähle, in denen Kupfer gezielt zulegiert wird. Andererseits wird es sowohl im EU Critical Raw Materials Act als auch in der US-amerikanischen Liste strategischer Rohstoffe geführt (EU, 2023; U.S. Department of Energy, 2023). Diese strategische Einordnung ist unter anderem auf die zentrale Bedeutung des Metalls für die Energiewende zurückzuführen (Gregoir & van Acker, 2022). Vor dem Hintergrund einer Kupfernachfrage, die das verfügbare Angebot zunehmend übersteigt, wird es daher immer wichtiger, vermeidbare Kupferverluste in minderwertigen Stahlprodukten zu reduzieren (Elshkaki et al., 2016; Wellmer & Hagelüken, 2015).

Nichtsdestotrotz reichert sich Kupfer seit Jahrzehnten in diversen Stahlprodukten an. Hierbei ist von außen oft nicht ersichtlich, dass sich im vorliegenden Partikel Kupfer verbirgt (Daehn et al., 2017). Im Folgenden wird dieser Kupferanteil als Legierungskupfer bezeichnet.

Im österreichischen Leitprojekt KIRAMET wurde erfolgreich ein KI basiertes Verfahren zur Aussortierung von Kupferhaltigen Schredderschrottpartikeln mittels kostengünstiger RGB-Kameras entwickelt und demonstriert. Ein großer Vorteil dieser Herangehensweise ist, dass klar erkennbare Kupferhaltige Komponenten wie Spulen oder Kabel sowie definierte Teile, von denen man weiß, dass sie Kupfer enthalten (wie z.B. Elektromotoren) sehr gut erkannt werden und aussortierbar sind, was in mehreren Publikationen bereits dargestellt wurde (u.a. Koinig et al. 2026). Der Nachteil dieses Ansatzes ist jedoch, dass sogenanntes intrinsisches Kupfer, welches als Legierungskupfer in nicht näher definierten Teilen vorliegt, nicht erkannt werden kann, da keine chemische Charakterisierung der Partikel erfolgt.

Im vorliegenden Beitrag wurde untersucht, ob es eine Korrelation zwischen dem Aussehen von Post-Schredder Stahlschrottpartikeln und dem Vorliegen von intrinsischem Kupfer gibt.

1.1 Probenmaterial, Vorsortierung und Bildaufnahmen

Für diese Untersuchung wurde eine ca. 700 kg schwere Probe aus der magnetischen Post-Schredder-Fraktion einer Großschredderanlage in Österreich entnommen. Diese Anlage verarbeitet hauptsächlich Altfahrzeuge und metallische Haushaltsabfälle sowie Weißware. Die Proben wurden in dem Zustand verwendet, in dem sie nach dem Schredder anfielen, wobei die Größe zwischen 2 cm und etwa 20 cm lag. Die Partikel dieser Fraktion wurden anfänglich händisch vorsortiert. Dabei wurden Partikel mit offensichtlichem Kupferanteil entfernt. Insgesamt umfasste die verbleibende Eisenfraktion Partikel, bei denen kein Kupfer sichtbar war und deren äußeres Erscheinungsbild keinen Hinweis auf enthaltenes Kupfer lieferte. Diese Eisenfraktion enthielt sowohl Partikel aus Schmiedeeisen als auch aus Gusseisen. Basierend auf dem Aussehen, erfolgte eine weitere Kategorisierung in die folgenden Gruppen: Drähte, Gussteile, Befestigungselemente (z.B. Schrauben, Muttern), Schmiedeteile, Federn, Bleche (vgl. Abbildung 1).

Während dieser manuellen Vorsortierung wurden zusätzlich weitere visuelle Merkmale der Partikel erfasst, darunter die Farbe, die Form, das Vorhandensein von Hohlräumen oder Beschichtungen sowie die Masse der Partikel. Jedem Partikel wurde eine eindeutige Identifikationsnummer zugewiesen und es wurde zur späteren Referenz und zum Modelltraining auf einem Förderband liegend als Bild aufgenommen (vgl. Abbildung 1).



Abb. 1: Beispiele für Vertreter der verschiedenen Kategorien an Schredderschrottpartikeln kategorisiert nach deren Aussehen: Gussteile, Federn, Drähte, Bleche, Befestigungselemente (von links nach rechts).

1.2 Erfassung der chemischen Zusammensetzung und Modell-Training

Zur Erfassung der chemischen Zusammensetzung wurden 4733 Schrottpartikel mit einem tragbaren Röntgenfluoreszenzspektrometer individuell erfasst. Die Schrottpartikel wurden so zusammengestellt, dass möglichst viele unterschiedliche, visuell unterscheidbare Partikel jeder der genannten sechs Kategorien vertreten waren. Verwendet wurde das Handheld-XRF-Spektrometer S1 TITAN von Bruker mit der hinterlegten Messmethode „Alloys 2“. Für die Messung wurde die Oberfläche der Schrottpartikel nicht verändert (Anschleifen oder ähnliches). Gemessen wurde die Zusammensetzung somit auf eine Art und Weise wie sie auch durch ein sensorgestütztes XRF-Aggregat erfasst werden würde.

Für das Training wurde ein auf GoogLeNet basierendes Convolutional Neural Network (CNN) eingesetzt, wodurch Transfer Learning genutzt werden konnte [Google Net CNN]. Dieser Transfer-Learning-Ansatz ermöglicht es, Modelle auch auf Grundlage eines vergleichsweise kleinen Datensatzes zu trainieren. Für das Training wurden die Partikel in die Klassen „Guss“ und „Nicht-Guss“ unterteilt. Der Datensatz wurde anschließend in Trainings-, Validierungs- und Testdaten aufgeteilt. Die Trainings- und Validierungsdatensätze wurden während der Trainingsphase des Modells verwendet, während der Testdatensatz zur späteren unabhängigen Bewertung der Modellleistung anhand zuvor nicht gesehener Bilder diente.

2 ERGEBNISSE

Durch die Zusammenfassung der Gehalte an Kupfer aller Partikel innerhalb jeder Kategorie wurden die maximalen, die minimalen, die arithmetischen Mittelwerte und die gewichteten medianen Kupfergehalte der Eisenschrottpartikel ermittelt (vgl. Tabelle 1). Für die visuell unterscheidbare Klassen, die potenziell auch von einem Computer-Vision-System erkannt werden können, zeigten sich deutliche Unterschiede in Bezug auf den Kupfergehalt.

Abbildung 2 zeigt die Kupfergehalte als gewichteten Median sowie jene von Fe. Abbildung 2 zeigt, dass Gusspartikel einen intrinsischen Kupfergehalt von 0,24 Gew.-% (gewichteter Median) aufweisen. Dieser liegt zum einen oberhalb des Grenzwerts für walzfähigen Stahl und zum anderen über den Werten der übrigen Kategorien. Der höhere Kupfergehalt der Drähte (0,36 Gew.-%) könnte durch die oberflächennahe Messweise der Röntgenfluoreszenzanalyse erklärt werden. Da Drähte häufig mit Chrom beschichtet sind und darunter eine kupferhaltige Schicht aufweisen, ist dieser Messwert möglicherweise nur eingeschränkt aussagekräftig. Die nächsthöhere Kategorie hinsichtlich des Kupfergehalts sind Befestigungselemente mit 0,13 Gew.-%, womit ihr Wert deutlich unterhalb des relevanten Kupfergrenzwerts liegt.

Tab. 1: Kupfergehalte der sechs definierten Kategorien (Minimaler und maximaler Gehalt, arithmetischer Mittelwert inkl. Standardabweichung sowie gewichteter Median); alle Angaben in Gew.-%).

Kategorie	Minimal-gehalt	Arithmetischer Mittelwert	Standard-abweichung	**Gewichteter Median**	Maximalgehalt
Gussteile	0,01	0,53	1,69	**0,24**	20,72
Schmiedeteile	< 0,01	0,28	1,97	**0,11**	55,03
Befestigungselemente	0,02	0,59	5,38	**0,14**	76,86
Bleche	0,02	0,06	0,03	**0,05**	0,18
Federn	0,02	0,21	2,24	**0,10**	16,75
Drähte	0,03	4,11	12,23	**0,36**	64,85

Partikel, die aufgrund charakteristischer Bruchflächen und spröder Bruchmerkmale visuell, als Gussteile klassifiziert wurden, wiesen einen höheren Kupfergehalt auf. Eine gezielte Ausschleusung dieser Partikel könnte die Gewinnung eines hochwertigen Stahlschrotts für die Sekundärnutzung ermöglichen. Diese Partikel stellen daher ein geeignetes Ziel für einen nachgeschalteten Sortierschritt dar, wenn der Kupfergehalt durch die Entfernung von Partikeln mit einer erhöhten intrinsischen Kupferbelastungen reduziert werden soll.

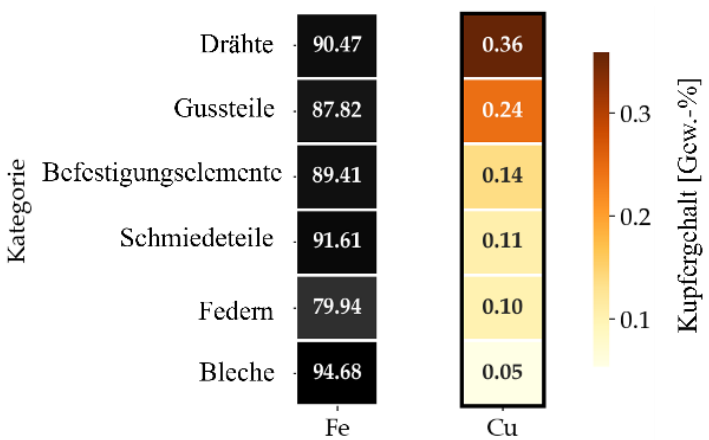


Abb. 2: Korrelation zwischen dem Aussehen der Eisenschrottpartikel und des Kupfergehaltes.

Das trainierte CNN auf Basis von GoogLeNet erzielte nach Training, Validierung und Test eine zufriedenstellende Klassifikationsleistung, obwohl der verwendete Datensatz eine deutliche Klassenungleichverteilung aufwies. Diese Ungleichverteilung könnte jedoch zugleich die reale Zusammensetzung von Schrottströmen wiederspiegeln. Das Modell erreichte eine Genauigkeit von über 94 %. Für Gusspartikel wurde ein F1-Score von über 80 % erzielt, während der F1-Score für Nicht-Gusspartikel bei 97 % lag. Der F1-Score stellt in diesem Zusammenhang einen aussagekräftigeren Leistungsindikator dar als die reine Genauigkeit, da er die unausgewogene Verteilung der Klassen berücksichtigt. Zu den wirksamsten Hyperparametern und Trainingsmaßnahmen gehörten die Verwendung einer am F1-Score orientierten Verlustfunktion zur Berücksichtigung des Klassenungleichgewichts sowie ein gewichteter Data Loader und eine gewichtete Kreuzentropie-Verlustfunktion während des Trainings und der Validierung.

3 DISKUSSION UND AUSBLICK

Vorläufige Versuche mit einem einfachen, auf GoogLeNet basierenden CNN zeigten, dass sich Gussteile sich allein anhand visueller Merkmale zuverlässig automatisiert erkennen lassen. Das trainierte GoogLeNet-Modell klassifizierte 89 % aller Gussteile im Testdatensatz korrekt und erkannte 96 % aller Nicht-Gusspartikel richtig. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Modell weder vollständig optimiert noch umfassend kalibriert wurde. Der Versuch diente lediglich einer ersten Abschätzung, ob sich visuell als Gussteile klassifizierte Partikel allein auf Grundlage niedrig aufgelöster Bilddaten von den übrigen Partikeln unterscheiden lassen. Obwohl die analysierten Objekte die große Vielfalt und Heterogenität der in Schredderschrott enthaltenen Partikel niemals vollständig repräsentieren kann und auch die durchgeführte XRF-Analyse nur die Elementverteilung an der Oberfläche widergeben kann, weisen die vorliegenden Ergebnisse auf folgendes hin: Intrinsisches Kupfer stellt weiterhin eine wesentliche Herausforderung dar und eine Abreicherung von Kupfer nur durch Entfernung von Partikeln mit extrinsischem Kupfer ist mit Sicherheit nicht ausreichend, um die niedrigen Grenzwerte für qualitativ hochwertige Stähle zu erfüllen. Durch die Identifikation visueller Merkmale, die mit erhöhten Gehalten an latentem Kupfer zusammenhängen, können automatisierte, auf Computer Vision basierende Sortiersysteme deutlich verbessert werden und stellt einen möglichen und vergleichsweise günstigen Ansatz dar.

4 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 Eisenschrott.

LITERATURVERZEICHNIS

ASISI - Austrian Standards International Standardisierung und Innovation (2025) 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.

Daehn, K. E., Cabrera Serrenho, A. & Allwood, J. M. (2017) How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? Environmental Science & Technology, 51(11), 6599–6606. DOI: 10.1021/acs.est.7b00997.

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.

EU - 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 (2020a) 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 (2020b) 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.

IEEFA - Institute for Energy Economics and Financial Analysis (2022) Steel fact sheet. https://ieefa.org/sites/default/files/2022-06/steel-fact-sheet.pdf.

Koinig, G., Aberger, J., Lorber, B., Kuhn, N., Martinelli, W., Radmann, Y., & Tischberger-Aldrian, A. (2026) Robust YOLO-Based Ejection of Copper-Containing Particles in Heavily Corroded Scrap Towards Green-Steel Production. Processes, 14(5), 746. https://doi.org/10.3390/pr14050746.

Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI), ein Geschäftsbereich der Zukunft – Umwelt – Gesellschaft (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.

greenPLAST-food – Grüne Kunststoffrecyclingfabrik für Lebensmittelkontaktmaterialien

Gerald Koinig[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Department für Umwelt- und Energieverfahrenstechnik, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Konventionelle Metriken der Objektdetektion wie Mean Average Precision, Precision und Recall liefern wertvolle Informationen über die Modellleistung, bilden jedoch die betrieblichen Anforderungen der sensorbasierten Abfallsortierung nicht unmittelbar ab. In dieser Studie wird Recovery at a predefined Purity (Recovery@Purity) als anwendungsorientierte Bewertungs- und Checkpoint-Auswahlmetrik für die YOLO-basierte Sortierung von leichten Polypropylenverpackungen untersucht. Hierfür wurde ein Datensatz mit 11.548 Bildern und 18.490 manuell annotierten Instanzen von PP-Lebensmittelkontaktverpackungen aus 16 Big Bags erstellt. Mehrere YOLO-Modellvarianten wurden mit schrittweise größeren Datensätzen trainiert, die von Bildern eines einzelnen Big Bags bis zu Bildern aus allen 16 Big Bags reichten, und anschließend anhand eines gemeinsamen, unabhängigen Testdatensatzes bewertet.

1 EINLEITUNG

Die Europäische Union hat ehrgeizige Ziele festgelegt, um die Recyclingquote von Kunststoffverpackungen bis Ende 2025 auf 50 % und bis Ende 2030 auf 55 % zu erhöhen. Dabei wird in der Verpackungs- und Verpackungsabfallverordnung auch ein besonderer Schwerpunkt auf Lebensmittelkontaktmaterialien (Food Contact Materials, FCM) gelegt. Die Einhaltung zentraler Rechtsvorschriften wie der Verordnung (EG) Nr. 1935/2004, der Verordnung (EU) Nr. 10/2011 und der Verordnung (EU) 2022/1616 setzt voraus, dass recycelte Materialien, die für Lebensmittelkontaktanwendungen (Food Contact Applications, FCA) eingesetzt werden, strenge Anforderungen an Dekontamination und Sicherheit erfüllen (European Commission, 2004; 2011; 2022). Diese Vorschriften erhöhen nicht nur die Anforderungen an das Recycling, sondern eröffnen zugleich Chancen für Unternehmen, die hochwertige recycelte Polyolefine bereitstellen können, die für Lebensmittelkontaktanwendungen geeignet sind. Die von der Europäischen Union geförderte Strategie der Kreislaufwirtschaft legt den Schwerpunkt auf die Verringerung von Abfällen, die Wiederverwendung von Ressourcen und die Reduktion von Kohlenstoffemissionen über den gesamten Lebenszyklus von Materialien hinweg. Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE), die in großem Umfang für Verpackungen eingesetzt werden, stellen hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen eine erhebliche Herausforderung dar. Werden sie nicht ordnungsgemäß recycelt, tragen sie zur Anreicherung von Kunststoffabfällen auf Deponien und in den Ozeanen bei und verursachen erhebliche Umweltschäden, darunter auch die Verschmutzung durch Mikroplastik (Arijeniwa et al., 2024). Die derzeit dem Stand der Technik entsprechenden Recyclingtechnologien für Polyolefine sind nur eingeschränkt in der Lage, die Anforderungen an die Lebensmittelsicherheit zu erfüllen. Herkömmliche Recyclingverfahren für PP und PE können die Materialien häufig nicht ausreichend dekontaminieren, insbesondere wenn diese mit Verunreinigungen in Kontakt gekommen sind, sei es durch die vorgesehene Nutzung oder durch eine unbeabsichtigte Verwendung durch Verbraucherinnen und Verbraucher (Bichler et al., 2024). Eine der größten Herausforderungen beim Recycling von Post-Consumer-Kunststoffabfällen zu Lebensmittelkontaktmaterialien besteht in der Sortierung, da die Verordnung (EU) 2022/1616 verlangt, dass Rezyklate für Lebensmittelkontaktmaterialien aus ehemaligen Lebensmittelkontaktmaterialien stammen.

In dieser Arbeit wird die Fähigkeit gängiger Single-Shot Detectoren post-consumer food Packaging von non-food Packaging zu unterscheiden untersucht. Weiters wird hiervon abgeleitet, in wieweit diese gängigen Modelle in der Lage sind von geringer Probemenge zu generalisieren. Um die Bewertung von Machine Learning Modellen näher an die Gegebenheiten der Abfallwirtschaft zu bringen, wird eine Bewertungsmethode für Sortierperformance basierend auf Ausbringen bei vorgegebener Reinheit vorgeschlagen. Diese Methode soll dabei helfen, neben den üblichen Modell Key Performance Indikatoren wie mean average precision, Recall und Precision, die Performance eines Sortiermodells bei Anwendung in Sortieranlagen abzuschätzen.

2 MATERIAL UND METHODEN

In Summe wurden 22 Bigbags vorsortiertes Material aus einer österreichischen Abfallsortieranlage entnommen. Das vorsortierte Material wurde asu der Polypropylen Hell Fraktion entnommen, sollte also nur noch haus Post-Consumer Leichtverpackungen aus PP mit heller Farbe bestehen. Diese 22 Bigbags wurden anschließend in 16 Trainingsbags und 6 Testbags unterteilt um eine Vermischung von Trainings- und Testdaten auszuschließen. Sämtliche Aufnahmen und Sortierversuche wurden im Digital Waste Research Lab der Montanuniversität durchgeführt. Der Aufbau ist in Abbildung 1 ersichtlich. Ein Steigförderer (1) wurde eingesetzt, um das Material einem Dosierbunker (2) zuzuführen, der es anschließend auf ein Homogenisierungsförderband (3) aufgab. Dieses Förderband transportierte das Material zu einem zweiten Steigförderer (4), der es auf eine Vibrationsrinne (5) übergab. Dort wurden die Partikel weiter vereinzelt, sodass ein homogener, vereinzelter Materialstrom auf das Beschleunigungsband mit einer Bandgeschwindigkeit von 3 m/s und durch die darüber angeordnete Kamerabox (6) geführt werden konnte. Für die Sortierung wurde eine Hochdruck-Düsenleiste mit 80 Düsen und einem Betriebsdruck von 4,5 bar eingesetzt. Diese schleuste erkannte Lebensmittelverpackungspartikel innerhalb der Expansionshaube (7) aus. Anschließend wurde das Material über zwei Förderbänder ausgetragen: eines für das ausgeschleuste Material und eines für das abgewiesene Material (8E, 8R).

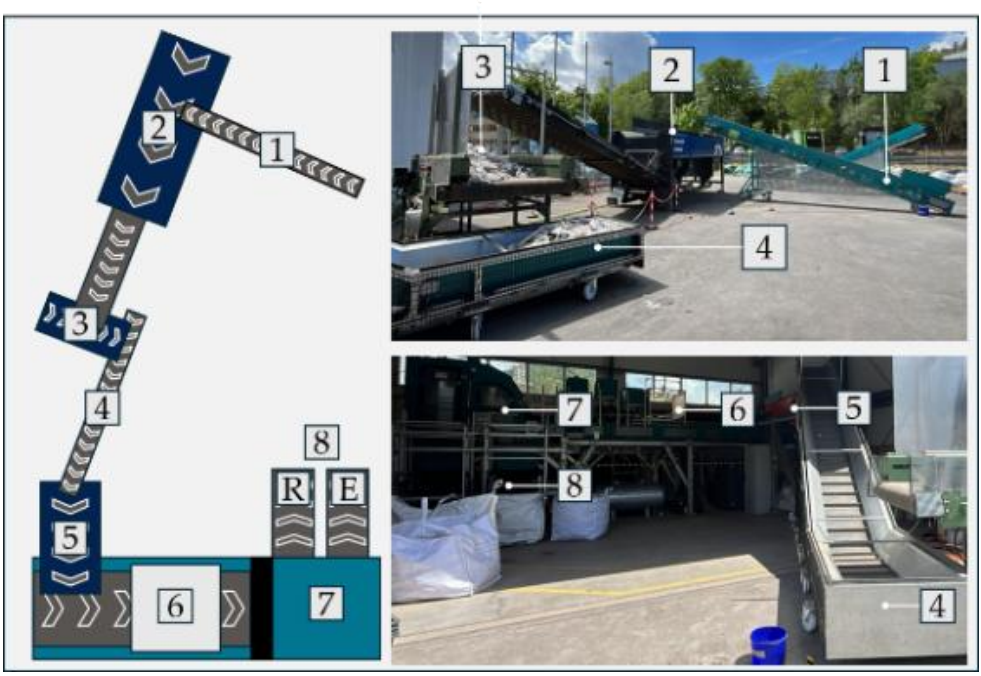


Abb. 1: Digital Waste Research Materialhandling Setup

Um zu untersuchen, wie viele Objekte beziehungsweise wie viele Big Bags mit Partikeln erforderlich sind, um ein gut generalisierendes Modell für den Bereich der Leichtverpackungsabfälle zu trainieren, wurden die Modelle anhand gestaffelter Trainingsdatensätze trainiert. Dabei wurde jeder Trainingsdatensatz schrittweise erweitert und um Bilder aus zusätzlichen Big Bags ergänzt. Während Trainingsdatensatz 1 ausschließlich Trainings- und Validierungsbilder aus Big Bag 1 enthielt, umfasste Trainingsdatensatz 16 somit Trainings- und Validierungsbilder aus allen 16 Big Bags. Unabhängig vom jeweils verwendeten Trainings- und Validierungsdatensatz wurden alle Modelle anhand eines separaten Testdatensatzes bewertet, der 10 % der Bilder aus allen 16 Big Bags umfasste. Dadurch konnte untersucht werden, wie gut die Modelle voraussichtlich generalisieren, obwohl sie teilweise mit einer geringen Anzahl an Bildern trainiert worden waren. Die Modelle wurden anschließend auf das Test Set (10% alles Bigbags) getestet. Hierbei wurden zwei Bewertungsmethoden angewandt. Erstens die konventionelle mean Average Precision bei einer Lokalisationsgenauigkeit von 50%-95% (mAP@50-95). Weiters wurden die Modelle anhand der vorhandenen Precision und Recall Kurven bewertet. Letztens wurde jedes Modell anhand des gegebenen Scenarios bewertet. Gegenstand dieses Scenarios ist ein fiktiver Vertrag, in dem eine Reinheit von 95% vorgeschrieben wird. Bewertet wurden die Modelle nun respektive ihres erreichten Ausbringen. Hintergrundgedanke dieser Methode ist eine zu erwartende Wirtschaftlichkeit der angewandten Modelle bei einer fixierten Reinheit. Dies bedeutet, dass Modelle, welche die Reinheit von 95% ausschließlich durch geringes Ausbringen erreichen schlechter bewertet werden müssen, selbst wenn ihre mAP@50-95 vergleichsweise hoch ausfällt. Hierzu wurde mit den trainierten Modelle sogenannte Threshold Sweeps durchgeführt. Dies bedeutet, dass sämtliche Objekte im Trainingsset mit dem jeweiligen Modell klassifiziert wurden. Anschließend wurde die Vorhersage Konfidenz so lange schrittweise erhöht, bis eine objektbasierte Reinheit von 95% erreicht werden konnte. Dies wurde errechnet, indem eine idealisierte Ausbringungsmethode mit 100% Ausschleusungsgrad angenommen wurde. Dies bedeutet, sobald das Modell ein Objekt als „Foodgrade“ klassifiziert hatte, wurde es als ausgeschossen angenommen. Aus der Anzahl an Foodgrade und Non Foodgrade Materialien wurde anschließend die Reinheit berechnet. Weiters wurde aus der Anzahl aller vorhandenen Foodgrade Objekte und der Anzahl der korrekt ausgeschossenen Foodgrade Partikel das Ausbringen errechnet. Tabelle 1 zeigt die üblichen Formeln für Ausbringen und Reinheit.

Um anschließend zu testen inwiefern die idealisierte Ausschleusung im Speziellen und die Vorhersage der Modellleistung im Allgemeinen auf reale Sortierversuche übertragbar ist, wurden mit einem Modell Sortierversuche auf das zurückgestellte Testset durchgeführt. Hier wurde im DWRL Foodgrade Material ausgeschossen und Massebasiert Ausbringen und Reinheit berechnet und mit den vorhergesagten, objektbasierten, Metriken verglichen.

Tab. 1: Darstellung der verwendeten Formeln für Ausbringen und Reinheit

Metric	Formula	Source	Index
Ausbringen	$R_w = \frac{m_{valuable_in_output}[kg]}{m_{m_{valuable_in_input}}[kg]}$	Feil et al., 2016	(1)
Reinheit	$P_m = \frac{m_{valuables}[kg]}{m_{eject}[kg]}$		(2)

3 RESULTATE

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse des Modellvergleichs. In Abbildung 2(a) ist die Bewertung der Modelle anhand der mAP@50–95 dargestellt. Bereits Modelle, die mit kleinen Trainingsdatensätzen trainiert wurden, erreichen dabei hohe Bewertungswerte. Eine ausschließliche Betrachtung dieser Metrik könnte daher zu dem Schluss führen, dass bereits geringe Mengen an Trainingsdaten für die Entwicklung eines gut generalisierenden Modells ausreichen.

Ein ähnliches Bild ergibt sich aus den in Abbildung 2(b) dargestellten Werten für Precision und Recall, die am Ende des jeweiligen Trainings berichtet wurden. Auch diese Metriken deuten bereits bei geringen Trainingsdatenmengen auf eine hohe Modellleistung hin. Daraus könnte abgeleitet werden, dass der arbeits- und kostenintensivste Teil der Modellentwicklung, nämlich die Aufnahme und Annotation zusätzlicher Trainingsdaten, frühzeitig reduziert werden kann.

Abbildung 2(c) zeigt jedoch, dass das Erreichen der vorgegebenen Reinheit von 95 % mit einem deutlichen Verlust an Ausbringen verbunden ist. Modelle, die mit kleinen Datenmengen trainiert wurden, erreichen selbst unter idealisierten Offlinebedingungen teilweise ein Ausbringen von weniger als 10 %. Erst ab einer Trainingsdatenmenge, die ungefähr dem Inhalt von neun Big Bags entspricht, treten erste Sättigungseffekte auf. Ab diesem Punkt nimmt die Steigung des erreichbaren Ausbringens mit zunehmender Datenmenge deutlich ab. Aus den idealisierten objektbasierten Ergebnissen ist zudem ersichtlich, dass selbst die leistungsfähigsten Modelle ein Ausbringen von nur etwa 60 % erreichen.

In Abbildung 2(c) sind zusätzlich die Ergebnisse der realen Sortierversuche dargestellt. Dabei werden die Abweichungen zwischen der prognostizierten Reinheit beziehungsweise dem prognostizierten Ausbringen und den experimentell bestimmten Werten sichtbar. Diese Abweichungen lassen sich einerseits dadurch erklären, dass die Offlinebewertung von einer fehlerfreien Ausschleusung aller korrekt detektierten Partikel ausgeht. Im realen Anlagenbetrieb treten hingegen zusätzliche Austragsfehler auf, beispielsweise infolge von Partikelbewegungen, Überlagerungen, unvollständiger Ausschleusung oder Abweichungen bei der zeitlichen Ansteuerung der Düsen. Andererseits wird eine objektbasierte Auswertung zur Vorhersage einer massenbasierten Sortierbewertung herangezogen. Unterschiede in der Masse einzelner Partikel werden bei einer rein objektbasierten Bewertung nicht berücksichtigt.

Die idealisierte Offlinebewertung überschätzt daher im Mittel die tatsächlich erreichbare Sortierleistung. Für die Reinheit ergibt sich eine mittlere absolute Abweichung von 4,1 Prozentpunkten, während die mittlere absolute Abweichung des Ausbringens 9,2 Prozentpunkte beträgt. Trotz dieser Abweichungen bildet die objektbasierte Bewertung den grundsätzlichen Verlauf der realen Sortierergebnisse ab und ermöglicht somit eine näherungsweise Abschätzung des späteren Anlagenverhaltens.

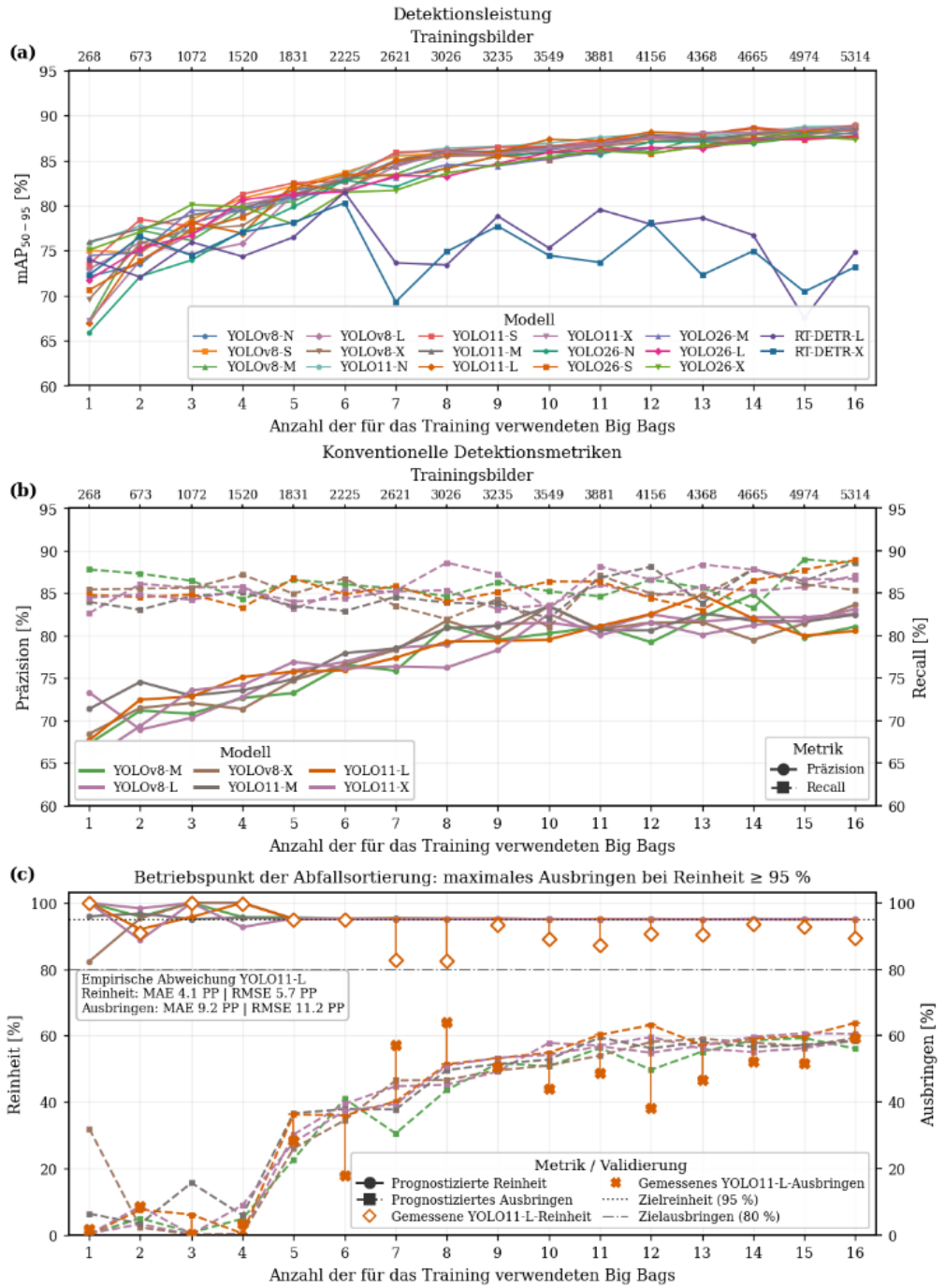


Abb. 2: Vergleich der Modellbewertungen gemäß mAP@50-95, Recall&Precision sowie nach Ausbringen@Reinheit in Offlineversuchen sowie in Realversuchen.

4 DISKUSSION

Die vorgestellte Bewertungsmethode für Objektdetektionsmodelle kann zu einer klareren Kommunikation zwischen Anlagenbetreibern und IT-Fachkräften beitragen. Während mAP, Precision und Recall die allgemeine Detektionsleistung beschreiben, übersetzt die Bewertung des maximal erreichbaren Ausbringens bei vorgegebener Reinheit die Modellleistung in eine für den Sortierprozess unmittelbar interpretierbare Kenngröße.

Darüber hinaus kann die Methode für eine vorläufige Wirtschaftlichkeitsbewertung von Sortieraufgaben herangezogen werden. Weist das prognostizierte Ausbringen bei der geforderten Reinheit darauf hin, dass die laufenden Kosten des Sortierprozesses durch die erzielbare Wertstoffausbeute nicht gedeckt werden können, kann bereits vor der Inbetriebnahme gegengesteuert werden. Mögliche Maßnahmen umfassen die Anpassung der Prozessanforderungen, eine Nachverhandlung der geforderten Reinheit, die Erweiterung des Trainingsdatensatzes oder eine Neuausrichtung des Modelltrainings.

5 DANKSAGUNG

This work was created as part of the research project “greenPLAST-food”. The project “greenPLAST-food - Green Plastic Recycling Factory for Food Contact Materials” (project number 5135363) are funded by the Austrian Research Promotion Agency (FFG) and the Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation, and Technology.

LITERATURVERZEICHNIS

Arijeniwa, Victoria Foluke; Akinsemolu, Adenike A.; Chukwugozie, Deborah C.; Onawo, Ulakom Genesis; Ochulor, Chidinma Ezinne; Nwauzoma, Uju M. et al.: Closing the loop: A framework for tackling single-use plastic waste in the food and beverage industry through circular economy- a

Bichler, Lorenz P.; Pinter, Elisabeth; Jones, Mitchell P.; Koch, Thomas; Krempl, Nina; Archodoulaki, Vasiliki-Maria: Impacts of washing and deodorization treatment on packaging-sourced post-consumer polypropylene. In: J Mater Cycles Waste Manag 26 (6) ,2024, S. 3824–3837. DOI: 10.1007/s10163-024-02085-4., n.d.

European Commission: Regulation No 1935/2004 of the European Parliament and the Council on materials and articles intended to come into contact with food and repealing Directives 80/590/EEC and 89/109/EEC. In: Official Journal of the European Union ,2004

European Commission: Commission Regulation (EU) No 10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. In: Official Journal of the European Union ,2011

European Commission: Commission Regulation (EU) 2022/1616 on recycled plastic materials and articles intended to come into contact with foods, and repealing Regulation (EC) No 282/2008. In: Official Journal of the European Union ,2022

Untersuchung von mechanischem Recycling als EoL-Strategie für duromerbasierte Faserverbundwerkstoffe

Romy Schwarz[1] & Jörg Fischer[1,2]
[1)] Johannes Kepler Universität, Institut für Polymeric Materials and Testing, Linz, Österreich
[2)] Johannes Kepler Universität, LIT Factory, Linz, Österreich

KURZFASSUNG: Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Potenzial einer kostengünstigen mechanischen Recyclingstrategie für duromerbasierte Faserverbundwerkstoffe untersucht. Hierfür wurden glasfaserverstärkte Phenolharz- und kohlenstofffaserverstärkte Epoxidharz-Abfälle mechanisch zerkleinert und als Füllstoffe in thermoplastische Matrixsysteme eingearbeitet. Die Untersuchungen zeigten, dass die Rezyklate ein für Füllstoffsysteme typisches Eigenschaftsprofil erzeugen. Durch die Zugabe der Rezyklate wurde die Steifigkeit erhöht, während Schlagzähigkeit und Bruchdehnung abnahmen. Trotz des bewusst einfachen Recyclingansatzes ohne zusätzliche Additive oder Aufbereitungsschritte erreichten mehrere Compounds Eigenschaftsniveaus vergleichbar mit konventionell gefüllten Thermoplasten. Die Ergebnisse zeigen, dass mechanisches Recycling grundsätzlich eine vielversprechende Verwertungsstrategie für anderwärtig aufwändig recycelbare Composite-Abfälle darstellt und eine Basis für weiterführende Optimierungsmaßnahmen bietet.

1 EINLEITUNG

Faserverbundwerkstoffe gewinnen aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit und Steifigkeit zunehmend an Bedeutung. Insbesondere in der Luftfahrt-, Automobil- und Bauindustrie werden faserverstärkte Kunststoffe eingesetzt, um leichte und gleichzeitig leistungsfähige Bauteile zu realisieren (Witten & Mathes, 2026). Mit der steigenden Verwendung dieser Werkstoffe wächst jedoch auch die Menge an Abfällen, die am Ende ihres Lebenszyklus anfallen (Arussi, Reiland, Ierides, & Borghero, 2022).
Während thermoplastische Kunststoffe durch Aufschmelzen vergleichsweise einfach recycelt werden können, stellen duromerbasierte Verbundwerkstoffe eine besondere Herausforderung dar. Aufgrund ihrer vernetzten Struktur können sie nicht erneut aufgeschmolzen werden, wodurch etablierte Recyclingverfahren nur eingeschränkt anwendbar sind. Aus diesem Grund werden viele dieser Abfallströme derzeit thermisch verwertet oder deponiert (Pickering, 2006; Overcash, Twomey, Asmatulu, Vozzola, & Griffing, 2018).
Mechanische Recyclingverfahren stellen einen vielversprechenden Ansatz dar, um solche Verbundwerkstoffe einer weiteren Nutzung zuzuführen. Durch Zerkleinerung können die Materialien als Füllstoffe in thermoplastischen Matrixsystemen eingesetzt werden. Dadurch wird zwar die ursprüngliche Verstärkungswirkung der Fasern nicht vollständig erhalten, dennoch können die entstehenden Rezyklate zur Herstellung neuer Compounds genutzt werden und einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leisten (Bream & Hornsby, 2001).
Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Eignung mechanisch recycelter duromerbasierter Faserverbundwerkstoffe als Füllstoffe für thermoplastische Compounds. Zur Bewertung des grundsätzlichen Potenzials dieser Recyclingstrategie wurde bewusst ein minimaler Aufbereitungsaufwand gewählt. Die Composite-Abfälle wurden nach der Zerkleinerung ohne weitere Wasch- oder Sortierprozesse sowie ohne den Einsatz von Haftvermittlern oder anderen Additiven verarbeitet. Die resultierenden Compounds stellen somit einen kostengünstigen, minimalistischen Ansatz dar und dienen als Grundlage zur Abschätzung der technischen Umsetzbarkeit und des Optimierungspotenzials mechanischer Recyclingstrategien.

2 MATERIALIEN UND METHODEN

Für die Untersuchungen wurden zwei industrielle Abfallströme aus faserverstärkten Kunststoffen verwendet. Dabei handelte es sich um glasfaserverstärkte Phenolharz-Verbunde (GF Phenol) sowie kohlenstofffaserverstärkte Epoxidharz-Verbunde (CF Epoxy). Das GF-Phenol-Material wurde mittels einer Retsch SM 300 Schneidmühle (Haan, Deutschland) zerkleinert, während für das CF-Epoxy-Material ein Wittmann S-Max 2 Plus Granulator (Nürnberg, Deutschland) eingesetzt wurde. Die Partikelgrößenverteilung der Rezyklate wurde mit einem Retsch AS 200 control Siebturm (Haan, Deutschland) bestimmt.
Als thermoplastische Matrixwerkstoffe wurden Polypropylen (PP) Typ HE125MO und Polyethylen (PE) Typ Borstar MB7541 der Borealis AG (Wien, Österreich) sowie Polycarbonat (PC) Typ Makrolon 2205 der Covestro AG (Leverkusen, Deutschland) verwendet. Die aufbereiteten Composite-Rezyklate wurden anschließend mittels eines co-rotierenden Doppelschneckenextruders Leistritz ZSE 18 Maxx (Nürnberg, Deutschland) in die jeweiligen Thermoplaste eingearbeitet. Die Füllstoffgehalte wurden so gewählt, dass ein möglichst hoher Rezyklatanteil bei gleichzeitig stabiler Verarbeitbarkeit erreicht wurde. Daraus ergaben sich maximale Füllstoffgehalte von 30 Gew.-% für GF Phenol bzw. 20 Gew.-% für CF Epoxy, da höhere Anteile zu einer starken Erhöhung der Schmelzeviskosität führten.
Nach der Compoundierung wurden die Materialien granuliert und mittels einer Spritzgießmaschine Engel Victory 80 (Schwertberg, Österreich) zu genormten Prüfkörpern verarbeitet. Zur Charakterisierung der Werkstoffe wurden thermogravimetrische Untersuchungen mit einem Perkin Elmer EGA 4000 (Waltham, USA) zur Bestimmung des Fasergehalts durchgeführt. Die mechanischen Eigenschaften wurden mittels Charpy-Schlagversuchen nach DIN EN ISO 179 an einem Zwick/Roell HIT25P sowie Zugversuchen nach DIN EN ISO 527 an einer Zwick/Roell Z020 Universalprüfmaschine (Ulm, Deutschland) bei Standardbedingungen untersucht.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Beide Composite-Abfallströme konnten erfolgreich zu verarbeitbaren Füllstoffen aufbereitet werden. Dabei zeigten sich Unterschiede hinsichtlich Partikelmorphologie und Größenverteilung. Das CF Epoxy bestand überwiegend aus größeren Faserbündeln mit anhaftender Matrix, während beim GF Phenol mehr als 60 % der Partikel kleiner als 1 mm waren. Diese Feinfraktion setzte sich hauptsächlich aus Matrixstaub sowie aus einzelnen Fasern mit und ohne anhaftender Matrix zusammen. Aufgrund ihrer hohen Aspect Ratio konnten teilweise deutlich längere Fasern kleinere Siebe passieren. Die beobachteten Unterschiede können sowohl auf die unterschiedlichen Materialsysteme als auch auf die eingesetzten Zerkleinerungsverfahren zurückzuführt werden.
Die Einarbeitung der Rezyklate führte bei allen untersuchten Thermoplasten zu Veränderungen des Fließverhaltens. Mit zunehmendem Füllstoffanteil stieg die Viskosität der Schmelze an, wodurch die Verarbeitbarkeit insbesondere bei höheren Füllstoffgehalten eingeschränkt wurde.
Mithilfe der thermogravimetrischen Analyse wurde der Fasergehalt ermittelt. Bei 70 Gew.-% Thermoplastmatrix in den GF Phenol-Compounds entsprach dies etwa 18 Gew.-% Glasfasern und 12 Gew.-% verbleibende duromere Matrix im Endmaterial. Für die CF-Epoxy-Compounds ergab sich bei einem Füllstoffanteil von 20 Gew.-% eine Zusammensetzung von etwa 80 Gew.-% Thermoplastmatrix, 13 Gew.-% Carbonfasern und 7 Gew.-% Epoxidharzmatrix.
Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Rezyklate nicht ausschließlich als Faserverstärkung wirken, sondern als komplexe Füllstoffsysteme aus Fasern und verbliebenen Duromermatrixanteilen vorliegen. Dadurch werden die Eigenschaften der Compounds sowohl durch die Fasern als auch durch die eingebrachten Duromerpartikel beeinflusst.
Die mechanischen Untersuchungen zeigten ein für Füllstoffsysteme typisches Eigenschaftsprofil. Dieses ist in Abb. 1 den Eigenschaften von unverstärkten Virginmaterialien (Borealis AG, 2023; Borealis AG, 2024; Covestro AG, 2023) gegenübergestellt. Durch die Zugabe der Composite-Rezyklate wurde die Kerbschlagzähigkeit von PE und PC deutlich reduziert, während die bereits geringe Kerbschlagzähigkeit des ungefüllten PP weitgehend erhalten blieb. Die Abnahme der

Kerbschlagzähigkeit kann auf die eingebrachten Füllstoffpartikel zurückgeführt werden, die als Spannungskonzentratoren wirken und die Rissinitiierung begünstigen können. Die geringfügig höheren Kerbschlagzähigkeiten der CF-Epoxy-Compounds könnten einerseits auf den geringeren Füllstoffgehalt zurückzuführen sein, andererseits auf eine verbesserte Wechselwirkung zwischen Rezyklat und Thermoplastmatrix hindeuten.
Gleichzeitig führte die Zugabe der Rezyklate bei allen untersuchten Materialien zu einer deutlichen Erhöhung der Steifigkeit. Besonders hervorzuheben ist, dass die CF-Epoxy-Compounds trotz ihres geringeren Füllstoffgehalts höhere Steifigkeiten erreichten als die GF-Phenol-Compounds. Dies könnte sowohl auf das höhere Verstärkungspotenzial der Carbonfasern als auch auf eine effizientere Lastübertragung an der Grenzfläche zwischen Rezyklat und Matrix zurückzuführen sein.
Die Steifigkeitserhöhung ging erwartungsgemäß mit einer Verringerung der Bruchdehnung einher, wodurch die Werkstoffe insgesamt ein spröderes Verhalten aufwiesen. Die Zugfestigkeit wurde hingegen nur in begrenztem Ausmaß beeinflusst. Während bei den PE- und PP-Compounds nahezu unveränderte Festigkeitswerte gemessen wurden, zeigte sich bei den PC-basierten Systemen ein abweichendes Verhalten: Die Zugfestigkeit nahm bei Verwendung von GF Phenol ab, während für CF Epoxy eine leichte Steigerung beobachtet wurde. Dies könnte ebenfalls auf Unterschiede in der Füllstoff-Matrix-Wechselwirkung sowie auf die unterschiedliche Materialeigenschaften und -zusammensetzungen der beiden Rezyklate zurückzuführen sein.

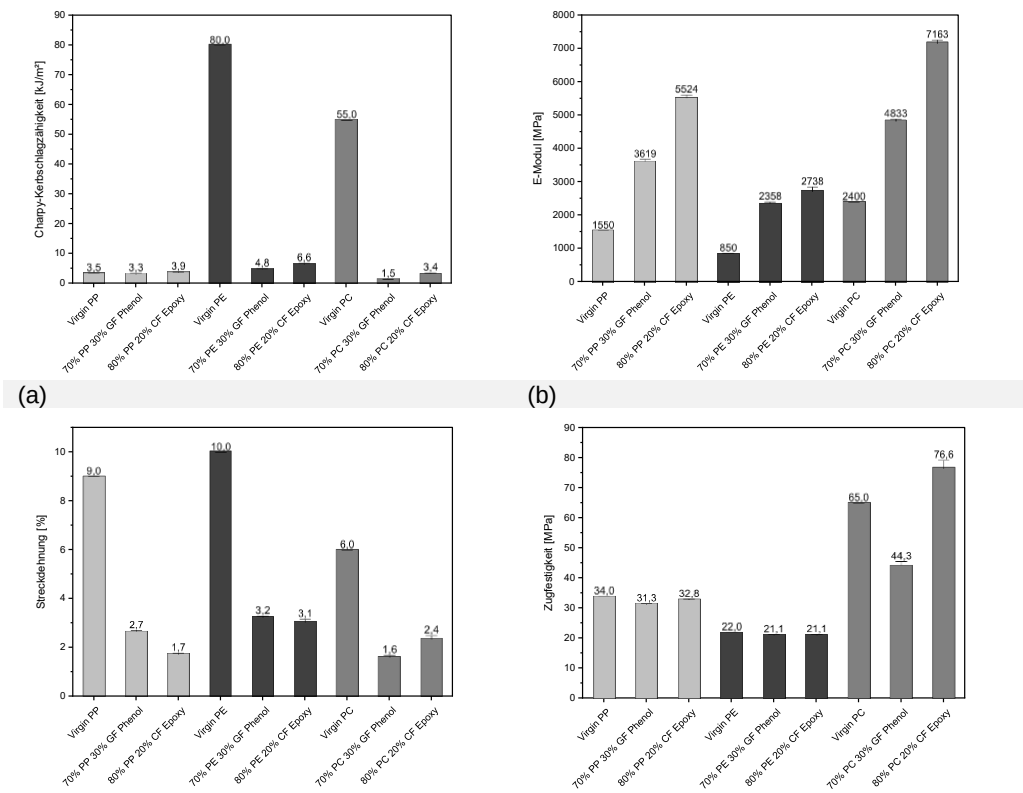


Abb. 1: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von unverstärkten Thermoplasten mit GF-Phenol- und CF-Epoxy-verstärkten Thermoplasten: (a) Charpy-Kerbschlagzähigkeit, (b) E-Modul, (c) Streckdehnung, (d) Zugfestigkeit.

Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass die Rezyklate primär als versteifende Füllstoffe wirken, ohne jedoch eine effiziente Lastübertragung zwischen Matrix und Fasern zu ermöglichen.
Ursächlich hierfür ist vermutlich die begrenzte Haftung zwischen thermoplastischer Matrix und den duromerbasierten Composite-Partikeln. Trotz des bewussten Verzichts auf Haftvermittler und andere Additive erreichten mehrere der untersuchten Compounds Eigenschaftsniveaus, die mit jenen von Thermoplasten vergleichbar sind, die mit ähnlichen Gewichtsanteilen an mineralischen Füllstoffen wie Talkum oder Calciumcarbonat gefüllt wurden (SONGHAN Plastic Technology Co., Ltd., n.d.; LyondellBasell, 2025). Dies deutet darauf hin, dass mechanisch recycelte Composite-Abfälle das Potenzial besitzen, bislang schwer verwertbare Abfallströme einer höherwertigen Nutzung zuzuführen.

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse zeigen, dass duromerbasierte Faserverbundwerkstoffe durch mechanische Aufbereitung erfolgreich als Füllstoffe in thermoplastischen Compounds eingesetzt werden können. Die erzeugten Werkstoffe weisen typische Eigenschaften gefüllter Systeme auf und eignen sich insbesondere für Anwendungen mit moderaten mechanischen Anforderungen.
Das mechanische Recycling zeichnet sich durch eine einfache Prozessführung und einen vergleichsweisen geringen Energiebedarf aus und bietet damit Potenzial für eine industrielle Umsetzung. Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen, dass diese Recyclingroute einen ressourcenschonenden Ansatz zur Verwertung bislang schwer recycelbarer Composite-Abfälle darstellt.
Zukünftige Arbeiten konzentrieren sich auf die Optimierung der Grenzflächenhaftung und die Entwicklung anwendungsorientierter Compoundformulierungen. Darüber hinaus werden weitere Abfallströme, insbesondere elastomerbasierte Verbundsysteme aus Altreifenmaterialien, untersucht.

LITERATURVERZEICHNIS

Arussi, E., Reiland, J., Ierides, M., & Borghero, L. (2022). *Composite Materials: A Hidden Opportunity for the Circular Economy.* Brüssel, Belgien: CSR Europe.

Bernardeau, F., Perrin, D., Caro-Bretelle, A.-S., Bénézet, J.-C., & Ienny, P. (2018). Development of a recycling solution for waste thermoset material: waste source study, comminution scheme and filler characterization. *Journal of Material Cycles and Waste Management, 20*(2), 1320-1336.

Borealis AG. (2023). Polypropylene HE125MO. Wien, Österreich.

Borealis AG. (2024). Polyethylene BorPure MB7541. Wien, Österreich.

Bream, C., & Hornsby, P. (2001). Comminuted thermoset recyclate as a reinforcing filler for thermoplastics Part II. *Journal of Materials Science, 36*, 2977-2990.

Covestro AG. (2023). Makrolon 2205. Leverkusen, Deutschland.

LyondellBasell. (2025). Hostacom M2 T02 102942. Rotterdam, Niederlande.

Overcash, M., Twomey, J., Asmatulu, E., Vozzola, E., & Griffing, E. (2018). Thermoset composite recycling - Driving forces, development, and evolution of new opportunities. *Journal of Composite Materials, 52*, 1033-1043.

Pickering, S. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials - current status. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37*(8), 1206-1215.

SONGHAN Plastic Technology Co., Ltd. (n.d.). Overview of materials for Polypropylene with 30% Calcium Carbonate (CaCO3) Filler. Shanghai, China.

Witten, E., & Mathes, V. (2026). *The European Market for Fibre-reinforced Plastics / Composites 2025.* Frankfurt am Main, Deutschland: AVK - Industrial Association for Reinforced Plastics.

Evaluierung der Getrenntsammlung auf Friedhöfen und Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen

Sarah Maier[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Ziel dieses Beitrags war es, erste Daten zur Menge, Sammlung und Zusammensetzung von Friedhofsabfällen zu erheben und Verbesserungsmaßnahmen für eine effizientere Getrenntsammlung zu erarbeiten. Hierfür wurden jeweils zwei Sortieranalysen auf drei Friedhöfen im Bezirk Leibnitz (Österreich) durchgeführt (Großklein, Wildon und Leibnitz), die verschiedene siedlungsstrukturelle Regionen repräsentieren und sich in ihrem Angebot an Sammelfraktionen vor Ort unterschieden. Der untersuchte Abfall wurde händisch in zuvor definierte Kategorien unterteilt. Nach der ersten Sortierung wurden Verbesserungsmaßnahmen in Form von Aufklebern und Tafeln vorgenommen, die Informationen zur korrekten Getrenntsammlung enthielten. Danach wurde eine zweite Sortieranalyse durchgeführt, um die Wirksamkeit dieser Maßnahmen zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem bei den Sammelfraktionen Restmüll und Biomüll ein Verbesserungspotenzial besteht. Während beider Sortierungen wurden auf allen Friedhöfen Elektroaltgeräte und Problemstoffe im Restmüll gefunden. Zusätzlich befanden sich auf den Friedhöfen Leibnitz und Großklein Batterien im Restmüll. Durch die gewonnenen Daten wird die Notwendigkeit von gezielten Maßnahmen zur Verbesserung der Getrenntsammlung auf Friedhöfen ersichtlich.

1 EINLEITUNG

Aufgrund der steigenden Anforderungen an Ressourcenschonung und Recycling ist eine Verbesserung der Getrenntsammlung von Abfällen essentiell, um diese einer geeigneten Verwertung zuzuführen. Das betrifft auch Abfälle, die auf Friedhöfen anfallen. Der Großteil von Friedhofsabfällen besteht aus biogenem Material. 2019 fielen bundesweit 62.870 t biogene Friedhofsabfälle an (BMK, 2023). Andere Abfallfraktionen werden bislang nicht getrennt von dem restlichem kommunalen Siedlungsabfall angegeben. Friedhöfe bzw. deren Verwaltungen sind dazu verpflichtet, Sammelfraktionen für die einzelnen anfallenden Abfallströme zur Verfügung zu stellen, um eine hochwertige Verwertung zu ermöglichen (AWG 2002). Das Angebot an Sammelfraktionen kann jedoch von Friedhof zu Friedhof stark variieren. Oftmals ist die korrekte Trennung der Abfälle nicht möglich, wodurch es vermehrt zu Fehlwürfen kommen kann. Durch den steigenden Einsatz von batteriebetriebenen sowie wiederaufladbaren Grablichtern stellen Friedhöfe eine mögliche Quelle von Elektroaltgeräten und Gerätebatterien im Restmüll dar, was zu sicherheitsrelevanten und ökologischen Problemen führen kann.

2 METHODIK

2.1 Auswahl und Beschreibung der Friedhöfe

Im Rahmen des Beitrags wurden drei von 30 Friedhöfen im Bezirk Leibnitz untersucht. Es wurde je ein Friedhof aus einer ländlichen, einer intermediären und einer städtischen Region für die Analyse ausgewählt, um durch einen Vergleich mögliche siedlungsstrukturelle bzw. demografische Unterschiede zu erfassen. Ein Hauptkriterium bei der Auswahl der Friedhöfe war, dass die Sammelbehälter vor Ort kein größeres Fassungsvolumen als 240 l haben, um die händische Sortierung zu erleichtern. Der Friedhof Großklein repräsentiert einen Friedhof in einer ländlichen Region. Insgesamt befinden sich acht Restmüll-, zwei Altpapier- und drei Gitterbox-Behälter für Altmetalle sowie zwei Ablagerungsflächen für biogene Friedhofsabfälle auf dem Friedhofs-

gelände. Für einen Friedhof in einer intermediären Region wurde der Friedhof Wildon gewählt. Auf dem Friedhofsgelände befinden sich drei Sammelstellen. Insgesamt gibt es 15 Restmüll-, drei Altmetall- und vier Altpapierbehälter, drei Boxen für Batterien und drei Behälter für Altglas. Außerdem gibt es zwei Behälter sowie eine Ablagerungsfläche für biogene Friedhofsabfälle. Als Repräsentant einer städtischen Region wurde der Friedhof Leibnitz gewählt. Insgesamt gibt es vor Ort 23 Restmüll- und 31 Biomüllbehälter.

2.2 Sortierkategorien

Die Auswahl der Sortierkategorien und die Zuordnung der Abfälle erfolgten in enger Anlehnung an den Sortierkatalog und die Zuordnungsliste des Leitfadens für die Durchführung von Restmüll-Sortieranalysen (BMK, 2021) und dem Informationsblatt zur Abfalltrennung am Friedhof (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2025). Daraus ergaben sich folgende Sortierkategorien:

- Altpapier (AP),
- Restmüll (RM),
- Leicht- und Metallverpackungen (LMV),
- Glasverpackungen (GV),
- Altmetalle (AM),
- Biomüll (BM),
- Elektroaltgeräte (EAG),
- Batterien und Akkus (B/A),
- Problemstoffe (P),
- und Sonstiges (S).

Die Kategorie „Sonstiges“ bezeichnet überwiegend Friedhofsgestecke, die aus biogenen und nicht abbaubaren Materialien bestehen, die nicht voneinander trennbar sind.

2.3 Vorgehensweise und Durchführung der Sortieranalysen

Insgesamt wurden an den ausgewählten Friedhöfen zwei Sortieranalysen durchgeführt. Die Probennahmen wurden an allen Friedhöfen und Tagen gleich durchgeführt. Dafür wurden zuerst alle Behälter auf dem Friedhofsgelände visuell begutachtet und die Behälter mit dem meisten Inhalt jeder Sammelfraktion pro Sammelstelle ausgewählt. Anschließend wurden diese entweder vor Ort oder an einem anderen Sortierstandort (Ressourcenpark Leibnitz bzw. St. Johann im Saggautal) untersucht. Ein Sammelbehälter wurde als eine Einzelprobe gewertet. Dabei wurden so viele Sammelbehälter wie zeitlich möglich untersucht. Für die Sortierung wurde zuerst eine Kunststoffplane ausgebreitet und verschiedene Behältnisse für die einzelnen Fraktionen bereitgestellt. Die Sortierung der Abfälle erfolgte per Hand. Die Behältnisse wurden vor und nach der Sortierung gewogen und das Gewicht wurde notiert.

Nach der ersten Sortieranalyse wurden vom AWV Leibnitz Tafeln und Aufkleber mit Trennhinweisen für die Sammelfraktionen Restmüll, Biomüll, Leicht- und Metallverpackungen, Altpapier und Altmetalle angebracht, um die Trennung zu verbessern. Die zweite Sortieranalyse wurde einen Monat nach Anbringung der Verbesserungsmaßnahmen durchgeführt. Die methodische Durchführung erfolgte analog.

3 ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ergebnisse der Sortieranalysen sind in Massenprozent angegeben und zeigen die Zusammensetzung der untersuchten Sammelfraktionen der ausgewählten Friedhöfe. Besonders die Sammelfraktionen Restmüll und Biomüll zeigen das größte Verbesserungspotenzial.

In Abbildung 1 werden die Zusammensetzungen des Restmülls der drei untersuchten Friedhöfe gegenübergestellt. Der linke Balken (einfärbig) beschreibt das Ergebnis der ersten Sortieranalyse, der rechte Balken (diagonal strichliert) beschreibt das Ergebnis der zweiten Sortieranalyse. Auf allen untersuchten Friedhöfen konnten Problemstoffe in Form von Flüssigwachsgrablichtern und Feuerzeugen mit Restinhalt gefunden werden. In den Restmüllsammelbehältern der Friedhöfe Leibnitz und Großklein befanden sich außerdem noch batteriebetriebene Grablichter und Batterien. Im Gegensatz dazu, konnten im Restmüll des Friedhofs Wildon keine Batterien, jedoch ein batteriebetriebenes Grablicht bei der zweiten Sortierung gefunden werden. Ein Grund dafür könnten die eigenen Sammelbehälter für Batterien sein.

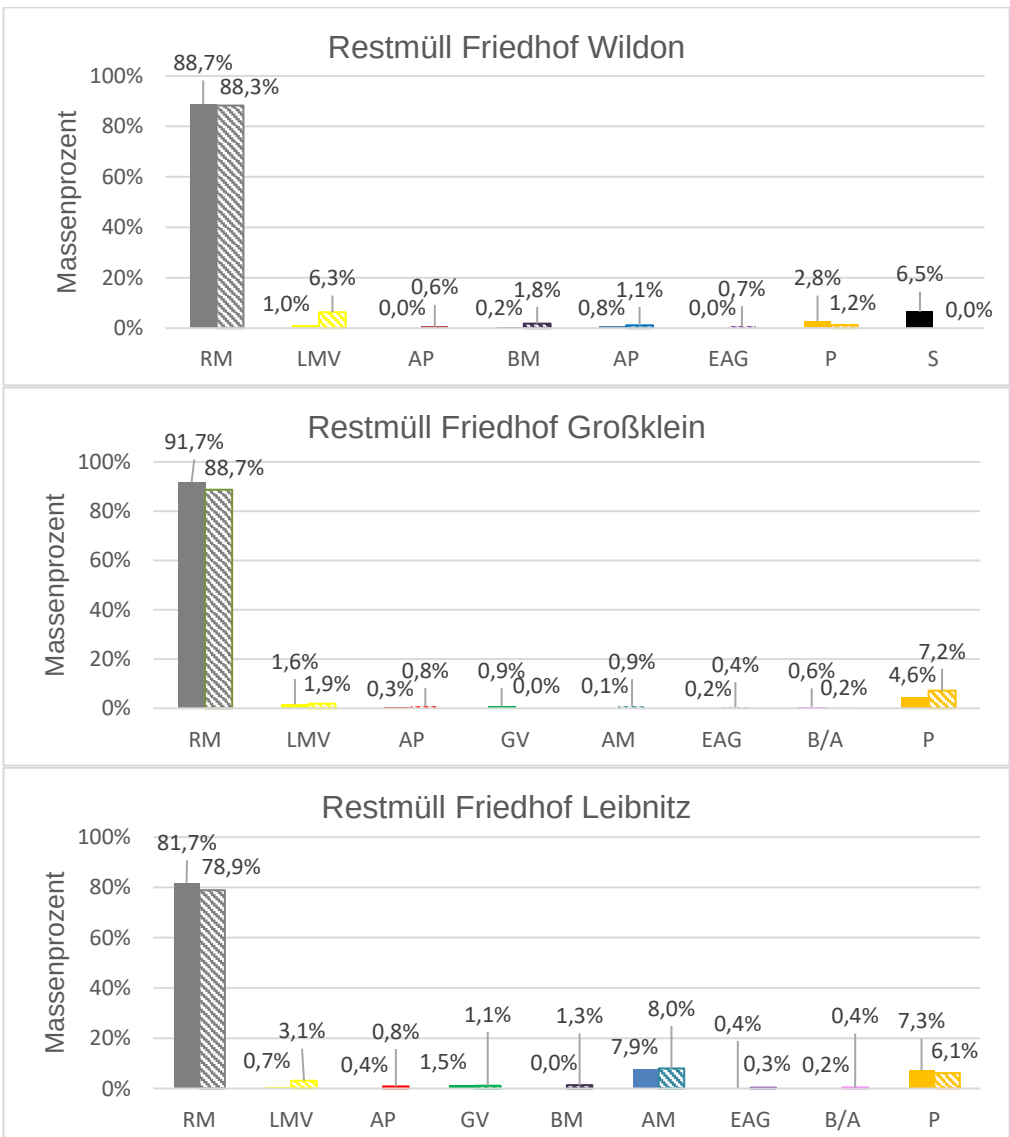


Abb. 1: Darstellungen der Zusammensetzung des Restmülls des Friedhofs in Großklein, Wildon und Leibnitz

Die anderen untersuchten Sammelfraktionen (Altmetalle und Altpapier) hatten im Vergleich keinen problematischen Fehlwurfanteil. Aufgrund der Tatsache, dass die Altglasfraktion auf dem Friedhof Wildon von der Friedhofsverwaltung zu einem Altglas-Sammelcontainer gebracht wird, wurden nur Glasverpackungen zu der Glasverpackungsfraktion gezählt. Grablichter aus Glas zählen zum Restmüll, weshalb der Restmüll den höchsten Anteil ausmachte. Da keine Trennhinweise für Altglas angebracht wurden, wurde hierfür auf eine zweite Sortieranalyse verzichtet. Der untersuchte Biomüll wies bei der ersten Sortierung einen Anteil an der Fraktion „Sonstiges“ von ca. 40% auf, bei der zweiten Sortierung waren es weniger als 20%. Ein Grund dafür könnte sein, dass bei der zweiten Sortieranalyse wesentlich mehr Grünschnitt und Pflanzenabfälle anfielen.

In den Ergebnissen der Sortieranalysen ließ sich nach dem Anbringen der Tafeln und Aufkleber keine eindeutige Verbesserung der Abfalltrennung feststellen, was jedoch an den kurzen Zeitabständen zwischen den vorgenommenen Verbesserungsmaßnahmen und den zweiten Sortieranalysen liegen könnte. Ebenfalls ließen sich keine Unterschiede in der Getrenntsammlung oder Zusammensetzung des Abfalls aufgrund der verschiedenen siedlungsstrukturellen Regionen nachweisen. Während der zweiten Sortieranalyse fielen im Vergleich zur ersten Sortieranalyse saisonale Unterschiede im Abfallaufkommen auf, was sich insbesondere bei der Zusammensetzung des Biomülls bemerkbar machte und eine Bewertung der Trennung erschwerte. Anhand der Ergebnisse des Friedhofs in Wildon wird ersichtlich, dass ein breiteres Angebot an Sammelfraktionen den Fehlwurfanteil in den einzelnen Sammelbehältern verringern kann. Dieser Beitrag zeigt somit, dass Friedhofsabfälle keine Ausnahme zu der steigenden Fehlwurfrate an Batterien im Restmüll bilden, jedoch ihr Anteil durch gezielte Maßnahmensetzung (zusätzliche Sammelfraktionen) verringert werden kann.

LITERATURVERZEICHNIS

Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14 – Wasserwirtschaft, Ressourcen und Nachhaltigkeit, Referat für Abfall- und Ressourcenwirtschaft, 2025. Abfalltrennung am Friedhof, Graz.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021. Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranalysen, Wien.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023. Bundesabfallwirtschaftsplan, Teil 1.

Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, 2002. Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft: Abfallwirtschaftsgesetz 2002. – AWG 2002.

Performance Optimierung von PP Rezyklaten durch abgestimmte Sortiertiefe und Modifikation

Martin Berschl[1], Moritz Mager[1] & Jörg Fischer[1]
[1)] Johannes Kepler Universität Linz, Institute of Polymeric Materials and Testing & LIT Factory, Linz, Österreich

KURZFASSUNG: Die Erfüllung der spezifischen materialtechnischen Anforderungen an hochwertige Verpackungsanwendungen stellt für post-consumer Polypropylen (PP) Rezyklate aufgrund der starken Heterogenität der Abfallströme eine zentrale Herausforderung dar. Um das Eigenschaftsprofil von recyceltem PP (rPP) signifikant zu verbessern und die Lücke zu Virgin PP (vPP) zu schließen, untersuchte diese Arbeit das Zusammenwirken einer abgestimmten Sortiertiefe und einer gezielten Modifikation durch Compounding. Dabei wurden ein konventionelles hellfarbiges PP-Rezyklat ohne zusätzliche Sortierung (rPP-base) und ein durch zusätzliche Sortierschritte gewonnenes, weißes PP-Rezyklat (rPP-sort) hinsichtlich der Eigenschaften eines Virgin-Benchmarks (vPP-B) modifiziert. Die erweiterte Sortierung steigerte den Anteil der starren weißen Zielfraktion auf 97,1 Gew.-% und eliminierte PE-Kontaminationen nahezu vollständig, wodurch rPP-sort bereits unmodifiziert einen höheren Zugmodul (1520 MPa) und bessere Fließfähigkeit als rPP-base erreichte. Mittels Schlagzähmodifikatoren ließen sich die rPP-sort-Compounds selbst bei bis zu 60 Gew.-% Rezyklatanteil auf Benchmark-Niveau (7,4 kJ/m², 1360 MPa) einstellen, während rPP-base die Ziele für Steifigkeit und Verarbeitbarkeit nicht simultan erfüllen konnte. Hochwertige post-consumer PP-Rezyklate erfordern somit eine abgestimmte Balance aus Sortiertiefe und Modifikation, wobei die Sortierung als technologischer Türöffner fungiert.

1 EINLEITUNG

Der stetig steigende globale Kunststoffbedarf und das damit verbundene Abfallaufkommen erfordern zwingend neue Lösungsansätze, insbesondere im Verpackungssektor, der den größten Anteil des weltweiten Kunststoffverbrauchs ausmacht. Um den Einsatz von Sekundärkunststoffen verbindlich zu forcieren, hat die Europäische Union die Verordnung über Verpackungen und Verpackungsabfälle (Packaging and Packaging Waste Regulation, PPWR) eingeführt. Diese Verordnung definiert ambitionierte Zielvorgaben für die Industrie und schreibt beispielsweise für nicht kontaktintensive Verpackungen einen Mindestrezyklatanteil von 35 % bis 2030 vor, welcher bis 2040 auf 65 % ansteigen soll (European Parliament and the Council 2025).
Polypropylen (PP) repräsentiert in diesem Kontext die größte Einzelpolymerfraktion, was maßgeblich durch starre und flexible Verpackungsanwendungen getrieben wird (Plastics Europe 2025, Plastics Recyclers Europe 2023). Um die PPWR-Ziele zu erreichen und die Lücke zwischen Abfallerzeugung und Materialwiedereingliederung zu schließen, stützt sich die Industrie primär auf das mechanische Recycling (Ragaert et al. 2017). Die Qualität der hierbei gewonnenen Rezyklate wird jedoch maßgeblich durch die Zusammensetzung und Reinheit des Inputmaterials limitiert (Mager et al. 2026). Da konventionelles rezykliertes PP (rPP) eine undefinierte Mischung aus verschiedenen Anwendungen, PP-Subtypen (Homopolymere, Random- und Block-Copolymere), Additiven und Fremdpolymeren darstellt, weist es im Vergleich zu Virgin PP (vPP) oftmals erhebliche Leistungsdefizite auf. In mechanischer Hinsicht resultiert die materialspezifische Heterogenität zumeist in einer signifikant verminderten Schlagzähigkeit und reduzierter Steifigkeit, wobei schwankende Polymeranteile und Kontaminationen ein konstantes Eigenschaftsprofil verhindern (Mager et al. 2026). Zudem führt die wiederholte thermische und scherinduzierte Belastung aus vorherigen Lebens- und Verarbeitungszyklen zu einem irreversiblen molekularen Abbau durch Kettenspaltung. Dies verändert nicht nur das rheologische Fließverhalten, sondern führt auch zu einem drastischen Verlust der mechanischen Festigkeit der Rezyklate (Dominghaus et al. 2013).

Um diesem mechanischen Eigenschaftsverlust gezielt entgegenzuwirken, stellt die Modifizierung mit Virgin-Blendnig-Partnern und Schlagzähmodifikatoren eine vielversprechende Strategie dar (Zweifel et al. 2009). Vor diesem Hintergrund widmet sich die vorliegende Arbeit der Evaluierung eines Modifikationskonzepts an PP-Rezyklaten mit unterschiedlichen Sortiertiefen, um deren Eigenschaftsprofile gezielt an ein Benchmark-Material anzupassen.

1.1 Material und Vorbehandlung

Das erste Rezyklat, rPP-base, stammt aus dem industriellen Kaltwaschprozess einer hellfarbigen Leichtverpackungsabfall-Fraktion gemäß der deutschen Sortierspezifikation *DSD324-0 Polypropylen* (DerGrünePunkt 2024). Dieses Material durchlief eine kommerziellen Farbsortierung und beinhaltet überwiegend weiße und transparente, starre PP-Artikel mit max. 6 Gew.-% Störstoffanteil und repräsentiert die konventionelle Qualität ohne zusätzliche Nachsortierung. Demgegenüber durchlief das zweite Rezyklat, rPP-sort, basierend auf demselben Inputstrom eine erweiterte, mehrstufige Sortier- und Separier-Kaskade, beschrieben von Kuhn et al. (2025). Somit konnte durch den Einsatz von Nahinfrarot- und Farbkameras auf Objekt- und Flake-Ebene sowie Zick-Zack-Sichten zur Folien- und Etikettenabtrennung eine hochreine, weiße und starre PP-Fraktion isoliert werden (Kuhn et al. 2025). Um für die anschließenden Versuche eine optimale Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurden beide Rezyklat-Feedstocks unter identischen industrienahen Bedingungen auf einer Recyclinganlage (INTAREMA 1108 TVEplus, EREMA, Ansfelden, Österreich) mit einem kontinuierlichen Laserfilter (90-110 µm) regranuliert. Zur Modifikation und Eigenschaftsanpassung wurden die beiden Rezyklate mit den in der Tabelle 1 ersichtlichen Schlagzähmodifikatoren und den Virgin Block-Copolymeren vPP-B1 und vPP-B2 geblendet. Um das modifikationsspezifische Verhalten unabhängig beurteilen zu können, wurden zusätzlich ein Random Copolymer (vPP-R) und ein Homopolymer (vPP-H) als Referenz herangezogen.

Tab. 1: Verwendete Materialien.

Kategorie	**Bezeichnung**	**Spezifikation / Handelsname**	**Quelle / Chemische Natur**
Rezyklate	rPP-base	Post-consumer PP	Basisqualität, geringe Sortiertiefe
	rPP-sort	Post-consumer PP	Höhere Sortiertiefe mit Fokus auf weißes PP
Schlagzähmodifikatoren	IM-1	ENGAGE™ 8842	Ethylen-Octen Polyolefin-Elastomer
	IM-2	Exact™ 9162	Ethylen-Buten Copolymer
	IM-3	Queo™ 6800LA	Ethylen-Octen-1 Elastomer
Virgin Polypropylen	vPP-B1	BF970MO	Block Copolymer
	vPP-B2	BH345MO	Block Copolymer
	vPP-R	RF777MO	Random Copolymer
	vPP-H	HF955MO	Homopolymer

1.2 Methoden

Das Compounding der Formulierungen erfolgte auf einem gleichläufigen Doppelschneckenextruder ZSE 18 MAXX (Leistritz Extrusionstechnik GmbH, Nürnberg, Deutschland). Aus dem resultierenden Granulat wurden anschließend auf einer Victory 60 Spritzgussmaschine (ENGEL Austria, Schwertberg, Österreich) normgerechte Prüfkörper für Schlagprüfungen nach ISO 179-1:2023 sowie für Zugversuche nach ISO 3167:2014 hergestellt. Zur analytischen Charakterisierung wurde zunächst die initiale Flake Zusammensetzung der Inputströme manuell nach Rigidität und Farbe ermittelt. Das thermische Schmelz- und Kristallisationsverhalten wurde mittels DSC 8000 (PerkinElmer Inc., Waltham, USA) unter Stickstoffatmosphäre von 0 °C bis 200 °C in nach ISO 11357-3:2018 analysiert. Vor der mechanischen Prüfung wurden alle spritzgegossenen Prüfkörper nach ISO 291:2008 bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit für 3 bis 5 Tage

konditioniert. Das Einkerben der Probekörper erfolgte mit einem automatischen Rotationsmikrotom RM2265 (Leica Biosystems Nussloch GmbH, Nussloch, Deutschland). Die Quantifizierung der Charpy Kerbschlagzähigkeit erfolgte anschließend an einem HIT25P Pendelschlagwerk (ZwickRoell GmbH, Ulm, Deutschland) gemäß ISO 179-1:2023. Das mechanische Eigenschaftsprofil wurde zudem durch Zugversuche zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls an einer Z005 Universalprüfmaschine (ZwickRoell, Ulm, Deutschland) gemäß ISO 527-1:2019 und ISO 527-2:2012 ermittelt. Die Schmelze-Massefließrate (MFR) wurde mit einem Aflow Fließprüfgerät (ZwickRoell, Ulm, Deutschland) bei 230 °C und 2,16 kg Prüflast gemäß ISO 1133-1:2022 bestimmt.

2 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Wie in Abbildung 1 ersichtlich, belegt die Zusammensetzung der Inputströme die ausgeprägte Heterogenität von rPP-base, welches neben starren weißen (47,8 Gew.-%) und transparenten Anteilen (26,4 Gew.-%), 22,8 Gew.-% an flexiblen Folienfraktionen aufweist. Durch die erweiterte Nachsortierung konnten die starre weiße Zielfraktion in rPP-sort auf 97,1 Gew.-% gesteigert und flexible Bestandteile fast vollständig eliminiert werden.

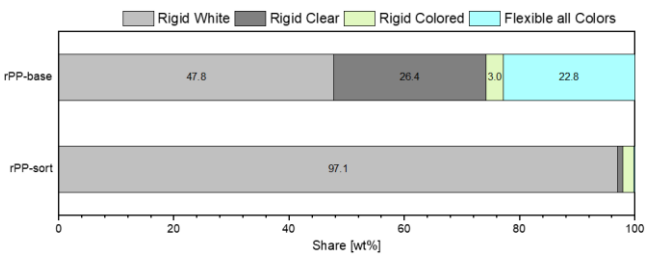


Abb. 1: Zusammensetzung der Inputströme.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, spiegelt sich diese Sortierung unmittelbar im thermischen Verhalten wider: Während rPP-base aufgrund der Folienfraktion eine deutliche Polyethylen (PE) Kontamination zeigt ($T_{m,PE}$ = 124,3 °C; ΔH_{PE} = 3,8 J/g), wurde diese in rPP-sort nahezu restlos entfernt (ΔH_{PE} = 0,2 J/g). Der Hauptschmelzpeak verschiebt sich von 161,9 °C in rPP-base auf 163,9 °C in rPP-sort, einhergehend mit einer Zunahme der Schmelzenthalpie von 86,8 J/g auf 93,1 J/g. Dieser thermische Shift resultiert aus der erfolgreichen Abtrennung niedriger schmelzender Random-Copolymere, die vermehrt in den transparenten Anteilen angesiedelt sind. Folglich weist rPP-sort einen höheren Anteil an kristallineren Homopolymeren und Block-Copolymeren auf.

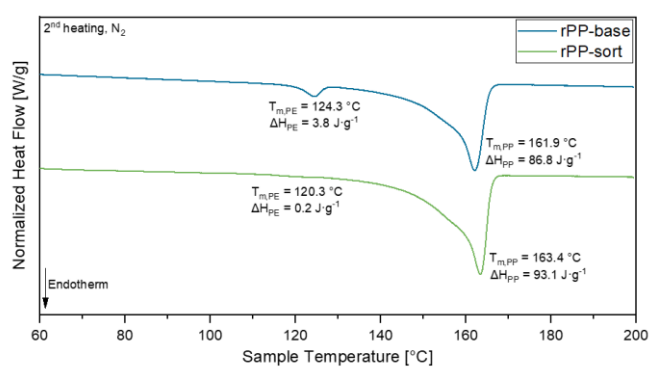


Abb. 2: DSC-Thermogramme (2. Aufheizkurve, N_2-Atmosphäre) von rPP-base und rPP-sort.

Die mechanischen und rheologischen Daten zeigen bei beiden Rezyklaten signifikante Defizite in der Kerbschlagzähigkeit (rPP-base: 4,6 kJ/m²; rPP-sort: 5,0 kJ/m²) gegenüber der Virgin-Benchmark vPP-B1 (7,3 kJ/m²). Abgesehen davon unterscheiden sich die Materialprofile deutlich: Während rPP-base bei einem Zugmodul von 1260 MPa und einer Fließfähigkeit von 10,4 g/10 min deutlich hinter den Eigenschaften von vPP-B1 (1320 MPa bzw. 19,0 g/10 min) zurückbleibt, übertrifft rPP-sort den geforderten Zugmodul mit 1520 MPa und erzielt eine adäquate Verarbeitbarkeit von 18,5 g/10 min. Um die Defizite in der Schlagzähigkeit durch Modifikation auszugleichen, wurde in einem ersten Schritt die Effektivität von Schlagzähigkeits-Modifikatoren (IM) evaluiert. Dabei wurden modifizierte Compounds mit Modifikationsgehalten von 0, 2, 5 und 10 Gew.-% hergestellt. Der Einfluss des Modifikationsgehalts auf die mechanischen Eigenschaften wurde, wie in Abbildung 3 stellvertretend für IM-1 gezeigt, anhand der Steigungen der linearen Regression evaluiert und in Tabelle 2 zusammengefasst. Alle Modifikatoren über alle Konfigurationen bewirken einen linearen Anstieg der Charpy-Kerbschlagzähigkeit und einen linearen Abfall des Elastizitätsmoduls. Dabei erzielte IM-3 bei den für die Anwendung relevanten Matrixmaterialien die höchste Effizienz hinsichtlich der Zähigkeitsoptimierung.

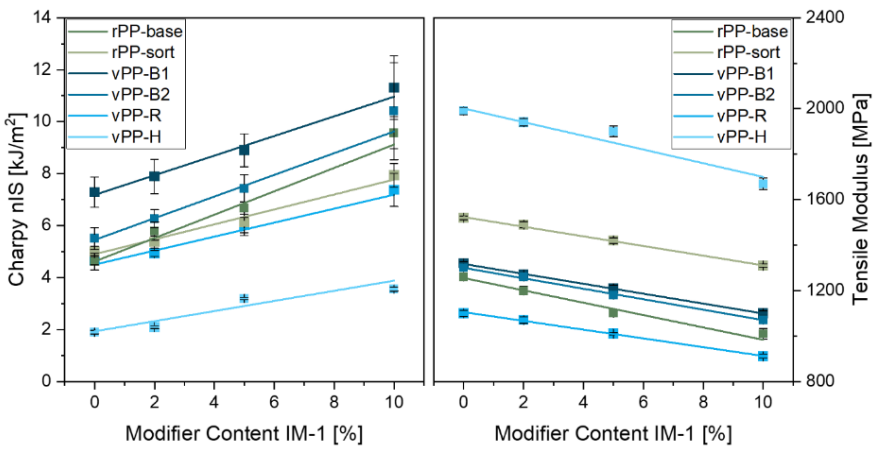


Abb. 3: Einfluss von IM-1 auf die mechanischen Eigenschaften.

Tab. 1: Effizienz der Modifikation, berechnet aus der Steigung der Eigenschaftsänderung bei steigendem Modifikatoranteil.

Steigung der Charpy Kerbschlagzähigkeit bei steigendem Modifikatoranteil [kJ/m²/Gew.-%]			
	IM-1	IM-2	IM-3
rPP-base	0,42	0,38	0,39
rPP-sort	0,27	0,26	0,35
vPP-B1	0,38	0,29	0,44
vPP-B2	0,42	0,45	0,47
vPP-R	0,29	0,25	0,13
vPP-H	0,20	0,19	0,16
Steigung des Zugmoduls bei steigendem Modifikatoranteil [MPa/Gew.-%]			
	IM-1	IM-2	IM-3
rPP-base	-27,15	-28,53	-23,24
rPP-sort	-21,22	-19,32	-20,21
vPP-B1	-21,79	-19,34	-22,66
vPP-B2	-23,01	-23,42	-22,00
vPP-R	-19,26	-15,87	-18,81
vPP-H	-30,13	-24,41	-24,68

Basierend auf den ermittelten Modifikationseffizienzen wurden mittels in der Literatur verankerter, linearer und Arrhenius-Mischungsregeln spezifisch abgestimmte Formulierungen berechnet, um die mechanischen Zielwerte des Virgin-Benchmarks bei einem Rezyklatanteil von mindestens 50 Gew.-% zu erreichen (Traxler et al. 2022). Aufgrund der niedrigen Ausgangssteifigkeit von rPP-base konnten die Benchmark-Zielwerte für den Zugmodul nicht erreicht werden, dennoch wurden illustrative Formulierungen für die praktische Limitierung produziert. Die aus diesen Berechnungen resultierenden und illustrativen Compound-Formulierungen sind in Tabelle 3 gelistet.

Tab. 2: Ausgewählte Compound-Formulierungen.

Com-	Rezyk-	Modifika-	Virgin	rPP Anteil [%]	IM Anteil	vPP Anteil [%]
A	rPP-	IM-3	vPP-B1	50,0	5,0	45,0
B	rPP-	IM-3	vPP-B2	50,0	5,0	45,0
C	rPP-sort	IM-1	vPP-B1	55,0	4,5	40,5
D	rPP-sort	IM-2	vPP-B1	50,0	5,0	45,0
E	rPP-sort	IM-3	vPP-B1	60,0	4,0	36,0

Wie in Abbildung 4 gezeigt, bestätigen die Messdaten die für rPP-base prognostizierten Restriktionen. Zwar erreicht Compound-A die geforderte Kerbschlagzähigkeit mit 7,3 kJ/m^2, verfehlt jedoch die Zielwerte für Zugmodul mit 1170 MPa und Fließfähigkeit mit 12,7 g/10 min. Auch der Versuch, die Verarbeitbarkeit durch einen niedrigviskosen Blending-Partner zu verbessern (Compound-B), führt bei einem MFR von 16,3 g/10 min unweigerlich zu weiteren Einbußen im Zugmodul mit 1140 MPa. Die Defizite von rPP-base lassen sich bei einem Mindestrezyklatanteil von 50 Gew.-% somit nicht simultan kompensieren. Im Gegensatz dazu positionieren sich die Compounds-C, -D und -E trotz Modifikator-bedingter Steifigkeitsabnahme auf oder über dem Benchmark-Level. Alle drei Konfigurationen erfüllen die Kerbschlagzähigkeitsvorgabe. Als optimaler Compound erweist sich dabei Compound-E, welcher selbst bei 60 Gew.-% Rezyklatanteil mit 7,4 kJ/m^2 und 1360 MPa eine ausgewogene Zielbalance erreicht. Dank der hohen initialen Fließfähigkeit von rPP-sort bleiben auch die MFR-Werte der Compounds im Verarbeitungsfenster. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine hohe Sortiertiefe den Spielraum für gezielte Modifikation hinsichtlich anspruchsvoller Anwendungen schafft.

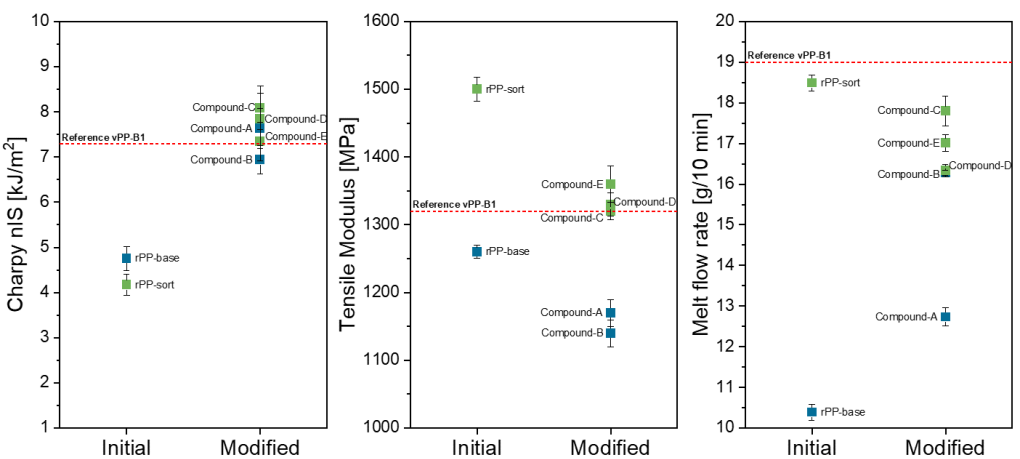


Abb. 4: Mechanische und rheologische Performance der Compounds im Vergleich zu den Ausgangsrezyklaten.

3 SCHLUSSFOLGERUNG

Das Schließen des Materialkreislaufs für hochwertige post-consumer PP-Verpackungen kann nicht allein durch Modifikation des Rezyklats gelöst werden. Die Vorsortierung fungiert hierbei als technologischer Türöffner. Während eine niedrige Sortiertiefe zu intrinsischen Eigenschaftsdefiziten führt, die selbst durch gezielte Modifikation nicht ohne gravierende Einbußen bei der Steifigkeit kompensiert werden können, verschiebt eine erhöhte Sortiertiefe das anwendbare Performance-Fenster signifikant. Die Generierung von post-consumer PP-Rezyklaten für anspruchsvolle Anwendungen basiert daher auf einer sorgfältigen Balance zwischen Sortiertiefe und Modifikation.

4 DANKSAGUNG

Diese Forschungsarbeit wurde im Rahmen des F&E-Projekts „circPLAST-mr – Mechanisches Recycling von Kunststoffen: Von Abfall-Kunststoffen zu hochwertigen, spezifikationsgerechten Rezyklaten“ durchgeführt und von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unter der Fördernummer 889843 gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

DerGrünePunkt. (2024). *Rohstofffraktionsspezifikation 324-0 Polypropylen v1.00.0001*. https://www.gruenerpunkt.de/fileadmin/Dateien/Downloads/PDFs/Rohstofffraktionsspezifikationen2024/April/DOC-23-50686_-_Rohstofffraktionsspezifikation_324-0_Polypropylen_-_v1.00.0001.pdf

Domininghaus, H., Elsner, P., Eyerer, P., & Hirth, T. (Hrsg.). (2013). *DOMININGHAUS - Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen* (8., bearb. Aufl. 2012). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16173-5

European Parliament and the Council. (2025). *EU waste management law*. http://data.europa.eu/eli/reg/2025/40/oj

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

Mager, M., Kuhn, N., Felgel-Farnholz, A., & Fischer, J. (2026). Characterizing Heterogeneity in Post-Consumer Rigid PP Packaging Waste: Implications for Object and Property-Based Flake Sorting. *Journal of Applied Polymer Science*. https://doi.org/10.1002/app.71068

Plastics Europe. (2025). *Plastics the Fast Facts 2025*. https://plasticseurope.org/de/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2025/

Plastics Recyclers Europe. (2023). *HDPE & PP Rigid Packaging Market in Europe*. https://www.plasticsrecyclers.eu/publications/

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

Traxler, I., Marschik, C., Farthofer, M., Laske, S., & Fischer, J. (2022). Application of Mixing Rules for Adjusting the Flowability of Virgin and Post-Consumer Polypropylene as an Approach for Design from Recycling. *Polymers*, *14*(13), 2699. https://doi.org/10.3390/polym14132699

Zweifel, H., Maier, R.-D., Schiller, M., & Amos, S. E. (Hrsg.). (2009). *Plastics additives handbook* (6th ed). Hanser.

KONTAKT

Martin Berschl, BSc
martin.berschl@jku.at

These Boots Are Made for Sorting: Towards Automated Sorting for Reuse for Post-Consumer Shoes

Shirin Askari[1], Kseniia Grai[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

ABSTRACT: Post-consumer footwear represents a significant and growing waste stream in Europe, with over one million tonnes generated annually and a recycling rate below 5%. Within the EU waste hierarchy, direct reuse is the preferred option in circular economy, yet automated sorting systems capable of grading footwear condition rapidly and reproducibly do not currently exist. This study presents the first systematic, multi-attribute physical condition assessment of 951 pairs of post-consumer shoes which were collected as part of a shoe collection campaign in the delivery system at several locations in Styria, Vienna and Lower Austria. The characterization was conducted within the SCARPA MSCA Doctoral Network. The condition of each pair was independently assessed by two assessors using a zone-based grading protocol covering upper condition (grades 1–4), sole condition (grades 1–4), insole condition (grades 1–3), material identification, physical measurements, odour, and closure system. Inter-assessor agreement reached 91% (866/951 pairs). Results show that 18.4% of assessed pairs are directly reusable, 44.9% are not reusable, and a significant fraction (24.8%) falls into an uncertain repairability category requiring expert judgment. Odour was detected in 68% of pairs; however, odour was not used as a reusability criterion as it is considered treatable. These findings provide the ground-truth labelling dataset required for the development of AI-based automated footwear reuse sorting systems.

1 INTRODUCTION

The global footwear industry produced approximately 24 billion pairs of shoes in 2022 (World Footwear, 2023). In the European Union, more than one million tonnes of post-consumer footwear are generated annually, with a recycling rate below 5% (Lee and Rahimifard, 2014). Within the EU waste hierarchy, direct reuse is the highest-value end-of-life option. The revised Waste Framework Directive (European Commission, 2025) introduces mandatory Extended Producer Responsibility (EPR) schemes for footwear across all Member States, with operational schemes required by approximately April 2028, making efficient sorting of post-consumer footwear an urgent industrial challenge.

Current sorting practice for shoes is mainly manual: a trained sorter visually inspects each shoe and assigns it to a reuse, repair, or recycling category based on heuristic criteria. This approach is slow, inconsistent, and impossible to scale to the volumes expected under forthcoming EPR schemes. Automated sorting systems — analogous to those already deployed for textile recycling (Fashion for Good and Circle Economy, 2022) — would require standardised, reproducible condition criteria as their ground-truth training labels. No such framework currently exists for footwear. This contribution presents the development and application of a systematic, zone-based physical condition assessment protocol applied to 951 post-consumer footwear pairs, as the first step towards automated reuse sorting.

2 THE SCARPA PROJECT AND DC5

This study was conducted within the SCARPA MSCA Doctoral Network (Sustainable and Circular Footwear Training Program; HORIZON-MSCA-DN-2024, 2026–2029), a European Joint Doctorate programme under the lead of the Ghent University addressing the full footwear lifecycle. Within Work Package 2 (Sampling & Sorting), DC5 at the Chair of Waste Processing Technology and Waste Management focuses on sorting for longevity (reuse) through AI-based classification.

3 METHODOLOGY

A total of 951 pairs of post-consumer shoes were collected from several sources in Austria at different designated collection points in Styria, Vienna and Lower Austria within a shoe collection campaign. Pairs rather than individual shoes were assessed, as reusability requires a complete matching pair. Each pair was independently assessed by two assessors using a standardised multi-attribute protocol covering the attributes listed in Table 1.

Tab. 1: Categories considered for the assessment of footwear in relation to reuseability.

Category	**Attributes**	**Scale / Options**
Identification	Shoe type, gender, EU size, brand, colour	Categorical
Measurements	Weight, inner length	Grams, mm
Materials	Upper material, sole and insole material	Leather/textile/synthetic/mixed/unknown
Upper condition	Grade + damage zone + damage type	1 (like new) to 4 (structural damage)
Sole condition	Grade + wear zone + detachment	1 (minimal wear) to 4 (damaged/detaching)
Insole condition	Grade + presence + staining	1 (clean) to 3 (heavily worn/missing)
Odour	Presence assessed by smell	Yes / No
Closure system	Type, presence, functionality	Lace/velcro/buckle/zip/slip-on

Shoe types were assigned from visible structural and design characteristics rather than brand names. The operational definitions are summarised in Table 2.

Tab. 2: Operational definitions of the footwear types used for dataset classification.

Shoe type	**Operational definition**
Sneakers	Low-cut or ankle-height casual or athletic shoes with flexible rubber or synthetic soles.
Boots	Shoes with an upper extending above the ankle to form a distinct shaft.
Slippers	Lightweight indoor shoes for easy on and off, usually soft and without secure fastening.
Sandals	Open shoes exposing much of the foot and held to the foot by straps or bands.
Formal shoes	Structured, mainly closed dress or business shoes, including Oxfords, Derbies, and loafers.
High heels	Shoes with the heel visibly elevated above the forefoot.
Ballet/flats	Low-cut closed shoes with a shallow upper and a flat or very low heel.
Other	Rare or hybrid footwear not matching the preceding definitions.

The physical condition of each shoe was assessed across three zones (upper, sole, and insole) using a standardised grading scale (Table 3). Each pair was then independently classified by both assessors into one of four reusability categories — Reusable, Repairable-minor, Repairable-uncertain, or Not Reusable — based on holistic visual judgment of the combined zone conditions. Odour was recorded as a separate attribute but did not influence classification, as it is considered treatable prior to resale. Final classifications were agreed by consensus, and the decision process is visualised in Figure 1.

Tab. 3: Condition grading system for the three assessment zones. Upper and sole use a 4-point scale; insole uses a 3-point scale.

Grade	Upper Condition	Sole Condition	Insole / Inside Condition
1	Like new — no visible damage	Minimal wear — tread fully visible	Clean — no visible wear
2	Light scratches / minor scuffs — structure intact	Moderate wear — tread partially worn but functional	Worn but intact — slight compression
3	Visible wear / surface damage — structure still intact	Heavy wear — tread mostly gone	Heavily worn — compressed, damaged, or missing
4	Structural damage: tears, holes, severe deformation	Sole damaged, detaching, or missing sections	N/A (3-point scale)

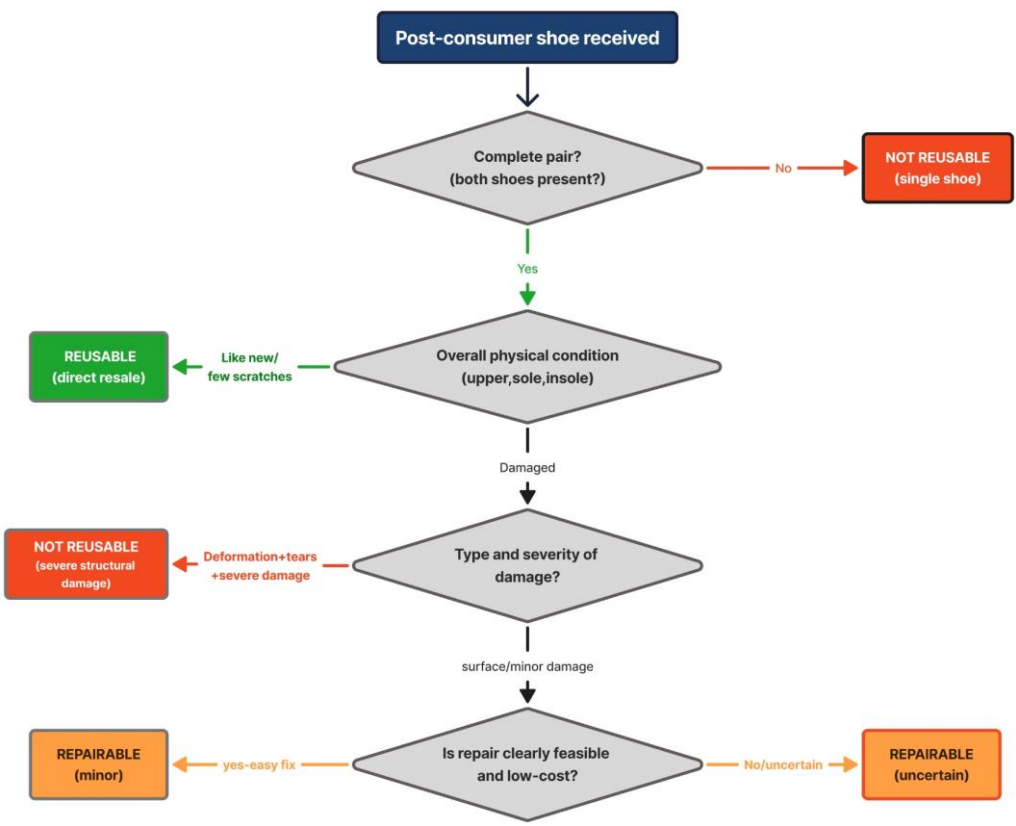


Fig. 1: Reusability assessment decision process.

4 RESULTS

4.1 Dataset Overview

Figure 2 presents an overview of the assessed dataset. The stream was genuinely heterogeneous: sneakers dominated (40.7%), followed by boots (24.3%), slippers (10.9%), sandals (8.2%), and formal shoes (8.2%). Female-categorised shoes represented 46.7% of pairs, followed by children (23.4%), male (20.4%), and unisex (9.5%).

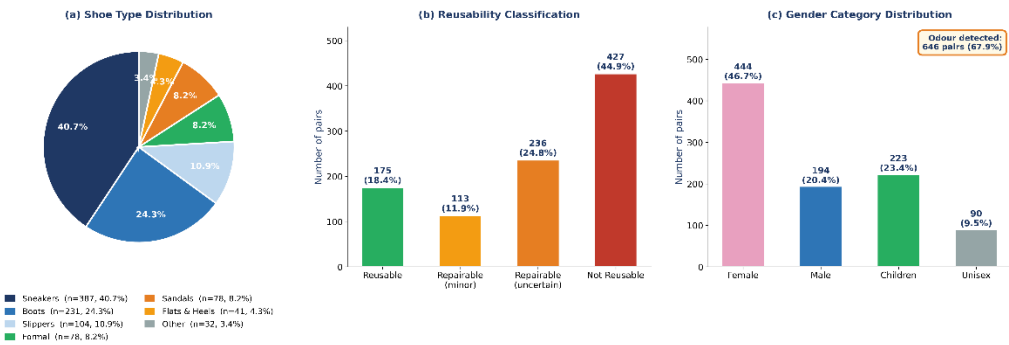


Fig. 2: Dataset overview: (a) shoe type distribution, (b) reusability classification (62 single shoes reclassified as not reusable), (c) gender category distribution with odour prevalence (n = 951).

4.2 Reusability Outcomes

Of the 951 assessed pairs, 175 pairs (18.4%) were classified as directly reusable, 113 pairs (11.9%) as repairable-minor, 236 pairs (24.8%) as repairable-uncertain, and 427 pairs (44.9%) as not reusable. Additionally, 62 single (unpaired) shoes were reclassified as not reusable, as reuse requires a matching pair. The 24.8% repairable-uncertain category — where both assessors agreed on condition grades but could not determine repairability from visual inspection alone — represents the boundary condition of visual assessment and highlights the need for cobbler expertise or cost-benefit analysis in the sorting pipeline.

Odour was detected in 646 pairs (67.9%). As odour was not used as a reusability criterion in this study — being considered treatable through cleaning or ozone treatment — it did not influence reusability classifications. However, the high prevalence highlights a relevant operational challenge: visual-only automated sorting systems cannot detect odour, and industrial reuse pipelines will require dedicated cleaning pre-treatment for a majority of incoming shoes.

4.3 Visual Examples of Reusable and Not Reusable Footwear

Figure 3 presents representative examples of footwear classified as reusable and not reusable during the condition assessment. The yellow and red pairs were classified as reusable because their visible structure and closure systems remained intact, with only limited stain. In contrast, the black slip-on shoes and the blue children's shoes were classified as not reusable because of extensive material deterioration, tearing, fraying, deformation, and material loss. These examples illustrate the visual distinction between footwear suitable for direct resale and footwear unsuitable for reuse under the applied assessment protocol.



Fig. 3: Representative examples of footwear classified as reusable ((a) yellow lace-up shoes with limited stain; (b) red lace-up shoes in good condition and not reusable ((c) black slip-on shoes with severe tearing, fraying, and deformation; (d) children's shoes with extensive upper wear and tears.

4.4 Reusability by Shoe Type

Figure 4 shows reusability outcomes stratified by shoe type. Sneakers showed the highest number of directly reusable pairs, while boots and formal shoes showed higher proportions of not-reusable outcomes. Slippers showed the highest odour prevalence. The observed differences indicate that shoe type should be considered when developing automated footwear sorting models.

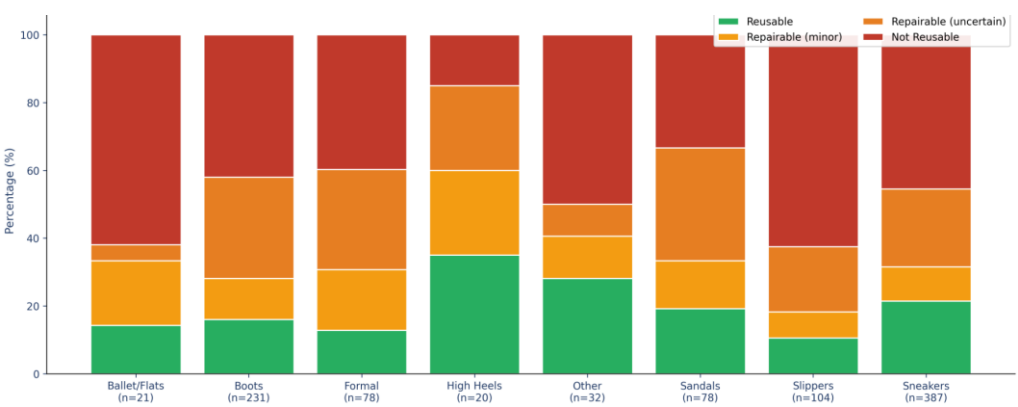


Fig. 4: Reusability outcome by shoe type (percentage of pairs per category, n = 951).

5 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

This study presents the systematic, multi-attribute physical condition assessment of a large post-consumer footwear dataset (951 pairs). The results confirm that a zone-based visual protocol can reliably classify approximately 75% of incoming shoes (agreement 91% between two independent assessors), while the remaining 25% - primarily the repairable-uncertain fraction - require additional assessment modalities beyond visual inspection.

Three findings are particularly relevant for automated sorting system design. First, the high odour prevalence (68%) implies that future systems require chemical sensing or validated visual proxy features correlated with odour. Second, the 24% repairable-uncertain fraction defines the confidence threshold at which automated systems should flag shoes for human review rather than autonomous classification. Third, shoe-type-specific condition distributions suggest that category-aware classification models may outperform general models.

FUNDING

The SCARPA project receives funding from the European Union's HORIZON.1.2 – Marie Skłodowska-Curie Actions (MSCA) programme under Grant Agreement No. 101227206.

REFERENCES

Fashion for Good and Circle Economy (2022). Sorting for Circularity Europe Report. Amsterdam.

Landis, J.R., Koch, G.G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics 33(1), 159–174.

Lee, M.J., Rahimifard, S. (2014). An air-based automated material recycling system for post-consumer footwear. Resources, Conservation and Recycling 69, 90–99.

SCARPA Consortium (2024). SCARPA — Sustainable and Circular Footwear Training Program. HORIZON-MSCA-DN-2024. Ref. Ares(2024)8631551.

World Footwear (2023). World Footwear Yearbook 2023. APICCAPS, Porto.

CONTACT

Shirin Askari, MSc.
shirin.askari@unileoben.ac.at
+436768453865134
Chair of Waste Processing Technology and Waste Management (AVAW)
Technical University of Leoben

Sole Searching - Material-Driven Sorting for Footwear Circularity

Kseniia Grai[1], Shirin Askari[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

ABSTRACT: Post-consumer footwear is now a large waste stream: 23.9 billion pairs were produced and about 22.5–23 billion pairs were discarded in 2025. Recycling is difficult because one shoe can contain foams, rubber, textiles, leather-like parts, coatings, metal parts and strong adhesives. This study reports the manual sorting and visual disassembly steps of a footwear sorting project. The aim was to record material variety, bonded layers, and dirt on used shoes. These observations will support future NIR- and RGB-based AI sorting and the selection of suitable recycling routes. The work compares simple mono-material shoes, such as EVA-foam clogs, with complex shoes, such as sneakers containing polyurethane outsoles, synthetic uppers, metal parts, velcro closures, and elastic laces. One-material shoes can be identified as clean single fractions for possible mechanical recycling. Complex, soiled shoes produce mixed surface signals. Soil, metals, and overlapping polymers can hide the main recyclable material, limiting the reliability of optical classification based only on exterior signals. Manual sorting therefore helps define the limits of future optical sorting and shows the need for material-based classification, not only shoe-type recognition.

1 INTRODUCTION

According to a recent report, global footwear production will reach 23.9 billion pairs per year by 2025, while the volume discarded over the same period will be approximately 22.5–23 billion pairs (World Footwear Yearbook, 2025). This figure illustrates both the scale of the waste problem and the lack of infrastructure for recycling or disposal of materials used in the footwear industry. Unlike packaging plastics or single-fiber textiles, shoe recycling has received significantly less research attention because of the complexity of production and the large number of materials used in footwear. These place shoe sorting and recycling outside the scope of many existing traditional recycling systems (Polecki et al., 2026).

Currently, the modern industrial scheme involves manually classifying shoes by commercial type — sports shoes, leather shoes, sandals, and similar categories — followed by shredding (Van Rensburg et al., 2020). However, this approach destroys compositional information when it is most needed and results in highly contaminated fractions of mixed materials with limited value in secondary markets. Such a scheme may work for mono-material flows, but shoes are rarely made of just one material (Staikos & Rahimifard, 2007).

More often, shoes are products designed to meet competing functional requirements such as cushioning, flexibility, wear resistance, moisture management and aesthetic appeal, by using many materials with different physical and chemical properties. A single pair of shoes can combine, for example, low-density ethylene-vinyl acetate (EVA) midsoles, polyurethane cushioning layers, thermoplastic polyurethane (TPU) or polyvinyl chloride (PVC) structural overlays, rubber outsoles, polyester, nylon, or cotton textile uppers, natural or synthetic leather panels, chemically treated linings, and adhesive systems (Van Rensburg et al., 2020). These materials are often fundamentally incompatible from a processing standpoint (Muthu, 2013).

Manufacturers also use a variety of adhesives to create original designs and impart aesthetic and functional properties; they may also add decorative elements such as zippers, metal hardware, pigmented coatings, plastic inserts, and cushioning gels, each of which introduces additional heterogeneity into the waste stream. Therefore, traditional sorting and recycling technologies, which assume a degree of homogeneity in the incoming material, are unsuitable for this level of complexity (Polecki et al., 2026). A polymer fraction contaminated with textile fluff, adhesive residues

and elastomer particles ceases to be a pure secondary raw material and becomes a composite residue with reduced application potential and economic value.
The complexity of shoe recycling stems primarily from footwear design and the need to ensure functional comfort for consumers. For comfort during running and walking, shoes must be flexible, durable, breathable and able to absorb shock. To achieve these functions, engineers combine different material classes: lightweight flexible foams for cushioning, durable leather or textiles for uppers, and dense cross-linked elastomers for soles. The challenge is that these elements are tightly bonded together, and this strong multi-component construction turns old shoes into difficult-to-recycle waste (Paiva et al., 2015).

2 THE SCARPA PROJECT AND DC7

The research on sorting for recycling is being carried out within the framework of the SCARPA doctoral network (HORIZON-MSCA-DN-2024), a multi-institutional European research program under the lead of Ghent University and bringing together fifteen doctoral students (DCs) from universities and industrial partners to develop a complete closed-loop value chain for footwear—from design for recyclability to waste characterization, sorting, mechanical and chemical recycling, as well as policy and digital modeling. As part of the SCARPA project, DC7 conducts her research at the Chair of Waste Processing Technology and Waste Management. The overall objective of this research is to develop a systematic, automated, multi-step sorting methodology for used shoes, capable of separating material streams with a purity suitable for high-quality mechanical and chemical recycling.

3 MATERIAL COMPLEXITY AND THE SORTING PROBLEM

3.1 The multi-material architecture of Footwear

EVA foam is widely used because of its softness and cushioning properties, especially in midsoles (Muthu, 2013). However, when heat-treated, it behaves differently from rigid polyurethane layers, which are often used where wear resistance is required (Polecki et al., 2026). Rubber soles create an additional challenge because natural rubber, styrene-butadiene rubber, and ethylene propylene diene monomer (EPDM) are cross-linked thermosetting elastomers that cannot simply be melted like thermoplastics (Alves et al., 2025). They require processes such as devulcanization or energy recovery rather than conventional melt recycling. If rubber particles enter a molten thermoplastic stream, they can damage the mechanical properties of the recycled material (Tippayawong & Tippayawong, 2017).
Similarly, TPU and PVC components, often used in protective toe caps or overlays, have different viscosities, chemical compatibilities, and melting temperatures (Polecki et al., 2026). Mixing or recycling them together is therefore problematic and may be technically unsuitable. Textile materials such as woven, knitted or nonwoven fabrics made from polyester, nylon, cotton, or blends are used in uppers and linings and are often treated with water-repellent or antimicrobial finishes (Alves et al., 2025). These treatments introduce additional chemicals into an already heterogeneous recycling stream.
Modern footwear also contains pigments, plasticizers, and surface coatings that can migrate into recycling streams during shredding or melt processing (Muthu, 2013). These contaminants can alter mechanical properties and may introduce potentially harmful substances into the stream. The key issue is not only that shoes contain many components, but that each material has its own recycling pathway. Because of this, it is impossible to create a simple universal recycling scheme relying only on mechanical, chemical, or thermal methods.

3.2 The adhesive problem

The methods used to attach the upper and lower parts of shoes, particularly adhesive bonding, require special consideration (Paiva et al., 2015). To ensure durability and wear resistance, footwear uses specialized adhesives, including polyurethane and chloroprene adhesives, which can form strong bonds between materials such as rubber and foam, textiles and plastics, or leather and polymers. These adhesives are designed for intensive-use conditions, including repeated bending during walking, exposure to moisture and sweat, and temperature fluctuations (Paiva et al., 2015).

As a result, separating the upper and lower parts of the shoes for material recovery without damaging the bonded materials is extremely difficult. During grinding, adhesive layers are not separated; instead, they remain attached to fragments of rubber, foam, textile or plastic and enter the general material flow, further contaminating it. Even small amounts of adhesive contamination can change the chemical and mechanical properties of the recycled material or the entire waste stream. In closed-loop recycling, where the goal is to return material to near-original quality, recycled-material purity is a primary criterion, making adhesive contamination a major barrier (Van Rensburg et al., 2020).

4 RESEARCH APPROACH

The manual sorting and characterization of 951 pairs of shoes (cf. contribution of Askari et al. at the Recy&DepoTech 2026) produced two sharply contrasting recyclability cases. Fig. 1 shows clogs in the left panel, molded from a single polymer-foam fraction (EVA formulation). The absence of separate uppers, outsoles, linings, laces, closures, metal components, or bonded textile layers allows rapid visual classification of these items as a predominantly mono-material stream. This makes the products a cleaner candidate fraction for direct mechanical recycling, in contrast to conventional footwear, where cushioning, flexibility, abrasion resistance, and structural integrity are typically achieved through permanently bonded, incompatible materials.



Fig. 1: Two highly contrasting examples of footwear complexity – Left: Clogs; Right: Sneakers

The right panel of Fig. 1 represents the opposite case: heavily soiled high-top sneakers with a polyurethane outsole bonded to a synthetic leather upper, metal decorative elements, elastic laces with rubber cores wrapped in polyester/nylon fibers, and a hook-and-loop closure adding polyamide or polyester fractions. This combines polymers, elastomers, textiles, coatings, metals, dirt, and adhesive interfaces in one object. Such bonding is a major recycling barrier because footwear adhesives are designed to join dissimilar substrates and resist delamination. The resulting material mix is not merely diverse but processing-incompatible, since footwear polymers,

rubbers, coated textiles, additives, and finishes differ in density, melting behavior, thermal stability, solubility, and chemical compatibility.
These observations directly define the next sensor-based sorting challenge. The clogs example presents one dominant material signal and should be comparatively simple to classify. The sneaker example presents overlapping and spatially fragmented signals: soil can mask surface spectra (Stipanovic et al., 2026); metals interrupt polymer detection; synthetic leather, polyurethane, rubber, polyester/nylon laces, and velcro generate competing material responses. For NIR- or RGB-based optical sorting, the sensor may therefore classify only a contaminated exterior rather than the recyclability-relevant bulk composition. The next phase is therefore a comprehensive characterization of the composition of shoes, identification of the range of materials used, and evaluation of the sensors to distinguish different materials.

FUNDING

The SCARPA project receives funding from the European Union's HORIZON.1.2 – Marie Skłodowska-Curie Actions (MSCA) programme under Grant Agreement No. 101227206.

REFERENCES

Alves, D.I., Guimarães, R. Costa, S.M. Fernandes, N.A.T.C., Carvalho, Ó., Fangueiro, R., Ferreira, D.P. (2025) An Innovative Solution for Post-Consumer Footwear Waste: Nonwoven Fibrous Structures with Thermal and Acoustic Insulation Properties. *Materials*, *18*, 4765. https://doi.org/10.3390/ma18204765.

Muthu, S.S. (2013). *The Environmental Impact of Footwear and Footwear Materials*. In: Luximon, A. (Ed.) Handbook of Footwear Design and Manufacture. Woodhead Publishing, ISBN**:** 978-0-85709-539-8.

Paiva, R.M., Marques, E.A., da Silva, L.F., António, C.A., Arán-Ais, F. (2016) Adhesives in the footwear industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2016;230(2):357-374. doi:10.1177/1464420715602441.

Polecki, K., Paciorek-Sadowska, J., Borowicz, M., Isbrandt, M., Zarzyka, I. (2026) Polyurethane Recycling: Sustainable Development Perspectives and Innovative Approaches. *Materials*, *19*, 805. https://doi.org/10.3390/ma19040805.

Staikos, T. & Rahimifard, S. (2007) Post-Consumer Waste Management Issues in the Footwear Industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 221(2):363-368. doi:10.1243/09544054JEM732SC.

Stipanovic, H., Koinig, G., Fink, T., Tischberger-Aldrian, A. (2026) Effects of surface contamination on automated textile sorting using NIR-spectroscopy. Waste Management, Volume 210, 115227, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115227.

Tippayawong, K.Y. & Tippayawong, N. (2017). Fuel Recovery from Thermal Processing of Post-consumer Footwear Waste. *Energy Engineering*, *114*(3), 7–16. https://doi.org/10.1080/01998595.2017.11863761.

Van Rensburg, M. L., Nkomo, S. L., Mkhize, N. M. (2020). Life cycle and End-of-Life management options in the footwear industry: A review. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, *38*(6), 599–613. https://doi.org/10.1177/0734242X20908938

World Footwear Yearbook (2025). https://www.worldfootwear.com/media/wf_uploads/wf202531587451624.pdf.

CONTACT

MSc Kseniia Grai
kseniia.grai@unileoben.ac.at
+43 3842 / 402 – 5139
+43 676 / 84 53 86 - 5139
Chair of Waste Processing Technology and Waste Management
Technical University of Leoben

Das Verhalten von Paper Composites unter Druckbelastung und deren Versagensarten

Sandra Schmidt[1] & Andreas Büter[1]
[1)] Hochschule Darmstadt, Fachbereich für Maschinenbau und Kunststofftechnik, Darmstadt, Deutschland

KURZFASSUNG: Im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojektes der Hochschule Darmstadt soll untersucht werden, ob Papierlaminat aus recyceltem Altpapier ein nachhaltiges Leichtbaumaterial ist. Für die Herstellung von Papier können Papierfasern sowohl aus Einjahrespflanzen, Durchforstungsholz und Sägewerksabfällen als auch aus recyceltem Altpapier gewonnen werden. Im Unterschied zu Papier, welches sich bis zu sieben Mal erneut zu Papier verarbeiten lässt und eine Recyclingquote bis zu 100% ermöglicht, wird bei der Herstellung von holzbasierten Faserplatten (wie Spanplatten oder MDF) kaum auf recyceltes Holz zurückgegriffen. Zusätzlich erschwert die Verklebung der Holzfasern mit Harz das erneute stoffliche Recycling. Im direkten Vergleich mit holzbasierten Faserplatten steht diesen Vorteilen von Papier ein zusätzlicher Energie- und Wasserbedarf für die Produktion gegenüber.
Das hier untersuchte dickwandige Papierlaminat besteht aus bis zu 16 verklebten Papierschichten und weißt, bedingt durch die Faserverstärkung, bezogen auf die Fertigungsrichtung eine leichte Anisotropie auf. Von Konstruktionswerkstoffen wird in der Regel eine Berechenbarkeit gefordert. Für Zugbelastungen werden in Kiziltoprak (2022) umfassende Untersuchungen für die Papierlaminate vorgestellt. Bei Druckbeanspruchungen weißt dieses Material durch seinen geschichteten Aufbau und ein komplexes Versagen in Form von symmetrischen oder asymmetrischen Schichtknicken auf. Diese Instabilität hat eine lokale Steifigkeitsreduktion zur Folge. Dem gegenüber steht eine gemessene Steifigkeitserhöhung mit zunehmender Probenlänge.
Um das Versagensverhalten zu verstehen, wurden an klimatisiert gelagerten, dickwandigen Proben unterschiedlicher Länge Druckversuche in Form von Stirnstauchversuchen mit definierten Dehnraten durchgeführt. Parallel wurde versucht das Materialverhalten mittels der FEM nachzubilden und durch einen einfachen Federansatz zu beschreiben. Im Rahmen des Papers werden aktuelle Versuchsergebnisse dargestellt und die Bruchformen gegenübergestellt und diskutiert. Ziel ist es ein erstes Materialmodell für Druckbelastungen zu generieren, dass den Besonderheiten im Versagen von Papier gerecht wird.

1 EINLEITUNG

Im vom Land Hessen geförderten Loewe Schwerpunktes „BAMP! – Bauen mit Papier!“ wurden die Möglichkeiten von Papier als nachwachsender Werkstoff im Baugewerbe eruiert. Ziel war es hierbei, die grundlegenden Struktur-Eigenschaftsrelationen von Papier zur Nutzung dieses Materials in Bauanwendungen zu verstehen. Für stabförmige Tragwerke wie Stäbe und Balken sollten systematische Entwicklungsmethoden und neue Gestaltungsansätze geschaffen werden, um temporäre Bauwerke aus Papier werkstoff-, herstellungs- und nutzungsgerecht zu ermöglichen. In Knaack et al. (2023) sind Ergebnisse von BAMP zusammengefasst. In einen Folgeprojekt der Hochschule Darmstadt hda sollte nun eine Materialdatenbasis geschaffen werden, die es ermöglicht recyceltes Papier als einen nachhaltigen Konstruktionswerkstoff verwendbar zu machen. Die Bewertung der Nachhaltigkeit findet auf Basis eines Life-Cycle-Assessment statt und soll mittels daraus abgeleiteter Kennzahlen erfolgen. Das ist aber nicht Teil dieser Veröffentlichung. Für den Einsatz als Konstruktionswerkstoff muß Papier, als ein Material mit einer geringen Dichte, hinsichtlich Festigkeit, Steifigkeit, Versagensverhalten usw. „berechenbar“ sein. Aktuell wird Papier bereits recycelt und z.B. in der Verpackungsindustrie weiterverwendet. Der Status eines Konstruktionswerkstoff kommt aufgrund der höheren Anforderungen an einem Konstruktionswerkstoff einer Aufwertung des Wertstoffs „Papier“/„recyceltes Papier“ gleich.

1.1 Material und Halbzeug

Für die Papierherstellung werden Papierfasern verarbeitet, die laut Blechschmidt (2013) hauptsächlich aus einjährigen Pflanzen, Durchforstungsholz und Sägewerksabfällen gewonnen werden. Im Gegensatz zu anderen kurzfaserverstärkten Kunststoffverbundwerkstoffen (FRP) – bei denen üblicherweise Carbon- oder Glasfasern zum Einsatz kommen – sind die Fasern von Papierlaminaten erneuerbar und recycelbar. Das untersuchte dickwandige, geschichtete Material (Abbildung 1) wurde aus einem L-förmigen Winkelkantenschutz (150x150x10mm) herausgesägt.

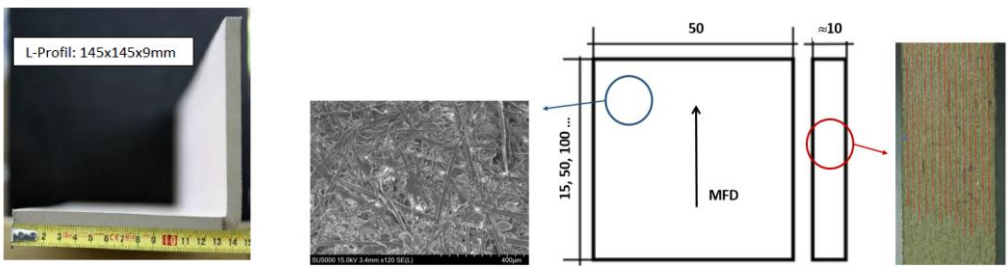


Abb. 1: Winkelkantenschutz, Mikrostruktur (Papier), Probengeometrie und Schichtaufbau

Der Winkelkantenschutz selbst besteht aus ca. 15 Lagen, kontinuierlich in einem Walz-/Trocknungsprozeß hergestelltem Papierschichten. Diese dünnen Papierschichten werden zugeschnitten, nach Verleimung übereinander gefügt und mittels eines formgebenden Walzprozess in mehreren Schritten in L-Form gebracht und miteinander verklebt (Knaack et al., 2023). Die Papierschichten können als ein wirrfaserverstärktes Material betrachtet werden. In Abbildung 1 sind für eine 50x50x10mm (//), die Mikrostruktur und der Schichtaufbau exemplarisch dargestellt. Das Material weißt in Bezug auf die Fertigungsrichtung (Manufacturing Direction MFD oder auch MD) eine leichte Anisotropie auf.

1.2 Probenherstellung und Vorbereitung

Aus diesem kommerziell, verfügbaren Winkelkantenschutz wurden in Längsrichtung (//) d.h. in Fertigungsrichtung (MD) und quer (⊥) zur Fertigungsrichtung (CD) Proben verschiedener Länge mit einer Band- oder Kreissäge herausgeschnitten und mechanisch untersucht. Ziel der Arbeit war es die längen- und breitenabhängigen Druckeigenschaften (E-Modul und Druckfestigkeit), wie auch den Einfluß von Form und Verklebung zu bewerten. In dieser Veröffentlichung werden nur die Ergebnisse der 10x50x50mm und 10x50x100mm (MD) Proben betrachtet.

1.3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die Druckprüfungen wurden als Stirnstauchversuch in Anlehnung an (DIN EN ISO 604, 2003) mit einer Zwick&Roell Universalmaschine Z050 in einem Klimaraum mit einer Dehnrate von 0,0005 [1/s] durchgeführt (Schmidt & Büter, 2024). Die Druckplatten verhindern durch Haftreibung die Querdehnung im Bereich der Lasteinleitung. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der 10x50x50mm und 10x50x100mm Proben. Vor der Durchführung der Druckversuche war es notwendig, die aus dem Halbzeug gesägten Proben für die Versuche entsprechend vorzubereiten. Da Papier sehr hydrophil ist und mit der Feuchtigkeitsaufnahme quillt wurden alle Proben im Klimaraum bis zu einer Gewichtskonstanz eingelagert. Die Gewichtskonstanz weist darauf hin, dass der Feuchtigkeitsaustausch abgeschlossen ist.

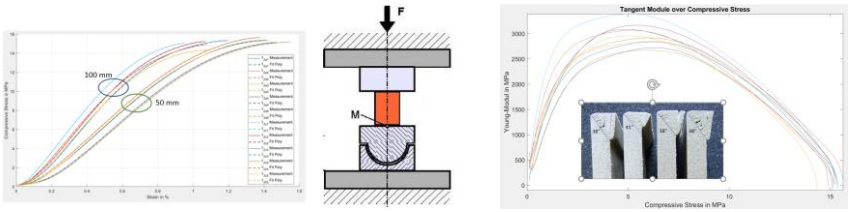


Abb. 2: Spannungs-Dehnungskurven der 10x50x50mm und 10x50x100mm Proben sowie der Tangenten Modul über die Druckfestigkeit.

1.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Spannungs-Dehnungskurven zeigen ein nicht lineares Materialverhalten auf. Das bestätigt Abbildung 2 in der auch das um die Maschinensteifigkeit bereinigte Tangentenmodul aufgetragen über die Druckspannung dargestellt ist. Das Tangentenmodul zeigt kein Plateau, d.h. es gibt keinen linear elastischen Bereich. In Abbildung 2 sind darüber hinaus für 4 Proben exemplarisch die auftretende Versagensformen abgebildet. Da die Proben beim mechanischen Versuch stark verformt wurden, ist bei diesen Proben ein abgleiten des Materials unter einem Winkel zwischen 38° und 41° sichtbar. Die starke Verformung macht eine genaue Bestimmung des Winkels schwierig. Das Versagensverhalten dieses aus vielen dünnen Schichten aufgebauten Material ist dadurch zu erklären, und das zeigen auch die dargestellten Versagensformen, dass eine zu niedrige Schubsteifigkeit zu einem lokalem Schubknicken führt. Schürmann (2007) zeigt ein ähnliches Verhalten, an auf Druck belasteten unidirektional verstärktem Kunststoff, auf. Orientierungsfehler (z.B. Ondulationen) der Schichten beeinflussen das Versagensverhalten (Stabilitätsversagen) stark, was sicherlich auch ein Grund für die Streuung ist.

1.5 Bestimmung des Bruchwinkels über das Wirkebene bezogene Spannungskonzept nach Schürmann (2007)

Bei vielen der untersuchten Proben tritt das Versagen im Bereich der Lasteinleitung auf. Auch der Bruchwinkel oder Abgleitwinkel liegt bei den meisten Proben zwischen 35° und 43°. Um das Bruchverhalten nachzuvollziehen soll auf Basis eines wirkebenenbezogenen Spannungskonzept die Bruchlage nachgerechnet werden.
Während des Druckversuchs bewirkt die Reibung der dickwandigen Probe mit den Stauchplatten des Prüfstandes eine verhinderte Querdehnung und damit einen mehraxialen Beanspruchungszustand. Dem wirkebenenbezogenen Spannungskonzept (Schürmann, 2007) liegt die Idee zugrunde, daß sich je nach Schnittwinkel die mehraxiale Beanspruchungszustände im Material ändern. Jeder Beanspruchungszustand bewirkt so, bezogen auf die Schnittebene, eine Anstrengung im Material. Versagen wird das Material in der Schnittebene, in der die Anstrengung am größten ist. Ausgangspunkt für diese Betrachtung ist der räumliche mehraxiale Spannungszustand des Schichtlaminats, beschrieben durch die Schichtspannungen σ_2 , σ_3 ,τ_{23} , τ_{13} , τ_{12} im Koordinatensystem 1, 2, 3 (Breitenrichtung, Dickenrichtung, Lastrichtung). Auf jeder potenziellen Bruchebene wird ein neues, Koordinatensystem x_1,x_n,x_t eingeführt. Die Normalrichtung x_n dieser Ebene ist um den Winkel θ aus der Lastrichtung x_t herausgedreht. Für jeden gewählten Schnittwinkel θ kann der Spannungsvektor σ_2 , σ_3 ,τ_{23} , τ_{13} , τ_{12} auf den Vektor $\sigma_n(\theta)$, $\tau_{nt}(\theta)$, $\tau_{n1}(\theta)$ der betrachtete Ebene transformiert werden. Die Normalspannung σ_n entsteht dabei durch Überlagerung von Anteilen aus σ_2, σ_3 und τ_{23} sowie τ_{nt} und τ_{n1} aus Kombinationen der Schubspannungen τ_{23}, τ_{31} und τ_{21} resultieren (Schürmann, 2007). Zur qualitativen Bewertung der Schnittebenen wird die in Gleichung (1) gegebene Anstrengung gemäß einem elliptischen Ansatz gewählt.

$$A(\theta)=\left(\frac{\sigma_n(\theta)}{R_e}\right)^2+\left(\frac{\tau_{n\psi}(\theta)}{b\cdot R_e}\right)^2=\frac{1}{R_e^{\,2}}\cdot\left(\sigma_n^{\,2}(\theta)+\left(\frac{\tau_{n\psi}(\theta)}{b}\right)^2\right) \qquad (1)$$

Die Ellipsenfunktion beschreibt hier einen Versagenskörper, der bei der Verwendung der richtigen Festigkeiten mit der Anstrengung A=100%=1 die Versagensgrenze definiert. Der Ansatz basiert mit b=1/2 und R_e als Fließgrenze auf die für isotrope, homogene Materialien erprobte Schubspannungshypothese. Nach Issler (1995) beurteilt sie das Versagen durch Fließen und unter gewissen Voraussetzungen auch durch Schubbruch. Die Hauptschubspannungen spielen hierbei eine große Rolle. Da geschichtetes Papier eigentlich nicht fließt, sondern aufgrund einer zu niedrige Schubsteifigkeit ehr zu einem lokalem Schubknicken neigt, spielen u.E. auch hier, neben den Druckbeanspruchungen die schnittebenen bezogenen Schubspannungen eine Rolle. Für das untersuchte Papierlaminat liegen uns die Werte der Festigkeitsgröße R_e und b in Gleichung (1) nicht vor, was aber durch Annahme eines R_e-Wertes dennoch eine qualitative Bewertung der Schnittebenen über einen Anstrengungswert ermöglicht. b berücksichtigt als Faktor eine gegenüber R_e verminderte Schubfestigkeit ($b*R_e$) des Materials. Da im Wesentlichen die Schubspannungen zum Versagen führen, wurde für jeden Schnittfläche θ eine Anstrengung A qualitativ bestimmt. Damit ergibt sich für jeden Schnittwinkel θ eine „wirkebenenbezogene", qualitative Anstrengung $A(\theta)$. Das Vorgehen lässt sich wie folgt zusammenfassen:

1. **Ausgangsspannungszustand:** Über eine FE-Analyse an einer auf Druck belasteten dickwandigen, mehrschichtigen Probe wurde für ausgewählte Punkte im Laminat die Schichtspannungen σ_2 , σ_3 ,τ_{23} , τ_{13} , τ_{12} bestimmt.
2. Für einen **Schnittwinkelbereich** von z.B. θ=35°...50° wird für jede Schnittebene der Spannungszustand: $\sigma_n(\theta)$, $\tau_{nt}(\theta)$, $\tau_{n1}(\theta)$ und die Anstrengung $A(\theta)$ berechnet. Der Re-Wert wurde mit 14MPa angenommen. Eine Variation des Re Wertes bewirkt eine quantitative Änderung des sich ergebenden Anstrengungswertes, aber nicht des kritischen Bruchwinkels.
3. **Ermittlung des Bruchwinkels:** Der Winkel, bei dem $Anstrengung$ ein Maximum annimmt, wird als gesuchter Bruchwinkel interpretiert. Die zugehörige Ebene stellt die am höchsten beanspruchte Bruchebene dar.

Um das wirkebenenbezogene Spannungskonzept zu erproben, wurde eine FE-Analyse einer auf Druck mit 12,8MPa belasteten dickwandigen, mehrschichtigen Papierprobe durchgeführt.

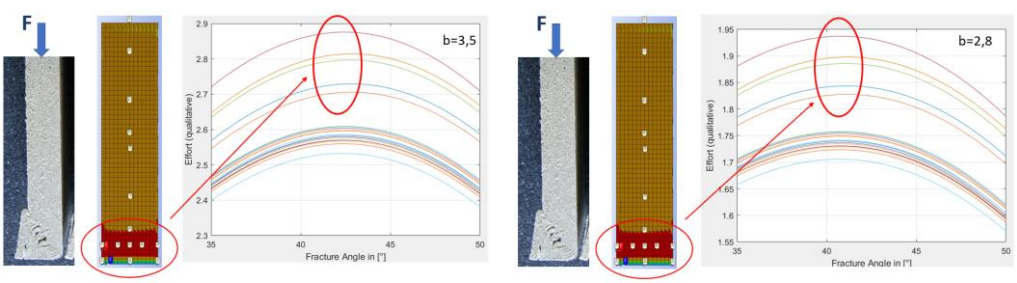


Abb. 3: Gewählte Punkte und dort mit b=3,5 und 2,8 ermittelte qualitative Anstrengung

Die Knoten an der Lasteinleitung wurden in Querrichtung fixiert um die verhinderte Querkontraktion an den Stauchplatten zu simulieren. Um den Einfluß der Lasteinleitung zu bewerten wurden im Einspannbereich aus zwei Ebenen und längs der Probe Punkte ausgewählt. Abbildung 3 zeigt die betrachteten Punkte und die sich an allen Punkten ergebenden Anstrengungen für alle Schnittebenen bei einem b von 3,5. Die Schnittebenen von 35° bis 50° haben für alle gewählten Punkte im FE Modell die qualitativ höchste Anstrengung. Es zeigt sich, dass die Anstrengungswerte im Bereich der Lasteinleitung größer sind als an den anderen Punkten, was erklärt, warum viele Proben im Bereich der Lasteinleitung versagen. Die mit allen oben genannten Unsicherheiten experimentell ermittelten Bruchwinkel lagen zwischen 38° und 41°. Nummerisch ergeben sich mit b=3,5 und einem flachen Verlauf die Schnittebenen mit der höchsten Anstrengung (Qualitativ) bei θ=42°..44°. Mit b=2,8 (Annahme einer 25% höheren Schubfestigkeit) liegen die Schnittebenen mit der höchsten Anstrengung (Qualitativ) in einem Winkelbereich von θ=38°..42°. Das macht

deutlich, dass die Schubfestigkeit für die Berechnung druckbelastetet dickwandiger Papierbauteile sehr wichtig ist.

2 ERSTES MATERIALMODELL BASIEREND AUF EIN FEDERMODELL

Eine Ursache für die experimentell ermittelte Längenabhängigkeit des E-Moduls kann durch das unsymmetrische Schichtknicken bzw. das Abgleiten erklärt werden. Das Schichtknicken führt im Schädigungsbereich zu einem Abgleiten und damit lokal zu einer reduzierten Steifigkeit C_f. Wird von einer Schädigung über die gesamte Querschnittfläche ausgegangen kann, wie in Abbildung 4 dargestellt die Gesamtsteifigkeit C_{res} der Probe durch eine Reihenschaltung der Federsteifigkeit des geschädigter Bereichs C_f mit der des ungeschädigten Bereichs C_{non} beschrieben werden.

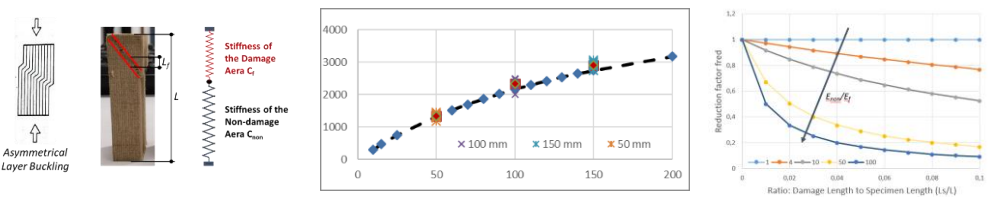


Abb. 4: Federansatz, Fitting-Kurve, Einflüsse auf den Reduktionsfaktor f_{red}

Die folgende Gleichung (2) beschreibt mit A für die Querschnittfläche, mit l_f für die Länge des geschädigten Bereichs und L-l_f als Länge des ungeschädigten Bereichs deren Steifigkeiten E_{non} ist hierbei das E-Modul des ungeschädigten Materials und E_f das des Geschädigten. Analog hierzu lässt sich mit A, l und E_{res} auch die resultierende Gesamtsteifigkeit berechnen. Die Gesamtsteifigkeit kann darüber hinaus auch als Reihenschaltung der in (2) angegebenen Federn berechnen.

$$C_f = \frac{E_f A}{l_f} \quad und \quad C_{non} = \frac{E_{non} A}{L - l_f} \quad und \quad C_{res} = \frac{E_{res} \cdot A}{L} = \frac{C_f \cdot C_{non}}{C_f + C_{non}} \tag{2}$$

Eingesetzt, ergibt sich für das E-Modul der Probe E_{res} der in Gleichung (3) dargestellte Zusammenhang. Dieser lässt sich als seine Funktion von L vereinfachen. Die Parameter a und b sind Fittingparameter die über Versuchsdaten bestimmt werden können. In Abbildung 4 sind die Versuchsergebnisse und die angepasste Fitting-Kurve dargestellt:

$$E_{res} = \frac{L \cdot E_{non}}{L + \left(\frac{E_{non}}{E_f} - 1 \right) L_f} = \frac{La}{L - b} = f_{red} \cdot E_{non} \tag{3}$$

Da sich die Messwerte durch die zwei Fittingparameter sehr gut abbilden lassen, zeigt sich, dass sich der Reihenschaltungsansatz sehr gut zur Erklärung der Längenabhängigkeit E-Moduls eignet. Aus Gleichung (2) kann mit f_{red} auch ein Reduktionsfaktor abgeleitet werden. Der Faktor (L_f/L) beschreibt darin die geometrische Größe der Schädigung bezogen auf die Gesamtlänge der Probe. Der Faktor (E_{non}/E_f) beschreibt die “Schwere” der Schädigung durch das Verhältnis von E-Modul des ungeschädigten Materials zu dem des Geschädigten.
In Abbildung 5 ist der Reduktionsfaktor f_{red} dargestellt. Mit einer Schadenslänge von l_f=1 bis 2mm und den untersuchten Probenlängen von 15 bis 150 mm ergeben sich für den Faktor (L_f/L) Werte zwischen 0,133 (kleine Proben) und 0,007 (lange Proben). Da wir die “Schwere der Schädigung” (Faktor: E_{non}/E_f) nicht kennen, haben wir sie von 1 bis 100 variiert. Aus Abbildung 4 (rechts) wird

deutlich warum gerade die kurzen Proben stärker streuen. Klein Unterschiede in der Schädigung (Faktor E_{non}/E_f) führen zu großen Änderungen des Reduktionsfaktors f_{red} und damit des gemessenen E-Moduls.

3 ZUSAMMENFASSUNG

Es wurden zahlreiche Druckversuche, an diesem Material durchgeführt. Bei den Versagensarten handelt es sich in allen Fällen um Stabilitätsversagen aufgrund von Druckbelastung. Die typische Versagensarten war hierbei asymmetrisches und in wenigen Einzelfällen auch symmetrisches Schichtenknicken. Wie gezeigt, ist die Scherfestigkeit ein wichtiger Parameter für das Versagen (asymmetrisches Schichtenknicken) des Papierlaminats unter Druck. Darüber hinaus weisen die ermittelten Druckmoduli, Festigkeiten, Versagensstellen, Versagensarten und Versagenswinkel mehr oder weniger starke Schwankungen auf. Die Schwankungen werden u.E. durch Unvollkommenheiten in der Struktur des Laminats und möglicherweise auch durch geringfügige Abweichungen an den ebenparallelen Oberflächen verursacht.
Unserer Meinung nach müssen die Schwankungen in den Ergebnissen für dieses Material jedoch als materialinhärent akzeptiert und daher bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Blechschmidt, J. (2013). *Papierverarbeitungstechnik, 1. Edition 17.* Münschen, Deutschland: Carl Hanser Verlag.

DIN EN ISO 604, 1. (2003). Kunststoffe - Bestimmung von Druckeigenschaften.

Issler, R. H. (1995). Festigkeitslehre - Grundlagen. Springer Verlag.

Kiziltoprak, N. (2022). *On the Bi-Axial In-Plane Behavior of Laminated Paperboard Components in Construction: A Representative Engineering Model.* Darmstadt: TUprints, Technische Universität Darmstadt.

Schmidt S., Büter. A. (2024). The Behavior of Paper Composites under Compressive Load. In P. o. (ECCM21). Nantes, Frankreich.

Schürmann, H. (2007). Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin: Springer Verlag.

Knaack U., Bach R. und Schabel S. (2023). *Bauen mit Papier: Architektur und Konstruktion - Kapitel 3: Halbzeuge und Komponenten.* Birkhäuser Verlag.

KONTAKT

Sandra Schmidt
sandra.schmidt@h-da.de
Prof. Dr-Ing. Andreas Büter
andreas.bueter@h-da.de
Mobil: 0049-15736231078
Fachbereich Maschinenbau und Kunststofftechnik (Prof. für funktionsintegrierten Leichtbau)
Hochschule Darmstadt hda
www.fbmk.h-da.de

DANKSAGUNG

Wir danken dem Land Hessen für die Förderung von LOEWE-BAMP! durch das der Grundstein für diese Arbeit legt wurde und das im Rahmen des Hessischen Hochschulpakts 2021–2025 weitere Arbeiten ermöglichte. Des Weiteren dürfen unsere Studierenden – Tawik, Alamoudi, Al Tabbaa, Khoder, Hitmy, Amouhou und viele andere – nicht unerwähnt bleiben, die diese Arbeit durch ihren Beitrag erst möglich gemacht haben.

Stand der Technik mobiler Aufbereitungsanlagen für Bau- und Abbruchabfälle in Österreich: Datenauswertung des EDM mit KI-basierten Methoden

Dominik Blasenbauer[1], Mariella Laure[1], Michael Scsepka[2] & Tobias Walk[2]
[1)] Technische Universität Wien (TU Wien), Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Wien, Österreich
[2)] Fraunhofer Austria Research GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Der Beitrag präsentiert erste Ergebnisse einer Stand-der-Technik-Erhebung zur mobilen Aufbereitung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle in Österreich. Ausgangspunkt ist die Analyse unstrukturierter Daten zu mobilen Aufbereitungsanlagen aus dem Elektronischen Datenmanagement (EDM). Mithilfe von Large Language Models (LLM) wurde versucht, Hersteller, Maschinentypen und Marktstrukturen automatisiert auszuwerten. Während grundlegende Zuordnungen gut gelangen, traten bei weiterführenden technischen Parametern erhebliche Ungenauigkeiten auf. Daher wird aktuell ein Retrieval-Augmented-Generation-Ansatz entwickelt, der künstliche Intelligenz (KI) mit geprüften Datenquellen kombiniert. Ziel ist eine die Ermöglichung einer effizienteren und zuverlässigeren Datenauswertung sowie die Schaffung einer Grundlage für regelmäßige künftige Marktanalysen.

1 EINLEITUNG

Die vorliegende Arbeit findet im Rahmen des BMIMI-Leitprojekts KRAISBAU statt und zeigt erste vorläufige Ergebnisse aus einer Stand-der-Technik-Erhebung zur mobilen Baurestmassenaufbereitung.

Im Jahr 2023 sind in Österreich rund 11 Mio. t Bau- und Abbruchabfälle angefallen, die nach Aushubmaterialien den zweitgrößten Abfallstrom darstellen. Davon wurden ca. 8 Mio. t in Anlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle mechanisch behandelt. Diese Behandlungsanlagen können sowohl stationär als auch mobil ausgeführt sein, wobei insgesamt 965 Anlagen zur Verfügung stehen (BMLUK, 2025).

1.1 Mobile Aufbereitungsanlagen

Mobile Aufbereitungsmaschinen spielen bei der Behandlung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle eine wichtige Rolle. Ihre Zahl wächst in Österreich seit Jahren langsam aber stetig; die Statusberichte zur Abfallwirtschaft in Österreich zeigen zwischen 2019 und 2023 einen Anstieg von 774 auf 791 registrierte Maschinen (BMK, 2024, 2023, 2021; BMLUK, 2025). Abb. 1:1 zeigt zwei typische Vertreter mobiler Aufbereitungsanlagen. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass ein Aufbereitungsaggregat wie ein Brecher oder ein Sieb auf einem durch Räder oder Raupen angetriebenen Rahmen montiert ist und somit flexibel am Arbeitsort bewegt werden kann. Die Maschinen sind zumeist so konzipiert, dass Anbauten wie Förderbänder eingeklappt werden können. Dadurch ergeben sich in der Regel kompakte Außenmaße und die Maschinen können mittels Tieflader transportiert werden. Technologisch sind mobile Anlagen weitgehend mit stationären Anlagen vergleichbar.

Trotz dieser Relevanz fehlen nach wie vor systematische Informationen zu Maschinenarten, Kapazitäten, Verbrauchsdaten sowie zur Marktstruktur. Abhilfe kann hier ein Blick ins Elektronische Datenmanagement (EDM) des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft (BMLUK) schaffen.


Abb. 1: Mobiler Prallbrecher (links) und mobiles Trommelsieb (rechts). Fotos: Dominik Blasenbauer, 2024.

1.2 Was ist das EDM?

Das EDM ist das zentrale Online-System, über das in Österreich abfallwirtschaftliche Daten wie Meldungen, Aufzeichnungen und Genehmigungen elektronisch erfasst, verwaltet und kontrolliert werden. Da die meisten mobilen Aufbereitungsanlagen nach der Mobile Anlagen-Verordnung (Republik Österreich, 2002a) und dem Abfallwirtschaftsgesetz (Republik Österreich, 2002b) genehmigungspflichtig sind, werden sie auch im EDM erfasst. Dort werden neben dem Betreiber der Anlage, dem Ort der Registrierung und einer Anlagenkennzahl auch relevante technische Details zu jeder mobilen Anlage wie Hersteller und Typ erfasst. Das Problem ist, dass diese Angaben unstrukturiert und in stark variierender Qualität vorliegen. Außerdem werden die Einträge von Nutzerinnen und Nutzern manuell eingepflegt, was zu zahlreichen fehlerhaften oder uneinheitlichen Angaben führt. Insgesamt liegen in der Datenbank fast 1.800 Einträge vor, sodass die Kombination aus großen, fehlerbehafteten und uneinheitlichen Datenmengen eine klassische manuelle Auswertung stark erschwert.

2 METHODEN

Der erste Ansatz zur automatisierten Auswertung war die Programmierung eines Python-Scripts, das mittels Application Programming Interface (API) auf Googles Large Language Model (LLM) Gemini zugreifen kann. Der Prompt enthielt die Anweisung, die gegebenen Daten aus dem EDM zu interpretieren, sie nach Hersteller und Typ zu sortieren, falsche Einträge zu korrigieren und zusätzlich Informationen zur Art der Maschine, zum Verbrauch, zur Antriebsart, zum Gewicht und zum stündlichen Durchsatz zu recherchieren. Dabei wurde Gemini mittels der sogenannten Temperatur, die ein Maß für die zulässige Kreativität eines LLMs darstellt, ein gewisser Spielraum eingeräumt. Damit lassen sich falsche Einträge in der EDM-Datenbank korrigieren.

Dieser erste Analyseversuch zeigte, dass Gemini solche unstrukturierten Eingaben erfolgreich entschlüsseln konnte. In den meisten Fällen konnten Hersteller und Maschinentyp korrekt zugeordnet werden. Gleichzeitig traten auch deutliche Herausforderungen zutage: Die vollständige Analyse dauerte rund 20 Stunden, und bei allen Informationen, die über Hersteller- und Typdaten hinausgingen, kam es zu typischen LLM-Halluzinationen. Angaben zu Durchsätzen, Verbräuchen oder weiteren Betriebsparametern waren daher nicht zuverlässig auswertbar.

Um diese Herausforderungen zu adressieren, wird ein Ansatz auf Basis der Retrieval-Augmented Generation (RAG) entwickelt. RAG verbindet LLMs mit externen, verlässlichen Datenquellen wie Datenbanken oder technischen Datenblättern, um präzisere und konsistente Ergebnisse zu erzielen und gleichzeitig die Verarbeitungsgeschwindigkeit zu erhöhen. Zudem soll das LLM künftig lokal auf einem Server von Fraunhofer Austria betrieben werden, was zu schnelleren Ergebnissen führen und andererseits datenschutztechnisch vorteilhafter sein soll.

Derzeit werden die zugrunde liegenden Datenquellen strukturiert. Darin stecken einerseits die manuelle Überarbeitung des EDM-Datensatzes und andererseits die Komplettierung der Datenbank auf Basis von Datenblättern. Außerdem wird das RAG-Modell aufgebaut und erste Tests damit durchgeführt.

3 RESULTATE

Da die manuelle Korrektur der Datenbank sehr aufwändig ist, liegen bisher nur vorläufige Ergebnisse vor, die jedenfalls noch Änderungen nach sich ziehen können. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass im Datensatz in 94 % der Fälle der Hersteller, in 93 % das Maschinen-Modell und in 94 % der Maschinentyp eruiert werden konnten. Mit diesem Wissen lassen sich erste Abschätzungen zur österreichischen Marktsituation der mobilen Aufbereitung von Baurestmassen treffen. Es zeigt sich, dass der österreichische Hersteller Rubble Master mit 39 % aller registrierten Maschinen klarer Marktführer ist, gefolgt von der belgischen Firma Keestrack (8,8 %) und der deutschen Firma Kleemann (8,6 %). Die restlichen knapp 40 % verteilen sich auf 59 verschiedene Maschinenhersteller.

Etwa 72 % der registrierten Anlagen sind den mobilen Zerkleinerungsmaschinen zuzuordnen, rund 22 % sind mobile Siebanlagen. Der Rest verteilt sich auf sonstige mobile Aufbereitungsmaschinen. Bei den Zerkleinerungsmaschinen dominieren Prallbrecher mit 47 % aller registrierter Maschinen, gefolgt von Backenbrechern (20 %) und Zweiwellenzerkleinerern (4,7 %), während Kegelbrechermit 0,44 % nur in geringer Zahl vertreten sind.

Zu weiteren Maschinenparametern wie Gewicht, Durchsatz, Motorleistung und Verbrauch lässt sich allenfalls nach dem derzeitigen Stand nur grob abschätzen, dass sich Brecher durchschnittlich in der Gewichtsklasse von 35 t befinden, einen Durchsatz von 270 t/h besitzen und dabei eine Motorleistung von 230 kW haben. Außerdem zeigen die bisherigen Daten, dass der weitaus größte Teil der Maschinen mit Diesel betrieben wird und elektrische Antriebe nur eine untergeordnete Rolle spielen dürften.

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Der Beitrag zeigt, wie die Stärken von LLMs auch für abfallwirtschaftliche Fragestellungen genutzt werden können, um aus großen, fehlerbehafteten Datenmengen, die bisher verborgen und ungenutzt waren, wertvolle Informationen zur mobilen Aufbereitungstechnik in Österreich zu gewinnen.

Gleichzeitig zeigte sich im Verlauf dieser Arbeit, dass LLMs ohne fundierte, vertrauenswürdige Datengrundlage dazu neigen, Dinge zu erfinden und dadurch noch fehlerbehaftetere und teilweise widersprüchliche Datensätze zurückzugeben.

Um vertrauenswürdige Auswertungen und Ergebnisse zu erreichen, ist daher ein Zusammenspiel menschlicher Intelligenz bei der Erstellung einer Datengrundlage mit den Stärken der künstlichen Intelligenz (KI) eine zielführende Herangehensweise.

Künftig soll die Datenbankabfrage aus dem EDM ebenfalls automatisiert werden, da sie derzeit über zahlreiche Schritte sehr ineffizient ist. Somit lassen sich in Zukunft jedes Jahr, z.B. für die Statusberichte zur Abfallwirtschaft in Österreich, aktuelle Informationen zur mobilen Bau- und Abbruchabfallbereitung automatisiert aus der Datenbank ausgeben.

5 DANKSAGUNG

Das BMIMI-Leitprojekt KRAISBAU ist gefördert durch das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) und abgewickelt durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Rahmen der Ausschreibung „Leitprojekt - Kreislaufführung von Baustoffen und Gebäudeteilen mit KI-Unterstützung“, Projektnummer 48302986.

LITERATURVERZEICHNIS

BMK, 2024. Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2024 für das Referenzjahr 2022. (en: Inventory of waste management in Austria. Status report 2024 for the reference year 2022.).

BMK, 2023. Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2023 für das Referenzjahr 2021. (en: Inventory of waste management in Austria. Status report 2023 for the reference year 2021.).

BMK, 2021. Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2021 für das Referenzjahr 2019. (en: Inventory of waste management in Austria. Status report 2021 for the reference year 2019.).

BMLUK, 2025. Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2025 für das Referenzjahr 2023. (en: Inventory of waste management in Austria. Status report 2025 for the reference year 2023.).

Republik Österreich, 2002a. Mobile Anlagen-Verordnung. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über mobile Anlagen zur Behandlung von Abfällen.

Republik Österreich, 2002b. Abfallwirtschaftsgesetz 2002 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 09.11.2023.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Dr.techn. Dominik Blasenbauer
dominik.blasenbauer@tuwien.ac.at
+43 1 58801 740028
Post-Doc Projektassistent am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften
Technische Universität Wien
https://www.tuwien.at/tch/icebe

AVAW_CV-Waste: Annotationstool für Computer Vision in der Abfallwirtschaftsforschung

Bojan Lorber[1], Gerald Koinig[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Montanuniversität, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: AVAW_CV-Waste ist eine kostenlose und frei zugängliche Offline-Desktopanwendung zum Erstellen und Korrigieren von Bildannotationen, die für das Training von Objekterkennungsmodellen verwendet werden. Die Software ermöglicht es, Begrenzungsrahmen (Bounding Boxes) um Objekte in Bildern zu zeichnen, zu bearbeiten, zu verschieben, in ihrer Größe zu verändern, zu kopieren und zu verwalten. Sie erzeugt Ausgaben, die mit YOLO-basierten Workflows der künstlichen Intelligenz kompatibel sind, insbesondere im YOLO-PyTorch-TXT-Annotationsformat, das häufig von YOLO11, YOLOv8, YOLOv5 und verwandten Computer-Vision-Modellen verwendet wird.
CV-Waste unterstützt die Einbindung bestehender YOLO-Modelle zur halbautomatischen Erzeugung von Annotationen und verringert dadurch den manuellen Aufwand bei der Datensatzvorbereitung. Die Unterstützung kann für vollständige Bilder oder in einem One-Click-Verfahren genutzt werden. Die Nutzer:innen klicken auf ein Objekt, woraufhin das aktuell geladene Modell versucht, einen passenden Begrenzungsrahmen um das ausgewählte Objekt zu legen. Die Anwendung wurde speziell für Forschung in den Bereichen Abfallwirtschaft, Recycling und Materialsortierung entwickelt, in denen Datensätze häufig stark domänenspezifische Objektklassen enthalten und sich mit generischen oder cloudbasierten Annotationsplattformen nur eingeschränkt bearbeiten lassen. Da die Software vollständig offline arbeitet, kann sie direkt in Industrieanlagen oder an Forschungsstandorten eingesetzt werden, an denen der Internetzugang eingeschränkt ist oder fehlt. Die lokale Verarbeitung gewährleistet zusätzlich Datensouveränität, eine wichtige Voraussetzung für industrielle Forschungskooperationen mit sensiblen Betriebsdaten.
Das Hauptziel von AVAW_CV-Waste besteht darin, die Datensatzerstellung für nicht spezialisierte Nutzer:innen, darunter Studierende, Laborpersonal, Beschäftigte in Recyclingbetrieben und industrielle Forschungspartner, zu vereinfachen und zu beschleunigen. Durch die Verringerung der technischen Komplexität von Annotationsworkflows unterstützt die Software die Entwicklung maßgeschneiderter Machine-Learning-Modelle für Anwendungen wie Abfallklassifizierung, Störstofferkennung, Schrottsortierung und sensorbasierte Recyclingforschung.

1 BEDARF UND MOTIVATION

CV-Waste wurde als kostenlose und frei zugängliche Alternative entwickelt, die an Arbeitsabläufe in der Abfallwirtschafts- und Recyclingforschung angepasst werden kann.

Derzeit existieren kommerzielle cloudbasierte Dienste, die serverseitige automatisierte Annotationen mithilfe vorhandener vortrainierter Modelle anbieten. Solche Funktionen sind jedoch häufig an kostenpflichtige Abonnements gebunden und auf die Modelle beschränkt, die von der jeweiligen Plattform unterstützt werden. Folgend können Forschende ihre eigenen, speziell für die Abfallwirtschaft vortrainierten Modelle nicht zur Unterstützung der Annotation einsetzen. Da viele bestehende Werkzeuge cloudbasiert sind, ist zudem die Datensouveränität nicht immer gewährleistet. Dies ist im Allgemeinen bei der Zusammenarbeit mit Industriepartnern, jedoch besonders mit Partnern aus der Abfallwirtschaft, zunehmend kritisch. Anforderungen an die Datensouveränität können den Einsatz kommerzieller cloudbasierter Alternativen vollständig ausschließen.

CV-Waste ermöglicht es, eigene Annotationsklassen zu definieren, eigene Modelle für automatische Vorhersagen zu laden und zu verwenden sowie vollständig offline ohne Cloud-Dienste zu arbeiten.

Im Vergleich zu anderen Open-Source-Alternativen adressiert CV-Waste einen praktischen Bedarf. Ziel ist nicht die Bereitstellung eines programmierbaren Annotations-Grundgerüstes, sondern einer unmittelbar einsetzbaren, domänenspezifischen Desktop Applikation für YOLO-basierte Annotationsabläufe in der Abfallwirtschaftsforschung. CV-Waste richtet sich an wissenschaftliche Hilfskräfte, Studierende, Laborpersonal und Industriepartner, die möglicherweise keine Programmiererfahrung besitzen, aber dennoch hochwertige Annotationen effizient erstellen, prüfen und korrigieren müssen. In diesem Sinne richtet sich das Programm von Epifânio et al. (2022), ein Framework zum Erstellen von Annotationswerkzeugen, an Entwickler:innen, die ihr Programm selbst aufbauen oder anpassen möchten, während AVAW_CV-Waste nicht programmierende Anwender:innen unterstützt, die eine ausgereifte, zugängliche und forschungsgeeignete Annotationsumgebung benötigen.

Ein weiterer Vergleich kann mit AddaxAI gezogen werden, einer primär nicht programmierbaren Plattform zum Training und zur Bereitstellung von YOLOv5-Objekterkennungsmodellen (van Lunteren, 2023). CV-Waste konzentriert sich dagegen speziell auf das Erstellen, Prüfen und Korrigieren YOLO-kompatibler Bounding-Box-Annotationen für Abfall- und Recyclingdatensätze. Diese Datensätze können anschließend zum Trainieren der meisten Objektklassifikationsnetze verwendet werden, darunter YOLO26- und RT-DETR-Modelle.

Weitere Alternativen verfolgen wiederum andere Anwendungsziele. SAMBA zielt auf semantische Segmentierung statt auf Objekterkennung mit Begrenzungsrahmen ab, während LaMa und occupationMeasurement für die Kennzeichnung beziehungsweise Codierung textbasierter qualitativer Daten und Umfragedaten vorgesehen sind (Docherty et al., 2024; Bogachenkova et al., 2023; Simson et al., 2023).

CV-Waste stellt somit eine spezialisierte, rechenleistungsarme, offline nutzbare und forschungsorientierte grafische Benutzeroberfläche für Bounding-Box-Annotationen in Anwendungen der Abfallwirtschaft bereit und schließt damit eine bestehende Lücke.

2 STAND DER FORSCHUNG UND TECHNIK

Der Einsatz von Objektklassifikationsmodellen wie YOLO (You Only Look Once) oder RT-DETR (Real-Time Detection Transformer) zur Klassifizierung von Abfallpartikeln ist ein noch junges und dynamisch wachsendes Forschungsfeld. Kostengünstige Sensortechniken, beispielsweise RGB-Kameras, gewinnen zunehmend an Bedeutung, seit erschwingliche Standardhardware, auf der diese Modelle auch in realen Einsatzszenarien ausgeführt werden können, zur Verfügung steht. Entsprechende Systeme werden immer häufiger zur Vorsortierung von Abfallströmen eingesetzt, bevor materialanalytisch präzisere Verfahren wie LIBS (laserinduzierte Plasmaspektroskopie), XRF (Röntgenfluoreszenzanalyse) oder XRT (Röntgentransmission) zum Einsatz kommen. Das Training von Modellen zur Abfallklassifizierung erfordert jedoch umfangreiche, vielfältige und sorgfältig annotierte Datensätze, die die zu erwartende Arbeitsumgebung realistisch abbilden. Beispiele hierfür sind verformte, heterogene und verunreinigte Partikel auf einem Förderband. Bestehende Datensätze können deshalb häufig nicht unmittelbar zum Training solcher Modelle verwendet werden. Gleichzeitig werden Objektklassifikationsmodelle zunehmend zur Sortierung hochspezifischer Objektklassen eingesetzt, etwa von Kunststoffen, Papier, Schrott, gefährlichen Abfällen oder gemischten Abfallfraktionen.

Diese Sortieraufgaben wurden bis vor Kurzem überwiegend manuell durchgeführt. Die starke Abhängigkeit von manueller Sortierung ist ein weiterer Antrieb für den Einsatz von Objektklassifikationsmodellen in der Abfallwirtschaft, da es für Betreiber von Materialrückgewinnungsanlagen zunehmend schwieriger wird, Personal zu gewinnen und langfristig zu halten. Darüber hinaus lässt sich die manuelle Sortierung nicht in wirtschaftlich vertretbarer Weise auf die wachsenden Mengen der Abfallströme skalieren. Große Akteure investieren daher bereits in Forschungsprojekte zur Anwendung von Objektdetektoren für die Abfallsortierung. Dazu gehören Leitprojekte wie StraTex und Scarpa mit Schwerpunkt auf Textil- und Schuhabfällen, KiRAMET zur Erforschung der Schrottrückgewinnung für die klimaneutrale Transformation der Stahlproduktion sowie greenPLAST-Food zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft für Leichtverpackungsabfälle, die derzeit Tier- und Umwelt belasten. Alle diese Projekte benötigen umfangreiche Datensätze zum Trainieren ihrer Modelle und setzen CV-Waste zu deren Erstellung ein.

3 SOFTWAREDESIGN

Generative künstliche Intelligenzen können die anfängliche Entwicklung einer solchen Software heute zwar beschleunigen, umfangreiche Tests in realen Forschungsumgebungen bleiben jedoch unverzichtbar. Insbesondere kann die Bewertung der Applikation durch Forschende mit unterschiedlichen technischen Vorkenntnissen nicht sinnvoll an generative KI-Systeme ausgelagert werden.

Die Benutzeroberfläche und Nutzererfahrung dieser Applikation wurden deshalb über mehrere Jahre und in mehreren Forschungsprojekten dieses noch jungen Bereichs der Abfallwirtschaftsforschung kontinuierlich überarbeitet und verbessert. Dadurch konnten Kritik und Rückmeldungen von Studierenden aus Lehrveranstaltungen ebenso berücksichtigt werden wie Erfahrungen von Forschenden und Beschäftigten, die mit diesem Werkzeug Zehntausende Bilder annotiert haben. Die fortlaufende Nutzung und die sich verändernden Anforderungen der Forschungsprojekte, insbesondere bei abfallwirtschaftlichen Sortieraufgaben, werden zwangsläufig weitere Möglichkeiten zur Optimierung und Anpassung aufzeigen. Die Verwendung von Python, dem weit verbreiteten GUI-Framework Tkinter und einer objektorientierten Softwarearchitektur soll eine unkomplizierte Anpassung und Erweiterung durch Forschende aus den Bereichen Abfallwirtschaft und Recycling ermöglichen.

Um Einfachheit und Zugänglichkeit zu erhalten, verzichtet die Software bewusst auf zusätzliche Implementierungskomplexität, etwa durch Multithreading oder Multitasking, obwohl solche Ansätze die Reaktionsfähigkeit der Anwendung möglicherweise verbessern könnten. Da Python in der Forschung zu maschinellem Lernen und Computer Vision bereits weit verbreitet ist, lässt sich AVAW_CV-Waste ohne viel Mühe in bestehende wissenschaftliche Arbeitsabläufe integrieren. Mehrere Designentscheidungen wurden als bewusste Abwägungen getroffen, um eine breite Hardwarekompatibilität und einen stabilen Betrieb auch auf weniger leistungsfähigen Forschungsrechnern zu gewährleisten und zugleich die von einem solchen Werkzeug erwarteten Komfortfunktionen bereitzustellen. Eine ressourcenschonende Darstellung und vereinfachte Interaktionsabläufe wurden gegenüber rechenintensiven Visualisierungsfunktionen priorisiert. Obwohl die standardmäßige Python-Umgebung in erster Linie für CPU-basierte Inferenz ausgelegt ist, ermöglichen die zugrunde liegenden Inferenzmodule fortgeschrittenen Nutzer:innen mit nur geringfügigen Änderungen am Installationsablauf auch die Verwendung vorhandener GPU-Ressourcen.

CV-Waste wurde gezielt für Bounding-Box-Annotationen entwickelt. Diese Annotationsform eignet sich besonders für Anwendungen in der Abfallwirtschaft, da sie schneller als segmentierungsbasierte Annotationen erstellt werden kann und im späteren Einsatz weniger Rechenleistung erfordert. Übliche Ausschleusmechanismen wie Hochdruckdüsenleisten oder Ausschleus-

klappen verfügen zudem nicht über die räumliche Auflösung und Geschwindigkeit, um den zusätzlichen Lokalisierungsdetailgrad von Segmentierungsmasken praktisch zu nutzen.

4 FORSCHUNGSWIRKUNG

AVAW_CV-Waste wurde bereits erfolgreich bei der Entwicklung wissenschaftlicher Datensätze und in Forschungsarbeiten zur Erkennung, Klassifizierung und zum Recycling von Abfällen eingesetzt.

AVAW_CV-Waste adressiert einen zentralen Engpass bei der Entwicklung von Computer-Vision-Systemen für die Abfallwirtschafts- und Recyclingforschung: die Erstellung annotierter Trainingsdatensätze.

AVAW_CV-Waste wird derzeit in mehreren Leitprojekten zu Recycling und Kreislaufwirtschaft eingesetzt, darunter KiRAMET, StraTex, greenPLAST-food und Scarpa.

In diesen Projekten wurde die Software in Forschungsabläufen mit Post-Consumer-Textilien, Leichtverpackungsabfällen und Post-Shredder-Schrott eingesetzt, bei denen große Mengen annotierter Bilddaten für das Training und die Bewertung von Objekterkennungsmodellen erforderlich sind.

Mit AVAW_CV-Waste erstellte Datensätze trugen zur Forschung über die sensorbasierte Sortierung von geschredderten Altmetallen für eine grüne Stahlproduktion (Koinig et al., 2026a), KI-gestützte Recyclingabläufe für Metallverbundabfallströme (Koinig & Tischberger-Aldrian, 2026; Koinig et al., 2026b) sowie Kunststoffrecyclingsysteme für Materialien mit Lebensmittelkontakt (Schneiderbeck et al., 2026) bei.

Die erzeugten Datensätze unterstützten außerdem Forschungsarbeiten zur robusten YOLO-basierten Ausschleusung kupferhaltiger Partikel aus stark korrodierten Schrottströmen (Koiniget al., 2026), zur Erkennung kupferhaltigen Schrotts in Post-Shredder-Fraktionen mittels maschineller Bildverarbeitung und künstlicher Intelligenz (Koinig et al., 2026d) sowie zu Deep-Learning-Ansätzen für die Klassifizierung kupferhaltigen Metallschrotts in Recyclingprozessen (Koinig et al., 2024).

Diese Anwendungen belegen den Nutzen der Software für die Verringerung des manuellen Annotationsaufwands und für den Einsatz von Machine-Learning-Methoden bei heterogenen Abfallsortieraufgaben.

5 ERKLÄRUNG ZUR NUTZUNG KÜNSTLICHER INTELLIGENZ

Generative künstliche Intelligenzen wurden weder für den Architekturentwurf noch für die zentrale Softwareimplementierung von AVAW_CV-Waste verwendet.

ChatGPT (OpenAI) wurde während der Softwareentwicklung zur Unterstützung der Dokumentation, zur Erstellung von Docstrings, bei der Fehlerbehebung und für vereinzelte Änderungen direkt im Code eingesetzt. Für dieses Manuskript wurden generative KI-Werkzeuge ausschließlich zur sprachlichen Überarbeitung verwendet.

Sämtliche generierten Inhalte und Codeänderungen wurden von den Autoren manuell geprüft und validiert.

6 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Erstellung hochwertig annotierter Bilddatensätze stellt weiterhin einen wesentlichen Engpass bei der Entwicklung von Computer-Vision-Systemen für die Abfallwirtschaft dar. Insbesondere bei heterogenen, verformten, verschmutzten oder teilweise verdeckten Materialien sind allgemeine Datensätze und generische Annotationsplattformen häufig nur eingeschränkt nutzbar. AVAW_CV-Waste adressiert diese Herausforderung durch eine unmittelbar einsetzbare, offlinefähige und rechenleistungsarme Benutzeroberfläche.

Die Kombination aus manueller Annotation, modellgestützter Vorhersage und lokaler Datenverarbeitung ermöglicht eine effiziente und zugleich kontrollierbare Erstellung projektspezifischer Trainingsdaten. Die Unterstützung eigener Objekterkennungsmodelle erlaubt es, bestehendes Fachwissen und bereits trainierte Modelle direkt in den Annotationsprozess einzubinden. Dadurch kann der manuelle Arbeitsaufwand reduziert werden, ohne die notwendige Qualitätskontrolle durch die anwendenden Personen einzuschränken.

Der Einsatz der Software in mehreren wegweisenden Forschungsprojekten zeigt, dass AVAW_CV-Waste für unterschiedliche Materialströme und Sortieraufgaben geeignet ist. Die Anwendung trägt damit zur Entwicklung robuster Objekterkennungsmodelle und zur weiteren Automatisierung von Recycling- und Sortierprozessen bei.

Zukünftige Weiterentwicklungen können insbesondere die Leistungsfähigkeit der automatischen Annotation, die Bedienbarkeit bei sehr großen Datensätzen sowie die Unterstützung zusätzlicher Modellarchitekturen betreffen. Aufgrund der quelloffenen und modularen Umsetzung kann die Software an neue Forschungsfragen und technologische Entwicklungen angepasst werden. AVAW_CV-Waste stellt somit ein praxisnahes Werkzeug zur Verfügung, das die Erstellung hochwertiger Datensätze erleichtert und die Anwendung künstlicher Intelligenz in der Abfallwirtschaft und Kreislaufwirtschaft unterstützt.

7 DANKSAGUNG

Diese Arbeit entstand im Rahmen der Forschungsprojekte KiRAMET und greenPLAST-food.
Die Projekte „KiRAMET KI-based Recycling of Metal Compound Waste“ (Projektnummer FO999899661) und „greenPLAST-food - Green Plastic Recycling Factory for Food Contact Materials“ (Projektnummer 5135363) werden von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und dem Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

Bogachenkova, V., Martins, E. C., Jansen, J., Olteniceanu, A.-M., Henkemans, B., Lavin, C., Nguyen, L., Bradley, T., Fürst, V., Muctadir, H. M., van den Brand, M., Cleophas, L., & Serebrenik, A. (2023). LaMa: a thematic labelling web application. *Journal of Open Source Software, 8*(85), 5135. https://doi.org/10.21105/joss.05135

Docherty, R., Squires, I., Vamvakeros, A., & Cooper, S. J. (2024). SAMBA: A Trainable Segmentation Web-App with Smart Labelling. *Journal of Open Source Software, 9*(98), 6159. https://doi.org/10.21105/joss.06159

Epifânio, Í., Pysarenko, O., & Bayer, I. (2022). Ipyannotator: the infinitely hackable annotation framework. *Journal of Open Source Software, 7*(76), 4480. https://doi.org/10.21105/joss.04480

Koinig, G., Aberger, J., Kuhn, N., & Tischberger-Aldrian, A. (2026a). AI Pipeline for sensor-based sorting of shredder scrap towards green steel production. In *11th Sensor-Based Sorting & Control 2026*, Aachen, 17.–18. März 2026.

Koinig, G., Aberger, J., Lorber, B., Kuhn, N., Martinelli, W., Radmann, Y., & Tischberger-Aldrian, A. (2026c). Robust YOLO-Based Ejection of Copper-Containing Particles in Heavily Corroded Scrap Towards Green-Steel Production. *Processes, 14*(5), 746. https://doi.org/10.3390/pr14050746

Koinig, G., Aberger, J., & Tischberger-Aldrian, A. (2026b). KiRAMET: KI Basiertes Recycling von Metallverbund-Abfällen. In *Österreichische Abfallwirtschaftstagung 2026: Book of Abstracts* (S. 29), Wien-Flughafen, 25.–27. März 2026.

Koinig, G., Kuhn, N. E., Fink, T., Lorber, B., Radmann, Y., Martinelli, W., Aberger, J., Grath, E., & Tischberger-Aldrian, A. (2026d). Detection of copper-containing scrap in a post-shredder fraction with machine vision and artificial intelligence towards green-steel production. *Cleaner Engineering and Technology, 30*, 101110. https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101110

Koinig, G., Kuhn, N. E., Fink, T., Lorber, B., Radmann, Y., Martinelli, W., & Tischberger-Aldrian, A. (2024). Deep learning approaches for classification of copper-containing metal scrap in recycling processes. *Waste Management, 190*, 520–530. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.10.022

Koinig, G., & Tischberger-Aldrian, A. (2026). Kiramet: KI-basierte Konditionierung von Schredderschrott – für grüneren Stahl. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 78*, 196–199. https://doi.org/10.1007/s00506-026-01201-y

Schneiderbeck, M., Koinig, G., Aberger, J., & Tischberger-Aldrian, A. (2026). GreenPLAST-food: Grüne Kunststoffrecyclingfabrik für Lebensmittelkontaktmaterialien. In *Österreichische Abfallwirtschaftstagung 2026: Book of Abstracts* (S. 31), Wien-Flughafen, 25.–27. März 2026.

Simson, J., Kononykhina, O., & Schierholz, M. (2023). occupationMeasurement: A Comprehensive Toolbox for Interactive Occupation Coding in Surveys. *Journal of Open Source Software, 8*(88), 5505. https://doi.org/10.21105/joss.05505

van Lunteren, P. (2023). AddaxAI: A no-code platform to train and deploy custom YOLOv5 object detection models. *Journal of Open Source Software, 8*(88), 5581. https://doi.org/10.21105/joss.05581

To store, or not to store? A qualitative recyclability assessment

Romana Kopecká[1], Marlies Hrad[1] & Marion Huber-Humer[1]
[1)] BOKU University, Department of Landscape, Water and Infrastructure, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

ABSTRACT: Society needs to strive for circularity to ensure that natural resources are used efficiently and that the maximum feasible share of extracted materials remains in material loops as long as practicable. Despite numerous European Union initiatives, circularity rates remain low, indicating a linear economy. This study extends the authors' previous work on Temporary Material Hubs (TMHs) (Kopecká et al., 2026) by addressing practical questions, i.e., how to assess the suitability of materials and waste streams for TMHs. The research begins with a systematic literature review and uses the European Commission's criticality methodology as well as publicly available data on waste streams and resources, e.g., phosphate rock and phosphorus. The study is ongoing, therefore, complete results and the finalized framework for recyclability assessment will be presented at a later stage. These outcomes will further contribute to efforts to enhance circularity and support a sustainable future.

1 INTRODUCTION

The European policy framework, including the New Circular Economy Action Plan, the amended Waste Framework Directive and the Landfill Directive, aims to reduce disposal and increase waste recycling. Yet circularity rates remain low: 7.2% on a global scale and 11.5% in Europe (European Environment Agency, 2024; Fraser et al., 2024). Meanwhile, material and product consumption continues to rise (Fraser et al., 2024), and 3.78 billion tonnes of municipal solid waste per year are projected by 2050 under a business-as-usual scenario (United Nations Environment Programme, 2024). Enhancing circularity is therefore the main motivation of this work.

A novel conceptual framework introduces Temporary Material Hubs (TMHs), addresses premature disposal, and emphasizes the importance of final sinks for maintaining clean material cycles (Kopecká et al., 2026). While the theoretical groundwork has been laid, TMHs require further investigation before real-world implementation. A priority is a recyclability assessment using indicators that 1) identify materials and waste streams that could benefit from TMHs and 2) evaluate their suitability for storage in TMHs through quantitative analysis.

The study aims to develop an accessible, user-friendly framework that informs its users about a given material or waste stream and its relevance and technical suitability for temporary storage and postponed recycling.

2 METHODOLOGY

2.1 Systematic literature research

A systematic literature review (SLR) was conducted to identify recyclability indicators in the literature and to map definitions of recyclability in prior studies. The review, carried out in September and October 2025, followed a simplified PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) approach and checklist (Page, 2021). The Scopus and Web of Science databases were searched without restrictions on publication type. Inclusion criteria covered studies related to solid waste management and material recovery for specific products or materials, with a primary focus on recyclability and its indicators. Exclusion criteria removed studies centred on catalysts, chemistry, or medical/clinical topics. Only English-language publications

from 2019 onward were considered to ensure up-to-dateness. The search strings used were:

Scopus: TITLE-ABS-KEY ((recyclab*) AND (indicator*) AND (material* OR waste*)) AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"));
Web of Science: (TS=(recyclab* AND indicator* AND (material* OR waste*))) AND LA=(English).
Initially, 299 studies in Scopus and 183 in Web of Science were identified as potentially relevant. After removing duplicates and non-relevant records, and adding studies identified via snowballing, 24 studies were deemed relevant and are planned for inclusion.

2.2 Recyclability assessment

The initial recyclability assessment in this study builds on the framework developed by van Nielen et al. (2022) which assessed the recyclability of minor metals. Unlike van Nielen et al. (2022) that focused on value chain stages, we decided to organize the recyclability indicators into "recycling pillars" which were introduced in the previous study (Kopecká et al., 2026). The recycling pillars are as follows: (1) environmental and health protection, (2) adequate recycling technologies, and (3) economic feasibility/market; and an overarching legislation. Clustering indicators into these recycling pillars helps identify which pillar currently presents the systematic bottleneck to feasible recycling. This, in turn, enables stakeholders to decide whether TMHs or final sinks are the appropriate solutions for specific materials/wastes.

An internal workshop was organized to cluster recyclability indicators into the recycling pillars (clustering workshop). Five experts from the Institute of Waste Management and Circularity, including the authors, were involved in the clustering. One of the key conclusions was that "criticality" is an important factor in determining whether a material/waste should be stored for postponed recycling and can be considered an indicator on its own. The experts recommended that criticality should be included in the framework.

2.3 Criticality assessment

According to the European Commission (EC) methodology, criticality assessment comprises two components: *economic importance* and *supply risk* (SR). This methodology is based on the Critical Raw Materials Act (European Parliament and the Council, 2024). For this study, SR is more relevant because its calculation includes the End-of-Life Recycling Input Rate (EoL-RIR), which could potentially be influenced through the use of TMHs. The SR is calculated as follows (Eq. 1):

$$SR = \left[\left(HHI_{\mathrm{WGI,t}}\right)_{\mathrm{GS}} \cdot \frac{IR}{2} + \left(HHI_{\mathrm{WGI,t}}\right)_{\mathrm{EUsourcing}} \left(1 - \frac{IR}{2}\right)\right] \cdot (1 - EoL_{RIR}) \cdot SI_{SR} \quad (1)$$

Eq. 1 Calculation of SR according to the revised Methodology for establishing the EU list of Critical Raw Materials (CRM) (European Commission, 2017)

$SR_{CRM} \geq 1$; $SR \in [0;10]$; HHI: Herfindhal-Hirschmann Index; WGI: Worldwide Governance Indicators; t: trade adjustment; IR: Import Reliance; EoL-RIR: End-of-Life Recycling Input Rate; SI_{SR}: Substitution Index in Supply Risk (European Parliament and the Council, 2024)

3 INTERIM RESULTS AND OUTLOOK

3.1 Systematic literature review and recyclability assessment

The clustering workshop began with 100 recyclability indicators, some were added during the process and others were removed. The final set consisted of 105 indicators (incl. 15 marked for exclusion). One indicator was marked as on the border between Environmental and health protection and Legislation. Four indicators were deemed too broad to assign to a single recycling pillar and were grouped as “Various, overarching,” such as the “Fitness for closed-loop material recycling” (Hummen & Sudheshwar, 2023). Five indicators were added to the set, such as “Content of critical raw materials in the waste stream”, or “CAPEX” (Capital expenditure). For example, "Labor rights indicator" (van Nielen et al, 2022) was excluded for its lack of relevance for our purpose. The final set of indicators is too broad and, therefore, must be reduced to the most important and relevant ones that can be used in the framework. The expected number of recyclability indicators used in the framework is 10-15. Fig. 1 shows the allocation of indicators to the recycling pillars. The results indicate that most indicators relate to the availability of adequate recycling technologies.

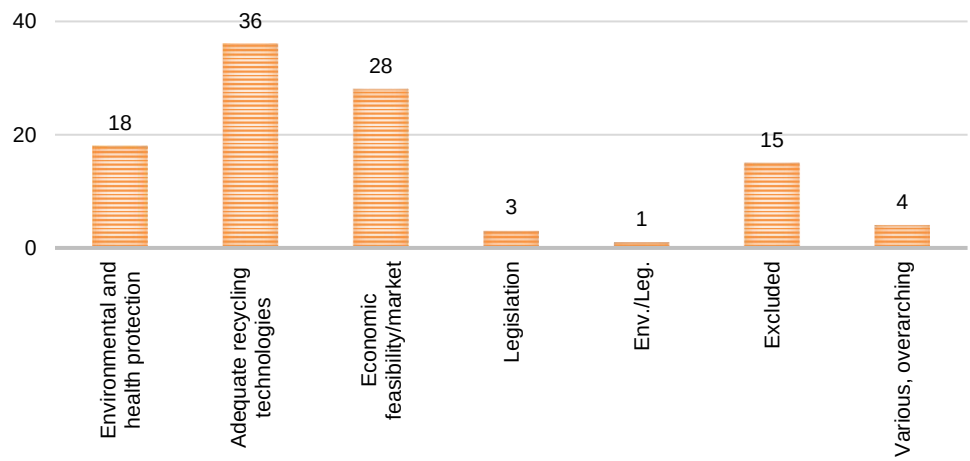


Fig. 1: Results of the clustering workshop

3.2 Criticality assessment

One of the materials suggested for TMHs is incineration residues, particularly sewage sludge incineration ashes, which contain elevated phosphorus concentrations that could be recovered. However, current technologies do not allow feasible recovery at scale.

A study by Daw (2025) was used as a blueprint for the calculation of criticality (SR). While the study by Daw (2025) used lithium as a case-study, the authors calculated SR for phosphate rock. The results confirm that phosphate rock qualifies as a CRM, which is aligned with the EC findings. A sensitivity analysis revealed that the Substitution Index and EoL-RIR have the strongest influence on SR. According to our calculations, a 20% increase in EoL-RIR would reduce SR below the criticality threshold, see Tab. 1. This is aligned with the goal of recycling 25% of EU’s annual material consumption by 2030 according to the Critical Raw Materials Act (European Parliament and the Council, 2024). Currently, the $EoL\text{-}RIR_{phosphate\ rock}$ is 0% (European Commission, 2023).

Tab. 1. $SR_{phosphate\ rock}$ in various settings

Current state	SR criticality threshold	Increase of EoL-$RIR_{phosphate\ rock}$ by 20%
$SR_{phosphate\ rock}$ = 1.20 (own calculations)	**SR ≥ 1.00** (European Parliament and the Council, 2024)	**$SR_{phosphate\ rock}$ = 0.96** (own calculations)

As the study is ongoing, further results and conclusions will be reported in subsequent stages after the proceedings submission deadline. The next stages include, for example, calculation of the costs related to prospective storage of sewage sludge incineration ashes and a consequent recovery.

The goal of this study is to develop a decision-support tool that assesses whether TMHs should be employed or if final sinks are the preferred option, based on the characteristics of materials/waste that affect recyclability. In addition, criticality will be used as an essential factor in determining whether TMHs should be applied.

REFERENCES

Daw, G. (2025). Revising the 'Economic importance' dimension: The European framework for critical raw materials, completed and illustrated using lithium. Resources Policy, 105453.

European Commission. (2017). Methodology for establishing the EU list of Critical Raw Materials. Brussels: European Commission. doi:10.2873/769526

European Commission. (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU. Brussels: European Commission. doi:10.2873/12230

European Environment Agency. (2024). Now is the time to accelerate the shift to a more circular Europe. Retrieved from European Environment Agency: https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/now-is-the-time-to

European Parliament and the Council. (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. Retrieved from http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj

Fraser, M., Conde, Á., & Laxmi, H. (2024). The Circularity Gap Report. Retrieved from https://www.circularity-gap.world/2024#download

Hummen, T., & Sudheshwar, A. (2023). Fitness of product and service design for closed-loop material recycling: A framework and indicator. doi:10.1016/j.resconrec.2022.106661

Kopecká, R., Hrad, M., & Huber-Humer, M. (2026). Temporary Material Hubs to enhance circular economy: A conceptual framework. Detritus. doi:10.31025/2611-4135/2026.19563

Page. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, n71. doi:10.1136/bmj.n71

United Nations Environment Programme. (2024). Global Waste Management Outlook 2024. UNEP. Retrieved from https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024

van Nielen, Kleijn, Sprecher, Xicotencatl, & Tukker. (2022). Early-stage assessment of minor metal recyclability. RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING. doi:10.1016/j.resconrec.2021.105881

CONTACT

Romana Kopecká
romana.kopecka@boku.ac.at
Institute of Waste Management and Circularity
BOKU University
https://boku.ac.at/lawi/abfk

Lithiumgewinnung aus hochmineralisierten Solen der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja als alternative Quelle kritischer Rohstoffe

Olga Ulanova
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk region, Irkutsk, Russland

KURZFASSUNG: In der vorliegenden Arbeit werden hochmineralisierte calciumchloridreiche Solen der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja (Republik Sacha (Jakutien)) hinsichtlich ihres Potenzials als hydromineralische Lithiumressource untersucht. Die Untersuchungen umfassen die chemische Charakterisierung der Solen mittels ICP-OES sowie Sorptionsversuche unter statischen und dynamischen Bedingungen. Analysiert wurden die Sorptionskinetik, die Sorptionskapazität sowie Selektivitäts- und Verteilungskoeffizienten verschiedener Kationenaustauscher. Darüber hinaus wurden die Desorption von Lithium und die optimalen Elutionsbedingungen für seine selektive Rückgewinnung untersucht. Auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse erfolgt eine rohstoffwirtschaftliche Bewertung hochmineralisierter calciumchloridreicher Solen der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja als potenzielle hydromineralische Lithiumressource. Abschließend wird die Anwendbarkeit ionenaustauschbasierter Verfahren zur selektiven Lithiumgewinnung bewertet.

1 INTRODUCTION

Lithium gehört zu den weltweit wichtigsten kritischen Rohstoffen und bildet die Rohstoffbasis für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien, Energiespeichersystemen und zahlreichen Hightech-Produkten. Der weltweit steigende Lithiumbedarf erfordert sowohl die Erweiterung der Rohstoffbasis als auch die Entwicklung effizienter Verfahren zur Lithiumgewinnung. Mit dem Inkrafttreten des Critical Raw Materials Act wurde Lithium von der Europäischen Union als kritischer und strategischer Rohstoff eingestuft (European Parliament and Council of the European Union, 2024).

Die industrielle Lithiumgewinnung erfolgt derzeit überwiegend aus Pegmatiten und natürlichen Solen. Neben den klassischen Lagerstätten werden zunehmend geothermale Solen, hochmineralisierte Tiefensolen sowie weitere hydromineralische Ressourcen hinsichtlich ihres Potenzials zur Lithiumgewinnung untersucht (Franco et al., 2020; Schmidt, 2020; Dini et al., 2022; Kölbel et al., 2023; Heuberger & Morgenthaler, 2023; Torres et al., 2024). In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Verfahren der Direct Lithium Extraction (DLE) entwickelt. Hierzu zählen Adsorptionsverfahren, Ionenaustausch, Lösungsmittelextraktion, Membranverfahren sowie elektrochemische Trennverfahren. Die Auswahl des geeigneten Verfahrens wird im Wesentlichen durch die Gesamtmineralisation, die chemische und ionische Zusammensetzung der Sole sowie das Verhältnis von Lithium zu konkurrierenden Kationen bestimmt (Vera et al., 2023; Mojid et al., 2024). Die hochmineralisierten calciumchloridreichen Solen der Sibirischen Plattform werden seit mehreren Jahrzehnten als potenzielle hydromineralische Lithiumressourcen untersucht. Grundlegende Beiträge zur Hydrogeochemie, Zusammensetzung und rohstoffwirtschaftlichen Bewertung dieser Solen lieferten insbesondere (Pinneker., 1966; Zelinskaya., 2003; Alexeev et al., 2020).

Während zahlreiche Untersuchungen der Lithiumgewinnung aus geothermischen Solen, Salzsolen und Lagerstättenwässern der Erdöl- und Erdgasindustrie gewidmet sind, liegen für hochmineralisierte Solen von Kimberlitlagerstätten bislang nur wenige Untersuchungen vor. Aufgrund ihrer hohen Gesamtmineralisation sowie ihrer komplexen chemischen und ionischen Zusammensetzung stellen sie eine potenzielle hydromineralische Lithiumressource dar. Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind hochmineralisierte calciumchloridreiche Solen der

Kimberlitlagerstätte Udatschnaja (Republik Sacha (Jakutien). Untersucht wurden die chemische Zusammensetzung der Solen sowie das Sorptions- und Desorptionsverhalten von Lithium unter statischen und dynamischen Bedingungen. Darüber hinaus wurden die Sorptionskinetik, die Sorptionskapazität sowie Selektivitäts- und Verteilungskoeffizienten verschiedener Kationenaustauscher bestimmt. Ziel der Arbeit ist die Bewertung dieser Solen als alternative hydromineralische Lithiumressource sowie die Beurteilung der Eignung ionenaustauschbasierter Verfahren für die selektive Lithiumgewinnung (Ulanova, 2015).

2 MATERIALIEN UND METHODEN

Als Untersuchungsmaterial dienten zwei Typen hochmineralisierter calciumchloridreicher Solen der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja (Republik Sacha (Jakutien)): eine Sole aus der Beobachtungsbohrung Nr. 322 aus einer Tiefe von 550 m sowie eine Grubenwassersole aus dem Entwässerungssystem der Kimberlitlagerstätte. Die Grubenwasserprobe wurde auf der Sohle −155 m des westlichen Erzkörpers entnommen und über den Sammelbehälter der zentralen Pumpstation auf der Sohle −65 m gefördert. Die Solen enthalten Lithium sowie weitere kritische und strategisch relevante Elemente und stellen eine potenzielle hydromineralische Rohstoffressource dar. Ziel der Untersuchungen war die chemische Charakterisierung der Solen sowie die Bewertung der Anwendbarkeit ionenaustauschbasierter Verfahren zur selektiven Lithiumgewinnung. Die Elementanalytik erfolgte mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS), Flammenphotometrie (FP) und ICP-OES. Bestimmt wurden die Konzentrationen der Haupt- und Spurenelemente sowie die für den Ionenaustausch relevanten hydrochemischen Parameter. Der experimentelle Teil umfasste statische und dynamische Sorptions- und Desorptionsversuche an den Kationenaustauschern KU-2×8 und KB-4P-2. Untersucht wurden die Sorptionskinetik, die Sorptionskapazität sowie Selektivitäts- und Verteilungskoeffizienten für Lithium. Die Desorption erfolgte mittels gradientenweiser Elution mit Salzsäure unterschiedlicher Konzentration. Die erhaltenen Ergebnisse wurden zur Bewertung der Anwendbarkeit ionenaustauschbasierter Verfahren für die selektive Lithiumgewinnung herangezogen (Zelinskaya, 2003; Ulanova, 2015).

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Geologische und hydrogeologische Charakteristik der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja

Die Kimberlitlagerstätte Udatschnaja befindet sich in der Daldyn-Alakit-Diamantprovinz der Sibirischen Plattform in Westjakutien. Die Lagerstätte liegt im Bereich kontinuierlich verbreiteter Permafrostböden und ist durch komplexe lagerstättengeologische sowie hydrogeologische Verhältnisse gekennzeichnet, die durch mehrere wasserführende Horizonte bestimmt werden. Im Zuge des Bergbaus werden hochmineralisierte calciumchloridreiche Solen aus Tiefbohrungen sowie aus dem Entwässerungssystem des Tagebaus erschlossen. Die Solen zeichnen sich durch eine hohe Gesamtmineralisation sowie erhöhte Konzentrationen an Lithium, Rubidium, Strontium und weiteren kritischen Elementen aus und stellen eine potenzielle hydromineralische Rohstoffbasis für die Entwicklung von Verfahren zur selektiven und komplexen Gewinnung kritischer Rohstoffe dar (Ulanova, 2015).

3.2 Chemische Zusammensetzung der untersuchten Solen

Die chemische Zusammensetzung der untersuchten Solen wurde zur Bewertung ihres Potenzials als hydromineralische Rohstoffquelle für die Gewinnung kritischer und wirtschaftlich relevanter Elemente bestimmt. Analysiert wurden Hauptionen, strategisch bedeutsame Rohstoffelemente, Übergangsmetalle sowie Edel- und Spurenelemente. Die Ergebnisse der Elementanalysen sind in Abb. 1 dargestellt.

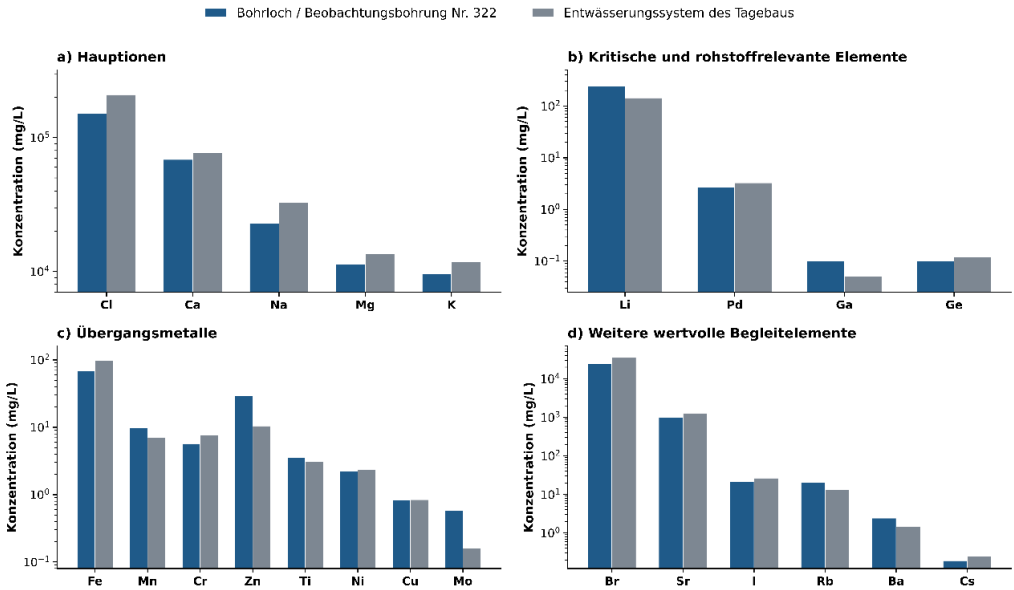


Abb. 1: Chemische Zusammensetzung der untersuchten hochmineralisierten Solen der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja. (logarithmische Darstellung der Konzentrationen)

Beide untersuchten Solen gehören zum calciumchloridischen hydrochemischen Typ und weisen eine hohe Gesamtmineralisation auf. Diese beträgt 378 g/L für die Sole aus der Beobachtungsbohrung Nr. 322 und 283,5 g/L für die Sole aus dem Entwässerungssystem des Tagebaus. Die Hauptionenzusammensetzung wird von Chlorid (151,8–208,9 g/L), Calcium (44,0–62,3 g/L), Natrium (16,0–20,0 g/L), Magnesium (6,0–13,2 g/L) und Kalium (4,0–8,0 g/L) dominiert.

Von besonderem Interesse sind die Konzentrationen strategisch relevanter Elemente. Die Lithiumkonzentration beträgt 125–250 mg/L, Rubidium 13–20 mg/L und Strontium 1060–1500 mg/L. Darüber hinaus enthalten die Solen erhöhte Gehalte an Brom (24,6–35,1 g/L) sowie Iod (21–26 mg/L). Die nachgewiesenen Konzentrationen bestätigen das Potenzial der untersuchten Solen als hydromineralische Rohstoffbasis für die Gewinnung von Lithium und weiteren kritischen Elementen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die hochmineralisierten Solen der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja ein vielversprechendes hydromineralisches Mehrkomponentensystem darstellen und ein erhebliches Potenzial für die selektive Gewinnung von Lithium besitzen (Zelinskaya, 2003; Ulanova, 2015).

3.3 Verwendete Kationenaustauscher

Für die Sorptionsversuche wurden die Kationenaustauscher KU-2×8 (stark saurer Sulfokationenaustauscher) und KB-4P-2 (schwach saurer Carboxylkationenaustauscher) eingesetzt. Die Auswahl der Ionenaustauscher erfolgte auf Grundlage von Literaturdaten sowie eigener Voruntersuchungen zur selektiven Sorption und Trennung von Lithium aus verschiedenen hochmineralisierten hydromineralischen Ressourcen. Vor Beginn der Experimente wurden beide Kationenaustauscher nach Standardverfahren konditioniert und in die H^+-Form überführt.

4 SORPTIONS- UND DESORPTIONSUNTERSUCHUNGEN ZUR LITHIUMGEWINNUNG AUS HOCHMINERALISIERTEN SOLEN

4.1 Sorptionsuntersuchungen

Die Sorptionsuntersuchungen wurden unter statischen und dynamischen Bedingungen durchgeführt, um die Eignung verschiedener Kationenaustauscher für die selektive Lithiumgewinnung aus hochmineralisierten calciumchloridischen Solen zu bewerten. Untersucht wurden die Sorptionskinetik, die Gleichgewichtseinstellung sowie die dynamischen Sorptionskapazitäten. Die wichtigsten Sorptionsparameter der untersuchten Kationenaustauscher für die Bohrloch- und Tagebausole sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede im Sorptionsverhalten der untersuchten Kationenaustauscher. Die höchsten dynamischen Sorptionskapazitäten wurden für den stark sauren Kationenaustauscher KU-2×8 in der Bohrlochsole ermittelt. Darüber hinaus bestätigt der Vergleich beider Solentypen den signifikanten Einfluss der chemischen Zusammensetzung und des Mineralisationsgrades auf die Selektivität und Effizienz der Lithiumsorption.

Tab. 1: Sorptionsparameter der Lithiumgewinnung aus hochmineralisierten Solen der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja

Kenngröße	Einheit	KU-2×8 Bohrung	KB-4P-2 Bohrung	KU-2×8 Tagebau	KB-4P-2 Tagebau
Li-Konzentration	mg/L	245,09	245,09	143,68	143,68
Gleichgewichtszeit	min	240	120	120	120
Geschwindigkeits-konstante k	$\times 10^{-3}\ s^{-1}$	0,32	0,72	0,20	0,75
Dynamische Kapazität	mg/g	0,13	0,08	0,10	0,02
Gesamtdynamische Kapazität	mg/g	6,40	0,82	1,50	1,26

4.2 Desorptionsuntersuchungen

Zur Regeneration der Kationenaustauscher wurden Desorptionsversuche mit Salzsäure unterschiedlicher Konzentration durchgeführt. Die charakteristischen Elutionskurven sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lithiumdesorption wesentlich von der Eluentenkonzentration sowie vom Typ des Kationenaustauschers abhängt. Für den stark sauren Kationenaustauscher KU-2×8 wurden die höchsten Lithiumextraktionsgrade bei Eluentkonzentrationen von 1–4 N HCl erzielt, während für den schwach sauren Kationenaustauscher KB-4P-2 eine effektive Lithiumelution in einem breiteren Konzentrationsbereich von 1–8 N HCl erreicht wurde. In Abhängigkeit vom Soletyp und vom eingesetzten Kationenaustauscher lagen die experimentell bestimmten Lithiumextraktionsgrade im Bereich von etwa 88–95 %. Bei niedrigen HCl-Konzentrationen (0,2–0,3 N) wurde Lithium bereits eluiert, während Calcium und Strontium weitgehend in der Ionenaustauschermatrix zurückgehalten wurden. Dadurch konnte eine selektive Abtrennung von Lithium gegenüber den zweiwertigen Begleitkationen erreicht werden. Die ermittelten optimalen Elutionsbedingungen bildeten die Grundlage für die Entwicklung einer ionenaustauschbasierten Technologie zur selektiven Lithiumgewinnung aus hochmineralisierten Solen der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja.

5 VORLÄUFIGE ABSCHÄTZUNG DES ROHSTOFF- UND PRODUKTIONSPOTENZIALS

Eine überschlägige Abschätzung des Rohstoffpotenzials zeigt, dass bei einer jährlichen Verarbeitung von etwa 900 000 m³ Sole und experimentell bestimmten Lithiumkonzentration der ursprünglichen Bohrlochsole von 0,225 g/L theoretisch rund 200 t Lithium pro Jahr im Solezufluss enthalten sind. Dies entspricht einem theoretischen Potenzial von etwa 1 250 t LiCl pro Jahr. Unter Berücksichtigung der experimentell bestimmten Lithiumgewinnung ergibt sich ein potenzieller Produktstrom von etwa 1 050–1 175 t LiCl pro Jahr. Diese Ergebnisse unterstreichen das erhebliche rohstoffwirtschaftliche Potenzial der hochmineralisierten Solen der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja und bestätigen ihre Eignung als vielversprechende hydromineralische Lithiumressource.

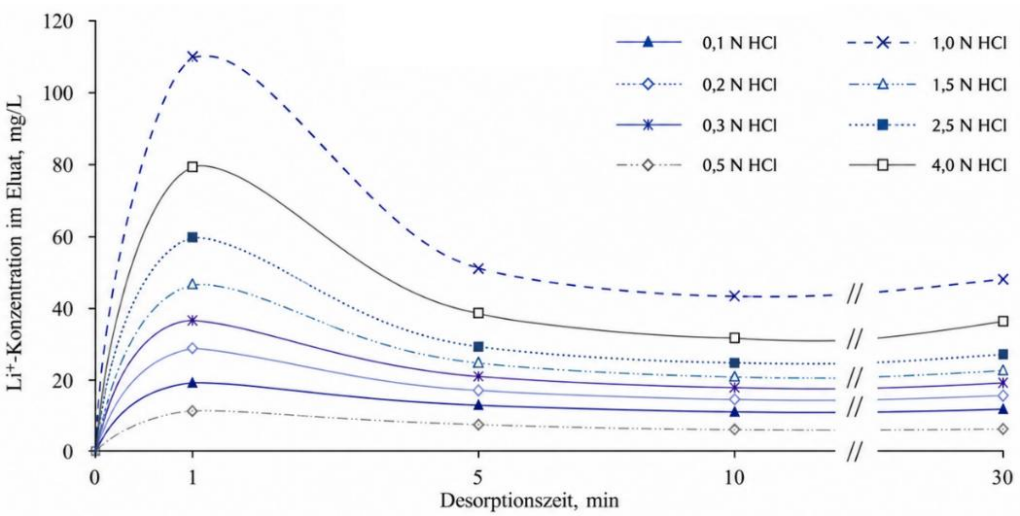


Abb. 2: Repräsentative Elutionskurven der Li^+-Desorption aus dem Kationenaustauscher KU-2×8 mit Salzsäure unterschiedlicher Konzentration für die Bohrlochsole der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja

6 SCHLUSSFOLGERUNG

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass die hochmineralisierten calciumchloridischen Solen der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja eine vielversprechende hydromineralische Rohstoffquelle für die selektive Lithiumgewinnung darstellen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die chemische Zusammensetzung der Solen einen wesentlichen Einfluss auf die Sorptions- und Desorptionseigenschaften sowie auf die Selektivität des Ionenaustauschprozesses besitzt. Die experimentell ermittelten Sorptions- und Desorptionsparameter bilden eine Grundlage für die Entwicklung ionenaustauschbasierter Verfahren zur Lithiumgewinnung aus hochmineralisierten Solen.

Im Gegensatz zu geothermischen Lithiumprojekten, bei denen die Soleförderung den Aufbau einer eigenständigen Infrastruktur erfordert, fallen die hochmineralisierten Solen der Kimberlitlagerstätte Udatschnaja als Begleitprodukt des Bergbaus an. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, die Lithiumgewinnung in das bestehende Wasserhaltungssystem des Bergwerks zu integrieren, ohne eine separate Gewinnung hydromineralischer Rohstoffe aufzubauen. Vor diesem Hintergrund stellen die untersuchten Solen eine vielversprechende alternative Quelle kritischer Rohstoffe, insbesondere von Lithium, dar.

LITERATURVERZEICHNIS

Alexeev, S.V., Alekseeva, L.P., Vakhromeev, A.G. Brines of the Siberian Platform (Russia): Geochemistry and processing prospects. Applied Geochemistry. 2020, 117, 104588

Dini A., Lattanzi P., Ruggieri G., Trumpy E. Lithium Occurrence in Italy—An Overview // Minerals. 2022. Vol. 12. No. 8. Art. 945. DOI: 10.3390/min12080945

European Union. Critical Raw Materials Act. Regulation (EU) 2024/1252. Official Journal of the European Union, L 2024/1252, 2024.Available at: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj/eng (accessed 1 July 2026).

Franco M. G., Peralta Arnold Y. J., Santamans C. D., López Steinmetz R. L., Tassi F., Venturi S., Jofré C. B., Caffe P. J., Córdoba F. E. Chemical and isotopic features of Li-rich brines from the Salar de Olaroz, Central Andes of NW Argentina // *Journal of South American Earth Sciences*. 2020. Vol. 103. Art. 102742. DOI: 10.1016/j.jsames.2020.102742

Heuberger S., Morgenthaler J. Lithium in Geothermal Brines: Status Report on the Current Situation in Switzerland and in Neighbouring Countries. Technical report. Georesources Switzerland Group, ETH Zürich, commissioned by Swiss Geological Survey (swisstopo) and Swiss Federal Office of Energy (SFOE), Zürich, 2023. 43 p

Kölbel L., Kölbel T., Herrmann L., Kaymakci E., Ghergut I., Poirel A., Schneider J. Lithium extraction from geothermal brines in the Upper Rhine Graben: A case study of potential and current state of the art // Hydrometallurgy. 2023. Vol. 221. Art. 106131. DOI: 10.1016/j.hydromet.2023.106131.

Mojid M. R., Lee K. J., You J. A review on advances in direct lithium extraction from continental brines: Ion-sieve adsorption and electrochemical methods for varied Mg/Li ratios // Sustainable Materials and Technologies. 2024. Vol. 40. Art. e00923. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e00923.

Pinneker, E.V. Podzemnye rassoly Sibirskoj platformy [Underground Brines of the Siberian Platform]. Moscow: Nauka, 1966.

Schmidt N. Genesis and Distribution of Lithium-Enriched Pore Brines at the Salar de Uyuni (Bolivia). Dissertation. TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany, 2020. Available at: https://tubaf.qucosa.de/id/qucosa%3A70753 (accessed 2 July 2026)

Torres D., Pérez K., Galleguillos Madrid F. M., Leiva W. H., Gálvez E., Salinas-Rodríguez E., Gallegos S., Jamett I., Castillo J., Saldana M., Toro N. Salar de Atacama Lithium and Potassium Productive Process // *Metals*. 2024. Vol. 14, No. 10. Art. 1095. https://doi.org/10.3390/met14101095

Ulanova, O.V. Hydrominerale Ressourcen – eine Quelle für strategische seltene Metalle in Sibirien. In: *Proceedings of the 5th Aachen International Mining Symposia (AIMS 2015): Mineral Resources and Mine Development*. Aachen, Germany, 2015, pp. 527–539.

Vera, M.L., Torres, W.R., Galli, C.I., Chagnes, A., Flexer, V. Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023, 4(3), 149–165. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00387-5

Zelinskaya, E.V. Theoretische Grundlagen und Entwicklung von Technologien zur selektiven Extraktion von Alkali- und Erdalkalimetallen aus unterirdischen Solen. Dissertation (Dr. Sci. Tech.), Irkutsk, Russland, 2003.

Is it worth closing the plastic loop in WEEE? Environmental and economic assessment of plastic separation and recycling versus incineration

Eduard Wagner[1], Theresa Aigner[1], Frederieke Aschenbrenner[2], Christian Aschenbrenner[2] & Ralf Ehrlich[2]
[1)] Fraunhofer IZM, Berlin, Germany
[2)] PA GmbH, Isen, Germany

ABSTRACT: Plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) are often routed to thermal treatment after shredding, although selected polymer fractions can technically be recovered before mixed-scrap treatment. This paper assesses whether selective dismantling of polypropylene and acrylonitrile butadiene styrene from end-of-life washing machines can reduce climate impacts and become economically viable under practical treatment conditions. The functional unit is the treatment of 1 tonne of end-of-life washing machines. A baseline scenario, in which the complete plastic fraction is incinerated with energy recovery, is compared with a recycling scenario in which removable plastics are dismantled, mechanically recycled and credited for substituting virgin polymers. Climate impacts are taken from an accompanying life-cycle assessment, while the economic assessment is based on case-study labour data, avoided incineration costs and revenues from recycled plastics. The baseline results in 448.98 kg CO_2-eq/t, while the recycling scenario reduces impacts to 416.88 kg CO_2-eq/t. However, the direct economic balance remains negative under observed operating conditions because additional labour costs exceed material revenues and avoided disposal costs. Sensitivity analysis shows that economic feasibility depends less on plastic revenues alone than on the combined effect of higher recovery rates, improved throughput and value-sharing mechanisms across the WEEE value chain.

1 INTRODUCTION

Waste electrical and electronic equipment (WEEE) contains substantial quantities of plastics, but current treatment systems are still mainly optimised for metal recovery (PlasticsEurope 2022, Umweltbundesamt 2022). In conventional shredder-based processing, polymer fractions are often mixed with additives, rubber, organics and other residues, which limits their suitability for high-quality mechanical recycling (Ragaert et al. 2017). As a result, plastics from large household appliances are frequently routed to thermal treatment rather than returned to material use. This is consistent with European plastics statistics, which show that energy recovery remains a major end-of-life route for post-consumer plastics (PlasticsEurope 2022).

Selective dismantling before shredding can preserve polymer quality and enable recycling of targeted fractions such as polypropylene (PP) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS). Environmentally, this can reduce greenhouse-gas emissions by avoiding incineration and substituting virgin polymer production (European Commission 2021). Economically, however, additional dismantling labour must be compensated by material revenues, avoided treatment costs or other value streams.

This paper addresses this implementation problem using washing machines as a case study. It combines climate results from an accompanying life-cycle assessment with an incremental economic model based on observed dismantling labour, plastic revenues and avoided incineration costs. The aim is to identify the main drivers determining whether selective plastic recovery can move from a technically feasible intervention to a scalable WEEE treatment practice.

2 METHOD AND DATA

Functional unit and scenario definition

The functional unit is the treatment of 1 tonne of end-of-life washing machines at a first-treatment facility. Two scenarios are compared. In the Baseline Scenario, washing machines enter the standard treatment route. The plastic fraction remains in the mixed scrap stream and is routed to incineration with electricity and heat recovery after shredding. In Plastic Recovery Scenario 1, removable PP and ABS components are manually dismantled before shredding. The separated plastics are mechanically recycled. After impurities and process losses, the resulting regranulate is assumed to substitute virgin polymers.

2.1 Material inventory

The inventory is based on the assumption that 1 tonne of washing machines contains 155.3 kg of polypropylene and acrylonitrile butadiene styrene. In Scenario 1, 15.6 kg of plastics are removed before shredding. After a 10 % loss due to impurities and recycling processes, 14.08 kg of regranulate remain available for substitution. The remaining plastic fraction is thermally treated.

Tab. 1: Material inventory per tonne of washing machines.

Flow per tonne of washing machines	Baseline Scenario	Plastic Recovery Scenario 1
Total PP and ABS content	155.3 kg	155.3 kg
Plastics incinerated with energy recovery	155.3 kg	141.2 kg
Plastics dismantled before shredding	0.0 kg	15.6 kg
Regranulate after losses	0.0 kg	14.08 kg
Avoided virgin polymer production	0.0 kg	14.08 kg

2.2 Economic model

The economic assessment is incremental and includes only changes between both scenarios. Direct benefits consist of revenue from recycled plastics and avoided incineration costs. Direct costs consist of additional labour for dismantling and internal logistics. Climate benefits are not monetised separately because the avoided incineration fee is assumed to already include CO_2-related cost components. The assumed regranulate value is 400 EUR/t.

Tab. 2: Input parameters for the economic model.

Parameter	Value
Regranulate value	400 EUR/t
Avoided incineration fee	180 EUR/t
Labour cost	35.00 EUR/h
Labour intensity	5.455 h/t
Climate impact, baseline	448.98 kg CO_2-eq/t
Climate impact, Scenario 1	416.88 kg CO_2-eq/t

The avoided incineration fee is 180 EUR/t plastic. Labour costs are based on case-study observations with an average cost of 35,00 EUR/h. The observed dismantling configuration uses three workers and results in a labour intensity of 5.455 h/t washing machines.

3 RESULTS

3.1 Environmental result

The accompanying LCA shows that selective recovery of 15.6 kg of PP and ABS per tonne of washing machines reduces climate impacts from 448.98 kg CO_2-eq/t in the Baseline Scenario to 416.88 kg CO_2-eq/t in Plastic Recovery Scenario 1.

Tab. 3: Climate impacts of Plastic Recovery Scenario 1.

Indicator	Baseline Scenario	Plastic Recovery Scenario 1	Difference
Climate impact	448.98 kg CO_2-eq/t	416.88 kg CO_2-eq/t	−32.10 kg CO_2-eq/t
Relative climate impact	100 %	92.85 %	−7.15 %
Regranulate substituting virgin plastics	0.0 kg/t	14.08 kg/t	+14.08 kg/t

The result shows that even a limited recovery of approximately 10 % of the available PP and ABS fraction leads to a measurable climate benefit. The reduction is mainly driven by avoided incineration and substitution of virgin polymers in the accompanying LCA.

3.2 Direct economic result

The economic calculation shows a different picture. While the recycling route creates material revenue and avoids part of the incineration costs, these benefits remain small compared with the additional labour effort.

Tab. 4: Direct economic balance of Plastic Recovery Scenario 1.

Economic component	Calculation	Value
Revenue from recycled PP and ABS	14.08 kg × 0.400 EUR/kg	+5.63 EUR/t
Avoided incineration costs	14.1 kg × 0.180 EUR/kg	+2.54 EUR/t
Total direct benefits	5.63 EUR + 2.54 EUR	**+8.17 EUR/t**
Additional labour costs	5.455 h/t × 35.00 EUR/h	−190.94 EUR/t
Incremental economic balance	8.17 EUR – 190.94 EUR	**−182.77 EUR/t**

At the observed throughput, Plastic Recovery Scenario 1 is therefore environmentally beneficial but economically negative. The main reason is the low amount of marketable regranulate per tonne of washing machines. The sale of 14.08 kg of regranulate generates only 5,63 EUR/t, while additional labour costs amount to 190.94 EUR/t.

3.3 Break-even analysis for Scenario 1 (10% recovery) and 2 (90% recovery)

The break-even analysis compares the 10 % recovery scenario with the 90 % recovery sensitivity scenario under the same labour setup. In both cases, the dismantling line is operated by three workers at an average labour cost of 35.00 EUR/h, resulting in labour costs of 105.00 EUR per line hour. The observed line throughput during the case study was 0.55 t/h.

At this throughput, both scenarios remain economically negative. In the 10 % recovery scenario, direct benefits from recycled plastics and avoided incineration amount to only 8.17 EUR/t, while labour costs reach 190.94 EUR/t. The resulting balance is −182.77 EUR/t. In the 90 % recovery scenario, the same labour input is allocated to a substantially larger recovered plastic mass. Direct benefits increase to 72.96 EUR/t, reducing the deficit to −117.98 EUR/t.

Tab. 5: Break-even comparison between 10 % and 90 % recovery

Indicator	10 % recovery	90 % recovery
Regranulate output	14.08 kg/t	125.8 kg/t
Avoided incineration	14.1 kg/t	125.8 kg/t
Direct benefits	8.17 EUR/t	72.96 EUR/t
Labour costs at observed throughput	−190.94 EUR/t	−190.94 EUR/t
Economic balance at observed throughput	−182.77 EUR/t	−117.98 EUR/t
Required throughput for break-even	12.85 t/h	1.44 t/h
Increase compared with observed throughput	23.4 ×	2.6 ×

The comparison shows that the 10 % recovery scenario is unlikely to become economically viable through process optimisation alone, as it would require a throughput increase by a factor of 23.4. The 90 % recovery scenario performs considerably better. Its break-even throughput is 1.44 t/h, corresponding to 2,6 times the observed throughput. This is still ambitious but more plausible through improved line design, better tooling, reduced handling time or partial automation.

The break-even analysis therefore indicates that economic viability depends primarily on combining higher recovery rates with sufficient throughput. Higher plastic prices or avoided incineration costs can improve the result, but they cannot compensate for low recovered mass and high labour intensity on their own. The decisive question is thus whether enough recoverable material can be extracted per labour hour.

3.4 Sensitivity scenario: 90 % plastic recovery

Scenario 1 shows that recovering only the easily removable plastic fraction creates a measurable climate benefit but does not generate enough revenue to compensate for labour. To test whether the economic logic changes with higher recovery rates, a sensitivity scenario was calculated in which 90 % of the PP and ABS fraction is recovered before shredding.

The staffing assumption remains unchanged: the line is operated by three workers at 35.00 EUR/h, resulting in the same labour cost of 190.94 EUR/t washing machines at the observed throughput. This allows the effect of higher plastic recovery to be isolated.

Tab. 6: Material flows in the 90 % recovery sensitivity scenario.

Flow per tonne of washing machines	Baseline Scenario	Scenario 1: 10 % recovery	Sensitivity: 90 % recovery
Total PP and ABS content	155.3 kg	155.3 kg	155.3 kg
Plastics incinerated	155.3 kg	141.2 kg	29.5 kg
Plastics routed to recycling	0,0 kg	15.6 kg	139.77 kg
Regranulate after losses	0,0 kg	14.08 kg	125.8 kg
Avoided incineration	–	14.1 kg	125.8 kg

The accompanying LCA reports a climate impact of 85.31 kg CO_2-eq/t washing machines for the 90 % recovery scenario. Compared with the Baseline Scenario, this corresponds to a reduction of 363.67 kg CO_2-eq/t, or 81,00 %. The environmental effect increases strongly because more plastics are diverted from incineration and more secondary polymer becomes available to substitute virgin material.

3.5 Economic effect of higher recovery rates

The economic result improves substantially when the recovered plastic quantity increases. The same price assumptions are used as before: 400 EUR/t for regranulate and 180 EUR/t for avoided incineration.

Tab. 7: Economic balance of the 10 % & 90 % recovery scenario.

Economic component	Calculation	Scenario 1: 10 % recovery	Sensitivity: 90 % recovery
Revenue from recycled plastics	Regranulate quantity × 0.400 EUR/kg	+5.63 EUR/t	+50.32 EUR/t
Avoided incineration costs	Avoided incineration × 0.180 EUR/kg	+2.54 EUR/t	+22.64 EUR/t
Total direct benefits	Plastic revenue + avoided incineration	**+8.17 EUR/t**	**+72.96 EUR/t**
Additional labour costs	5.455 h/t × 35.00 EUR/h	−190.94 EUR/t	−190.94 EUR/t
Economic balance	Benefits − labour costs	**−182.77 EUR/t**	**−117.98 EUR/t**

The 90 % recovery scenario remains negative under the conservative price assumptions, but the economic gap narrows from −182.77 EUR/t to −117.98 EUR/t. This shows that recovery rate is a decisive parameter: the same labour input becomes more productive when more recyclable material is extracted per tonne of appliances.

3.6 Additional value streams

The calculation above includes only plastic revenue and avoided incineration costs. In practice, selective dismantling may also create additional value through cleaner motor recovery, reduced shredder input and quality premiums for traceable regranulate. These effects were not included in the core balance because they depend on site-specific contracts and downstream buyers.

Tab. 8: Economic analysis of the potential additional value streams

Additional value stream	Calculation basis	Conservative [EUR/t]	Moderate [EUR/t]	Supportive [EUR/t]
Motor-quality uplift	60.93 kg motors/t	+3.05	+6.09	+9.14
Avoided shredder-processing costs	200.70 kg removed before shredding/t	+4.01	+8.03	+12.04
Quality premium for regranulate	125.8 kg regranulate/t	+25.16	+50.32	+100.64
Verified recycling bonus or OEM contribution	125.8 kg regranulate/t	–	+125.80	+251.60
Total additional value	Sum	+32.22	+190.24	+373.42

Including these additional value streams changes the economic balance of the 90 % recovery scenario substantially.

Tab. 9: Extended economic balance including additional value streams

Indicator	Core result [EUR/t]	Conservative case [EUR/t]	Moderate case [EUR/t]	Supportive case [EUR/t]
Economic balance before additional value	−117.98	−117.98	−117.98	−117.98
Additional value streams	–	+32.22	+190.24	+373.42
Extended economic balance	−117.98	−85.76	+72.26	+255.44

The result shows that the 90 % recovery scenario can become economically viable if higher plastic recovery is combined with additional value capture. In particular, quality premiums and verified recycling payments can shift the balance from negative to positive. This indicates that selective dismantling should not be evaluated solely as an internal sorting cost, but as part of a wider value-chain arrangement involving recyclers, OEMs and producer-responsibility systems.

4 DISCUSSION

The results show a clear gap between environmental benefit and direct economic viability. Plastic Recovery Scenario 1 reduces climate impacts by 32.10 kg CO_2-eq/t, or 7.15 %, but remains economically negative because the recovered plastic quantity is too small to compensate for additional labour. At 14.08 kg of regranulate per tonne of washing machines, material revenues and avoided incineration costs amount to only 8.17 EUR/t, compared with labour costs of 190,94 EUR/t.

The sensitivity analysis shows that the economic logic improves substantially when recovery rates increase. Under the 90 % recovery assumption, climate impacts fall by 363.67 kg CO_2-eq/t, and the economic gap narrows because more regranulate and more avoided incineration costs are allocated to the same labour setup. However, even this scenario depends on higher throughput, quality premiums or additional value streams to become economically attractive. Overall, selective dismantling should not be evaluated only as an isolated treatment step. Its viability depends on whether higher material quality, verified recycling and avoided incineration are rewarded across the value chain.

5 CONCLUSIONS

Selective recovery of polypropylene (PP) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) from washing machines can deliver relevant climate benefits, but the 10 % recovery scenario is not economically viable under observed operating conditions. Labour dominates the cost balance, while direct revenues from plastics remain limited. The main levers are therefore not only higher plastic prices, but higher recovery rates, improved throughput and additional value capture through quality premiums, motor recovery, offtake contracts or producer-responsibility incentives. The 90 % recovery sensitivity indicates that selective dismantling can become more plausible when more material is recovered with the same labour input.

Future work should validate higher recovery rates in industrial trials, refine throughput data and replace assumed market values with contract-based prices.

REFERENCES

European Commission. (2021). Commission Recommendation (EU) 2021/2279 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations. Official Journal of the European Union.

Plastics Europe. (2022). The Circular Economy for Plastics: A European Overview. Brussels.

Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58.

Umweltbundesamt (UBA). (2022). Aufkommen und Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland. Dessau-Roßlau.

Recyclingfähigkeit von Matratzenüberzügen: Eine Markt- und Materialanalyse

Natalie Marzinek[1], Hannah Weber[1], Gerald Koinig[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: In der EU fallen jährlich rund 30 Mio. gebrauchte Matratzen mit Bezügen an. Diese werden oft nach etwa fünf Jahren ersetzt, überwiegend deponiert oder energetisch verwertet, während stoffliches Recycling die Ausnahme bleibt. Der vorliegende Beitrag bewertet die Recyclingfähigkeit von Matratzenbezügen mittels Marktstudie (fünf Hersteller, systematische Produkterfassung) und experimenteller Analytik von 315 PC-Bezügen inkl. FTIR jeder Schicht. Die Ergebnisse zeigen ein breites Faserspektrum - Polyester dominiert als Hauptfaser mit 65% Massenanteil, Monomaterial (100% PES bzw. 100% CO) findet sich vor allem im Niedrigpreis- bzw. ökologischen Segment, während Premiumprodukte funktionsgetriebene Mischungen nutzen. Funktionselemente wie Reißverschlüsse sind Standard und fördern Hygiene/Langlebigkeit, erhöhen jedoch die Materialvielfalt. Die Herstellerinformationen sind uneinheitlich und teils marketinggetrieben, wichtige Details zum Schichtaufbau fehlen häufig. Abgeleitete Ökodesign-Anforderungen umfassen die Begrenzung der Faserkomplexität, trennbare Verbindungen, Verzicht auf nicht-funktionale Elemente, Minimierung von Beimischungen, Förderung der Reparierbarkeit und Mindestquoten für Rezyklateinsatz. Hochwertiges Recycling erfordert verlässliche Materialinformationen; empfohlen werden Anpassungen der Textilkennzeichnung und digitale Produktpässe.

1 EINLEITUNG

Jährlich entstehen in der Europäischen Union circa 30 Millionen gebrauchte Matratzen samt Matratzenbezügen (Hügli, 2023). Aufgrund hygienischer Erwägungen werden Matratzen in der Regel bereits nach etwa fünf Jahren ausgetauscht, wodurch ein stetig ansteigender Abfallstrom generiert wird. Die gegenwärtige Praxis der Entsorgung erweist sich jedoch als ökologisch bedenklich: Der Großteil der Matratzen landet auf Deponien oder wird energetisch verwertet, während stoffliche Recyclingoptionen bisher kaum genutzt werden (Demandt, 2023). Obwohl der öffentliche Fokus im Textilrecycling primär auf Bekleidung liegt, finden Heimtextilien – insbesondere Matratzenbezüge als textile Außenhülle von Matratzen – kaum Beachtung. Gerade Matratzenüberzüge stellen aufgrund ihrer komplexen, vielschichtigen Materialstrukturen eine besondere Herausforderung für das Recycling dar. Unterschiedliche Faserzusammensetzungen, Versteppungen sowie zusätzliche Ausstattungselemente erschweren sowohl die Sortierung als auch die stoffliche Verwertung. Gleichzeitig ist das Wissen über die tatsächliche Materialbeschaffenheit und konstruktive Gestaltung der am Markt erhältlichen Bezüge bislang begrenzt. Für die Entwicklung recyclinggerecht gestalteter Produkte sowie fundierter Ökodesign-Anforderungen ist jedoch eine systematische Erfassung dieser Merkmale unabdingbar.

Vor diesem Hintergrund analysiert der vorliegende Beitrag die Recyclingfähigkeit von Matratzenüberzügen anhand einer umfassenden Merkmalserhebung und Materialcharakterisierung. Basis bildet eine Situationsanalyse des aktuellen Marktes, welche die eingesetzten Materialien und strukturellen Eigenschaften identifiziert und hinsichtlich wiederkehrender Muster sowie Besonderheiten auswertet. Zusätzlich erfolgt ein Abgleich der Marktbeobachtungen mit der Faserzusammensetzung gebrauchter PC-Matratzenbezüge.

2 METHODIK

Marktstudie: Es wurde eine Situationsanalyse des Marktes für Matratzenbezüge durchgeführt, die sich auf ein klar definiertes Zeitfenster und die zentrale Fragestellung fokussierte, welche Materialien derzeit in handelsüblichen Bezügen Verwendung finden. Hierfür wurden Produkte von fünf ausgewählten Matratzenherstellern untersucht, die sowohl marktbeherrschende Unternehmen als auch kleinere Nischenanbieter abbilden. Im Zentrum stand die systematische Erfassung relevanter Produkteigenschaften, darunter Preis, Material des Bezugs und der Bezugsfüllung, Grammatur der Füllung, Art der Steppung, Ausführung des Reißverschlusses sowie weitere konstruktive Besonderheiten.

Experimentelle Untersuchungen: Zur systematischen Erhebung der Materialvielfalt von Post-Consumer-Matratzenbezügen wurden insgesamt 315 Eckstücke (30 × 30 cm) aus drei österreichischen Altstoffsammelzentren entnommen. Dokumentiert wurden die Anzahl und der Aufbau der optisch unterscheidbaren Schichten, die Abstände und Muster der Versteppung, funktionale Elemente (z. B. Reißverschlüsse, Kantenbänder) sowie gestalterische Merkmale. Ergänzend wurde jede einzelne Schicht materialanalytisch mittels Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR) untersucht.

Die Ergebnisse der Marktanalyse wurden hinsichtlich wiederkehrender Muster, Unterschiede und Besonderheiten ausgewertet. Anschließend erfolgte ein Vergleich der aktuellen Marktsituation mit der Faserzusammensetzung der PC-Matratzenbezüge.

3 ERGEBNISSE

Das breitere Spektrum an Fasertypen und Faserkombinationen, das bei der Analyse der im experimentellen Teil untersuchten Post-Consumer-Matratzenbezüge (PC-Bezüge) identifiziert wurde, zeigte sich auch im aktuellen Marktangebot deutlich. Die Marktanalyse ergab, dass neben Polyester und Baumwolle auch Viskose, Polypropylen, Polyurethan sowie Funktionsfasern wie Elastan zum Einsatz kommen. Besonders auffällig war die verstärkte Verwendung der synthetischen Cellulosefaser Tencel. Die dominierenden Fasertypen traten dabei unabhängig vom Preis oder der Produktpositionierung (Discounter- oder Premiumsegment) auf. Die erwartete Korrelation zwischen hochwertigen Materialien und höheren Preisen ist somit nicht durchgängig erkennbar. Bezüglich der Faser mit dem größten Massenanteil (= Hauptfaser) zeigten sich keine Unterschiede zwischen dem aktuellen Marktangebot und den PC-Bezügen. Überwiegend wurde bei den beprobten Matratzenbezügen Polyester (65% Massenanteil) eingesetzt. Die Faseranteile in allen untersuchten Matratzenbezügen, differenziert nach Fasertyp, sind in Abbildung 1 dargestellt. Monomaterial-Bezüge fanden sich bei der Marktanalyse vor allem im unteren Preissegment (100% PES) sowie bei ökologisch positionierten Produkten (100% CO), wohingegen im höherpreisigen Bereich Materialkombinationen mit Fokus auf Funktionalität dominierten.

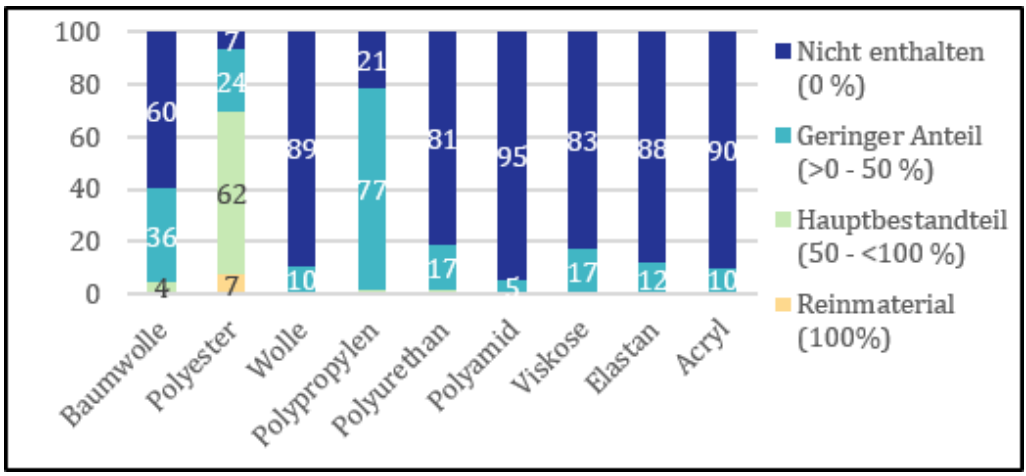


Abb. 1: Anteile nach Faserart von 315 beprobten PC-Matratzenbezügen

Funktionselemente wie Kantenbänder oder Reißverschlüsse sind heutzutage Standard. Die abnehmbare und waschbare Ausführung stellt dabei einen positiven Trend hinsichtlich Hygiene und Lebensdauer dar, wenngleich sich durch das Vorhandensein eines Reißverschlusses die Anzahl der eingesetzten Materialien erhöht. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Vielfalt an Fasertypkombinationen und der Einsatz von Funktionselementen über die Zeit hinweg konstant geblieben sind. Der Trend geht bei hochpreisigen Produkten zu einer höheren funktionalen Differenzierung, jedoch auch zum Einsatz von recycelten Fasern. Im niedrigpreisigen Bereich haben sich die Fasertypkombinationen in den letzten Jahren kaum verändert.

Bei den PC-Bezügen war eine Differenzierung zwischen Ober- und Unter- bzw. Randseite in 40% der Proben erkennbar; dies fand sich auch im aktuellen Sortiment wieder. Hersteller machen meist detaillierte Angaben zu materialseitigen Unterschieden, wenngleich die Bezeichnungen für Ober-/Unterseite vielfältig und nicht auf Anhieb erkennbar waren. Insgesamt sind die Herstellerangaben zu aktuellen Produkten jedoch uneinheitlich und teils durch Marketingbegriffe verschleiert (z. B. QuickRefresh™, SmartCool™), wodurch die Glaubwürdigkeit kritisch hinterfragt werden sollte. Angaben zur Anzahl der Schichten oder zur genauen Zusammensetzung innerhalb einzelner Schichten fehlen weitgehend, obwohl diese für die Bewertung der Recyclingfähigkeit entscheidend wären. Zudem variiert die Zugänglichkeit der Informationen stark: Auf manchen Websites sind relevante Angaben klar strukturiert und gut auffindbar, während sie bei anderen vollständig fehlen. Hersteller, die sich an ein umweltbewusstes Publikum richten – etwa mit Fokus auf Nachhaltigkeit oder natürliche Materialien – stellen in der Regel deutlich strukturiertere, leicht auffindbare und inhaltlich fundierte Informationen zur Verfügung.

4 FAZIT UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Um Recyclingprozesse zu erleichtern, sollten verbindliche Anforderungen an das Produktdesign von Matratzen festgelegt werden. Hierzu zählen die Begrenzung der Faserkomplexität, die Verwendung von leicht trennbaren Verbindungen, der Verzicht auf nicht-funktionale Designelemente, die Minimierung von Beimischungen, die Förderung der Reparierbarkeit sowie die Einführung von Mindestquoten für den Rezyklateinsatz.

Eine zentrale Voraussetzung für hochwertige Recyclingprozesse ist die Bereitstellung verlässlicher Informationen über die Materialzusammensetzung und Struktur von Produkten. Der

Gesetzgeber sollte daher eine Anpassung der bestehenden Textilkennzeichnungsverordnung sowie die Einführung von einheitlichen Labels in Betracht ziehen.
Eine herstellerbasierte Sortierung könnte grundsätzlich sinnvoll sein, sofern sich innerhalb der Produktlinien eines Herstellers konsistente Materialzusammensetzungen zeigen. So wäre etwa bei Herstellern wie Emma, die überwiegend PES-Bezüge einsetzen, eine relativ homogene Fraktion zu erwarten. In der Praxis dürfte eine solche Sortierung jedoch mit erheblichem organisatorischem Aufwand verbunden sein, da Informationen zum jeweiligen Hersteller beim Alttextil in der Regel nicht mehr verfügbar oder lesbar sind. Eine praktikable Umsetzung wäre nur denkbar, wenn entsprechende Informationen digital hinterlegt und abrufbar wären, etwa über einen digitalen Produktpass. Dadurch ließe sich nicht nur die herstellerbezogene Zuordnung, sondern auch eine materialspezifische Sortierung realisieren.

FÖRDERUNG & DANKSAGUNG

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des CD-Laboratoriums für „Design und Bewertung einer effizienten, recyclingbasierten Kreislaufwirtschaft". Die finanzielle Unterstützung durch das Österreichische Bundesministerium für Wirtschaft, Energie und Tourismus, die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft wird ausdrücklich anerkannt. Zusätzlich danken wir unseren Unternehmenspartnern für ihre finanzielle und nicht-finanzielle Unterstützung; dies sind in alphabetischer Reihenfolge: Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoff Recycling Austria AG, Linz Service GmbH, OMV Downstream GmbH und Wien Energie GmbH. Zudem bedanken wir uns bei Brantner Österreich GmbH.

LITERATURVERZEICHNIS

Demandt, M., 2023. Extended Producer Responsibility (EPR) in der Matratzenindustrie (Wuppertaler Studienarbeiten zur nachhaltigen Entwicklung Nr. 33). Wuppertal Institut, Wuppertal.

Hügli, J., 2023. Closed Textile Cycle for Communally Collected Postconsumer Mattress Covers in Europe. Presented at the Future Textile Conference, Bristol.

KONTAKT

Natalie Marzinek, M.Sc.
Natalie.marzinek@unileoben.ac.at
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben

Zu viel des Guten? - Eine quantitative Analyse der dekorierten Kunststoffverpackungen im österreichischen Leichtverpackungsstrom

Alexia Tischberger-Aldrian[1], Nikolai Kuhn[1], Andreas Klöckl[1], Namrata Mhaddolkar[1], Dieter Schuch[2], Jörg Fischer[3], Viktoria Helene Gabriel[4], Vasiliki-Maria Archodoulaki[5] & Gerald Koinig[1]

[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich
[2)] Altstoff Recycling Austria AG, Wien, Österreich
[3)] Johannes Kepler Universität Linz, Institut für Polymeric Materials and Testing / LIT Factory, Linz, Österreich
[4)] Hochschule Campus Wien, Fachbereich Verpackungs- und Ressourcenmanagement, Wien, Österreich
[5)] Technische Universität Wien, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Dekorationselemente wie z.B. Full Body Sleeves beeinflussen die Sortier- und Recyclingfähigkeit von Kunststoffverpackungen maßgeblich, repräsentative Daten zu ihrer Verbreitung im österreichischen Leichtverpackungsstrom fehlen jedoch weitgehend. Im Rahmen einer österreichweiten Charakterisierung wurden starre Kunststoffverpackungen hinsichtlich Dekorationsart und Bedeckungsgrad untersucht. Die Ergebnisse zeigen material- und anwendungsspezifische Unterschiede sowie einen hohen Anteil vollflächig dekorierter Verpackungen, insbesondere bei PET-, HDPE- und PP-Verpackungen. Full-Body-Sleeves treten vor allem bei Flaschen und Milchproduktverpackungen auf. Die gewonnenen Daten bilden eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung von Design-for-Recycling-Richtlinien und die Optimierung sensorgestützter Sortierprozesse.

1 EINLEITUNG

Öffentlich zugängliche Studien zur Zusammensetzung des Gelben Sacks in Österreich sind begrenzt vorhanden (u.a. van Eygen et al., 2018; Kuhn et al., 2026), detaillierte Untersuchungen auf Objektebene noch rarer. Angesichts steigender Recyclingziele für Kunststoffverpackungen (PPWR, 2025) ist eine detaillierte Charakterisierung des Leichtverpackungsinputs entscheidend für optimierte Sortier- und Recyclingprozesse. Insbesondere Dekorationen haben häufig einen wesentlichen Einfluss auf die Sortier- und Recyclingfähigkeit von Verpackungen – und die Möglichkeiten zur Dekoration sind vielfältig, wenngleich sie sich in vier grundsätzliche Kategorien unterteilen lassen:

- *Direkte Dekoration der Verpackung:* Dazu gehören der direkte Druck auf eine Verpackung ohne zusätzliches Etikett (z.B. Siebdruck, Tampondruck) oder auch Lasergravuren.
- *Nachträglich angebrachte Etiketten:* Etiketten, die nach der Herstellung des Hauptverpackungskörpers durch z.B. Kleber aufgebracht werden. Als Materialien kommen Papier oder Kunststoffe zum Einsatz.
- *Folienbasierte Dekoration:* Zu dieser Kategorie zählen Etiketten, die vollständig oder teilweise um den Hauptverpackungskörper gelegt werden und verklebt werden. Des Weiteren zählen Sleeves dazu, welche als Rundum- oder Ganzkörperetikett durch Hitze fest um die Verpackung gelegt werden.
- *Integration des Labels im Zuge der Herstellung:* In diesem Fall wird das Etikett bereits während der Herstellung direkt in das Verabeitungswerkzeug eingelegt und verschmilzt während der Fertigung (bspw. Spritzguss) untrennbar mit dem Hauptverpackungskörper.

Gesleevte Verpackungen und insbesondere vollgesleevte Verpackungen haben in der Recyclingbranche einen negativen Ruf, gelten als „nicht recyclingfähig“ oder „bedingt recyclingfähig“, da die korrekte Detektion des Hauptverpackungskörpers in der sensorgestützten Sortierung eingeschränkt ist. Dadurch landen die Verpackungen häufig im falschen Outputstrom, was zu einem Verlust an Rezyklatmenge führt (Jakobs et al., 2024).

Trotz der hohen Relevanz von Dekorationselementen liegen bislang kaum repräsentative Daten über deren tatsächliche Verbreitung im österreichischen Leichtverpackungsstrom vor. Insbesondere fehlen Informationen darüber, welche Dekorationsarten, Bedeckungsgrade und Anwendungsbereiche bei den verschiedenen Kunststofffraktionen dominieren. Der vorliegende Beitrag soll dazu beitragen diese Lücke auf Basis einer österreichweiten Charakterisierung des Leichtverpackungsstroms zu schließen und liefert eine quantitative Auswertung von Verpackungen mit verschiedenen Dekorationsarten, Bedeckungsgraden und insbesondere für volldekorierte Verpackungen für die wichtigsten Kunststofffraktionen im Gelben Sack.

2 METHODIK

Im Rahmen des Projektes *circPLAST-mr* wurde eine umfangreiche Charakterisierung der getrennt gesammelten Leichtverpackungen (LVP) in der Modellregion Steiermark (Graz - urban, Kapfenberg - intermediär und Liesingtal - ländlich) durchgeführt. Die Probenahme erfolgte gemäß dem technischen Bericht CEN/TR 15310 an Umladestationen im zweimonatigen Abstand von Jänner bis November 2023. Anschließend wurden die Proben im Labor hinsichtlich unterschiedlichster Merkmale (u.a. Material, Verpackungsform, Anwendung) charakterisiert. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Regionen Österreichs wurde anhand zusätzlicher Validierungsproben aus anderen österreichischen Bundesländern überprüft. Details zur Probenahmen- und Charakterisierungskampagne sind in Kuhn et al. (2026) umfassend beschrieben.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Zusammensetzung der LVP-Fraktion für Österreich ist in Kuhn et al. (2026) detailliert nachzulesen. Der vorliegende Beitrag fokussiert ausschließlich auf die Auswertung der gewonnenen Daten hinsichtlich der Dekorationselemente auf starren Verpackungen (Rigids).
In diesem Zusammenhang stellt der Bedeckungsgrad des Hauptverpackungskörpers für die Sortierung ein wesentliches Kriterium dar. In Abb. 1 sind daher die Anteile an Verpackungen für die vier Bedeckungsgrade 100 % (= 1.0), 75 % (= 0,75), 50 % (= 0,5), 25 % (=0,25) und ohne Dekoration (= 0,0) für die vier Hauptfraktionen in LVP (HDPE, PET, PP und PS) dargestellt. Aus den Daten geht hervor, dass insbesondere die Fraktionen HDPE und PP vermehrt höhere Bedeckungsgrade aufweisen, aber in allen Fraktionen vollbedeckte Verpackungen zu finden sind. Die Mengen in Österreich für diese vollbedeckten Verpackungen betragen: Für HDPE 513,8 t/a, für PET 3228,8 t/a, für PP 918,2 t/a und für PS 256,9 t/a.

Abb. 2 zeigt sehr deutlich, welche Dekorationsarten hauptsächlich für welche Materialien der Hauptverpackungskörper und bei welchen Bedeckungsgraden zum Einsatz kommen. Papierlabels sind bei PS bei allen Bedeckungsgraden die überwiegende Dekorationsart. In-Mould-Etiketten sind v.a. für PP bei mittleren Bedeckungsgraden (50% bzw. 75 %) häufig zu finden. Kunststoff-Dekorationen sind für alle Materialien des Hauptverpackungskörpers und für alle Bedeckungsgrade gängig. Insbesondere in der Kategorie Verpackungen mit vollflächiger Dekoration (100 % Bedeckungsgrad) spielen in erster Linie Papier und Kunststoff eine tragende Rolle. Bei letzterem handelt es sich im Regelfall um volldekorierte Verpackungen mit Kunststoffsleeves (Full Body Sleeves), wobei sich die Mengen in Österreich für PP auf 478,9 t/a, für HDPE auf 513,0 t/a, für PS auf 71,8 t/a und für PET auf 3206,3 t/a belaufen.
Für vollflächig bedeckte starre Verpackungen (100 % Bedeckungsgrad) kommen in erster Linie Flaschen und Becher zum Einsatz (vgl. Abb. 4), wobei nahezu alle Flaschen mit einer Dekoration aus Kunststoff (Sleeve) versehen sind. Bei den Bechern hingegen gibt es auch einen größeren Anteil an Papierdekorationen für Hauptverpackungskörper aus PP und PS. In-Mould Etiketten sind in geringen Anteilen ebenfalls für alle Materialarten vertreten.

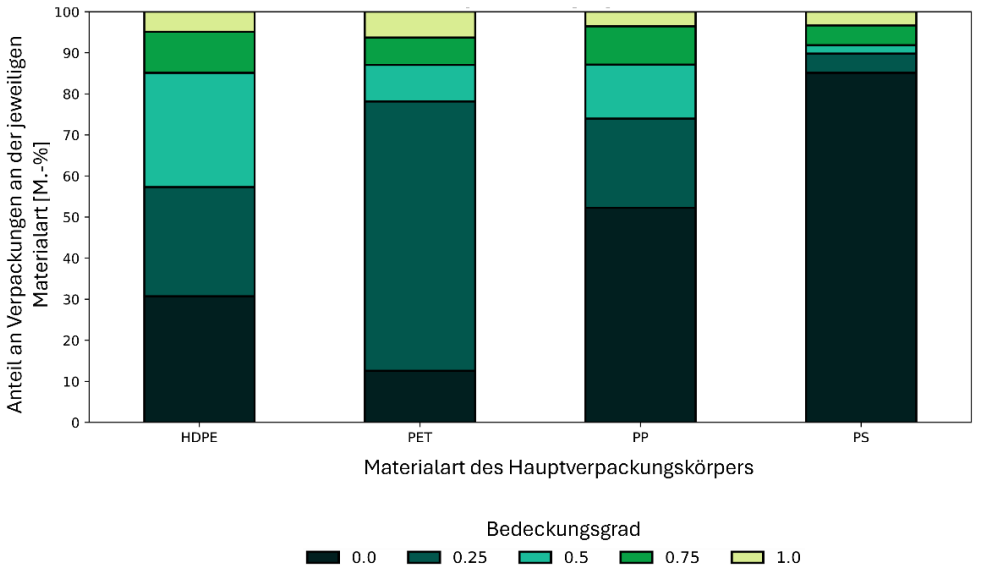


Abb. 1: Anteil an Verpackungen mit unterschiedlichen Bedeckungsgraden der Dekorationselemente für verschiedene Materialarten des Hauptverpackungskörpers

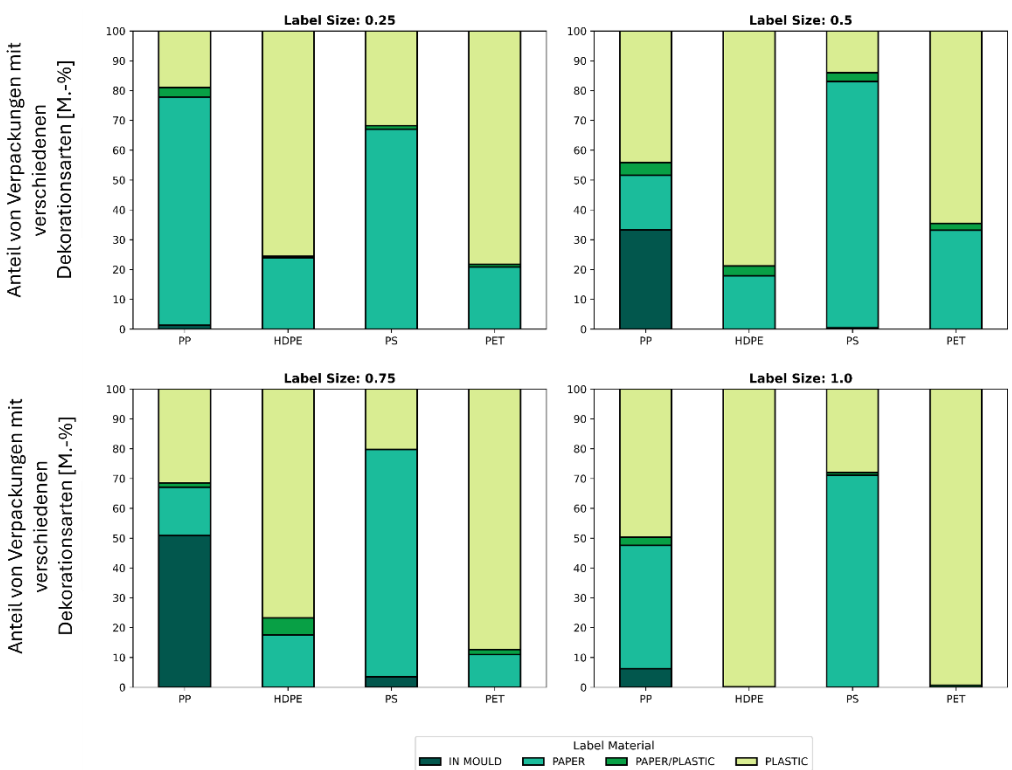


Abb. 2: Anteil von Verpackungen mit verschiedenen Dekorationsarten für verschiedene Materialarten und Bedeckungsgrade

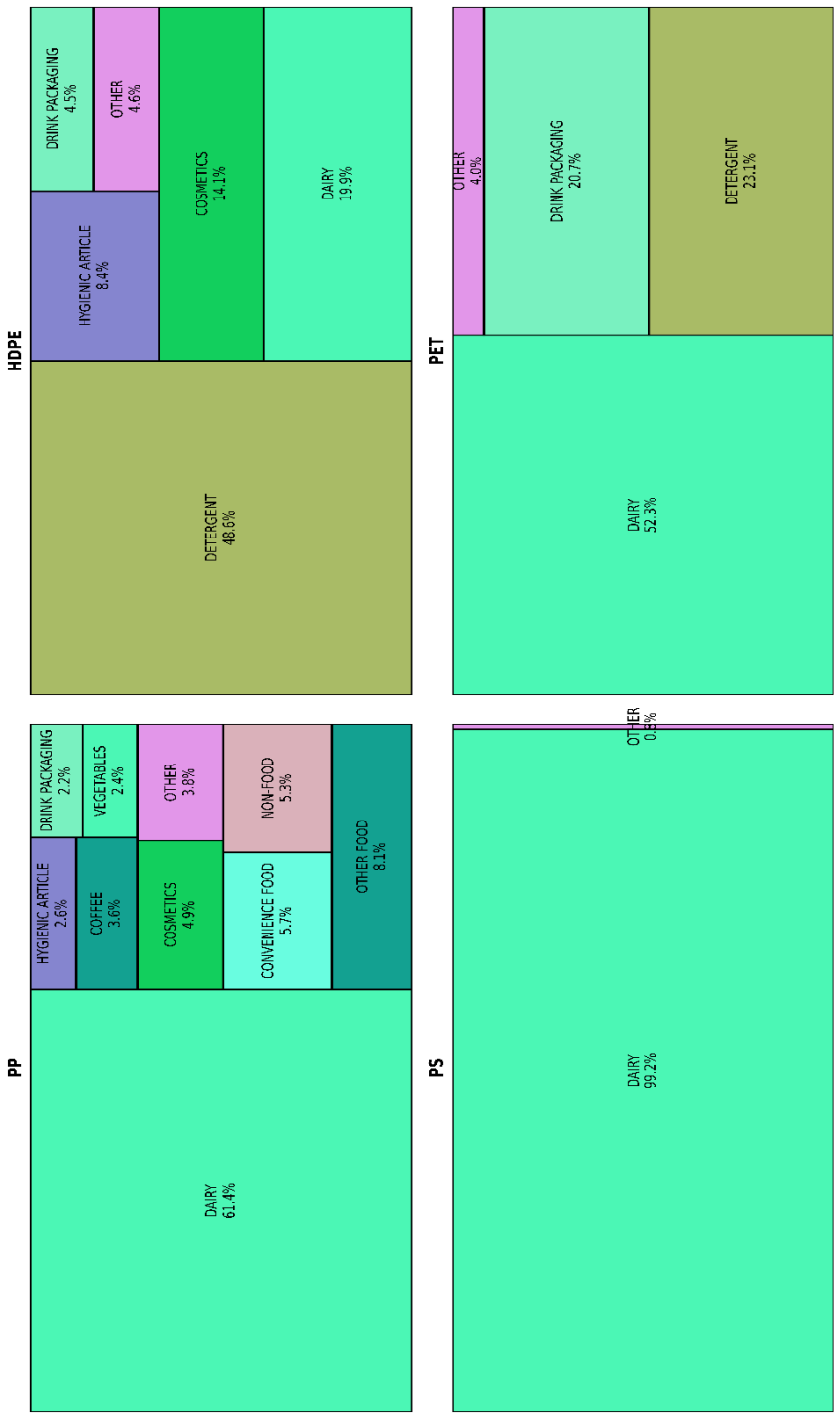


Abb. 3: Hauptanwendungsbereiche (Produktkategorien) für volldekorierte Verpackungen nach Materialart des Hauptverpackungskörpers

Die Hauptanwendungsfelder für volldekorierte Verpackungen (vgl. Abb. 3) sind Milchprodukte für die Hauptverpackungskörper aus PP, PET und PS. Bei HDPE als Hauptverpackungskörper ist das größte Anwendungsgebiet Wasch- und Reinigungsmittel, erst dann folgen Milchprodukte.
Für PP ist der Anteil an Nicht-Lebensmittelverpackungen bei volldekorierten Verpackungen mit 5,3 % gering. Noch geringer fällt dieser Anteil bei PS aus, bei dem der überwiegende Anteil ohnehin auf Joghurtbecher mit Papierbanderolen zurückzuführen ist. Auch bei PET sind mehr als 73 % dem Lebensmittelsegment zuzuordnen. Lediglich bei HDPE ist der Anteil an Nicht-Lebensmittelanwendungen > 71,1 %.

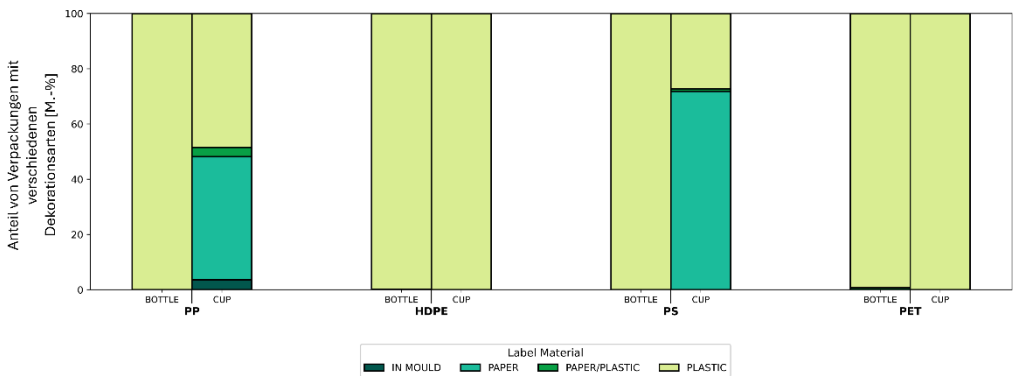


Abb. 4: Anteil der verwendeten Dekorationsarten bei Verpackungen mit Bedeckungsgraden von 100 % in Bezug zum Material des Hauptverpackungskörpers und der Verpackungsform

Einige volldekorierten Verpackungen (Bedeckungsgrad 100 %) enthalten einen Hinweis für Konsument:innen zur Abtrennung der Dekoration (z.B. des Sleeve), um die Sortierbarkeit zu erhöhen. Aus der durchgeführten LVP-Charakterisierung und der damit erhobenen Daten konnten auch Tendenzen zum Abtrennverhalten von Konsument:innen für diese Produkte im Rahmen des Entsorgungsprozesses für zwei charakteristische Produktgruppen – Verpackungen für Milchprodukte und Verpackungen für Putz- und Reinigungsmittel – abgeleitet werden.
Bei Putz- und Reinigungsmitteln wurden die Dekorationselemente (z.B. Sleeve) von Flaschen bei rund 37,3 % der HDPE- und 7,3 % der PET-Hauptverpackungskörper entfernt. Bei Dekorationselementen von Bechern waren es für PP rund 42,4 % in dieser Produktkategorie.
Bei Verpackungen für Milchprodukte wurden bei Flaschen rund 33,7 % für HDPE-, 55,1 % für PS- und 2,5 % für PET-Hauptverpackungskörper entfernt. Bei den Bechern waren es 35,6 % für Hauptverpackungskörper aus PP, 52,8 % bei PS und 53,9 % bei PET.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die Ergebnisse zeigen, dass vollflächig dekorierte, starre Verpackungen durchaus einen relevanten Anteil im LVP-Strom darstellen. Entgegen ihrem negativen Ruf bringen abtrennbare vollgesleevte Verpackungen durchaus hochwertige Recyclingmaterialien (unbedruckte Hauptverpackungskörper) mit und bieten gleichzeitig eine große Fläche für Produkt- und Marketinginformationen.
Aus dieser Motivation heraus wurde das laufende Forschungsprojekt „SLEEVE“ entwickelt. Projektpartner sind Hochschule Campus Wien, Montanuniversität Leoben, TU Wien, CCL Label GmbH, Spar Österreichische Warenhandels-AG und Circular Analytics TK GmbH.
Das Projekt „SLEEVE“ verfolgt das übergeordnete Ziel, Designvorgaben für gesleevte starre Kunststoffverpackungen zu entwickeln, die die Sortierbarkeit und Recyclingfähigkeit dieser Verpackungen erhöhen. Zum einen wird derzeit eine großangelegte Studie der am Markt befindlichen vollgesleevten Verpackungen durchgeführt, um einen Überblick über die verwendeten Materialkombinationen und Anwendungsgebiete zu schaffen. Zum anderen werden weitere

manuelle Sortier- und Charakterisierungskampagnen durchgeführt, um das tatsächliche Sleeve-Abtrennverhalten durch Konsument:innen bei der Entsorgung der Verpackungen detaillierter zu untersuchen. Auch die Erfassung von Kommunikationselementen zur Sleeve-Abtrennung durch Konsument:innen und die Ableitung von Empfehlungen für diese sind ein wesentlicher Teil des Projektes.

FÖRDERUNG

Dieser Beitrag wurde im Rahmen von zwei Forschungsprojekten erstellt:

- **circPLAST-mr** wurde vom österreichischen Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) sowie von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Rahmen des Programms „Energie der Zukunft – Kreislaufwirtschaft 2021 (KP)“ (Fördernummer 889843) gefördert. Darüber hinaus möchten wir der Altstoff Recycling Austria GmbH für die Bereitstellung der Proben sowie den Studierenden danken, die die Proben mit großem Engagement charakterisiert haben: Jessica Brantner, Anfisa Drnec, Sebastian Entler, Thomas Fink, Isabella Gappmayer, Alessandro Giorgione, Elias Grath, Abdullah Gürel, Felix Scheidl, Leonie Wachtler und Vanessa Zmug.
- **SLEEVE** wird vom Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur sowie von der Österreichischen Forschungsförderungesgesellschaft (FFG) im Rahmen des Programms „Ressourcenwende“ (Fördernummer: 999923022) gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

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, Vol. 207, 107599, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107599.

Kuhn, N.E., Koinig, G., Kloeckl, A., Stipanovic, H., Spies, A.M., Schuch, D., Fischer, 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, Volume 229, 108861, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2026.108861.

PPWR (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 (2025).

van Eygen, E., Laner, D., Fellner, J. (2018). Circular economy *of plastic packaging: current practice and perspectives in Austria.* Waste Manag. 72, 55–64. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.040.

KONTAKT

Ass.Prof. DI Dr.mont. Alexia Tischberger-Aldrian
Alexia.tischberger-aldrian@unileoben.ac.at
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben

CirMat – Kreislauffähige Matratze und Abfallsammelsystem

Thomas Senfter[1], Birgit Christandl[1], Manuel Berger[1], David Hackl[1], Maximilian Larch[1], Jakob Germann[1], Roman Eberharter[2], Matthias Zitterbart[3] & Martin Pillei[1]
[1)] MCI - Die Unternehmerische Hochschule, Innsbruck, Österreich
[2)] Betten Eberharter GmbH, Ramsau/Zillertal, Österreich
[3)] DAKA Entsorgungsunternehmen GmbH & Co. KG., Schwaz, Österreich

KURZFASSUNG: Herkömmliche Matratzen stellen durch ihre verklebten Schichten ein massives Entsorgungsproblem dar und enden meist in der Verbrennung. Das Kooperationsprojekt zwischen dem MCI, Betten Eberharter und der DAKA adressiert dies durch die Neugestaltung des Matratzen-Lebenszyklus im Sinne der Kreislaufwirtschaft. Der technologische Kern ist eine klebstofffreie Verbindungstechnologie für Schaumstoffschichten. Anstelle von Kleber kommen mechanische Verzahnungen zum Einsatz, die ein sortenreines Trennen ermöglichen. Die Optimierung dieser Geometrien erfolgt am MCI mittels numerischer FEM-Simulationen, um unauffälligen Liegekomfort zu gewährleisten. Zur Validierung der Prototypen errichtet Betten Eberharter ein Schlaflabor für Über-Nacht-Tests durch Kunden, deren Feedback in die Entwicklung zurückfließt. Den Stoffkreislauf schließt ein von DAKA entwickeltes Matratzen-Sammelsystem in einer Tiroler Pilotregion. Dieses Logistikkonzept stellt sicher, dass Altmatratzen erfasst und sortenrein zerlegt werden, um als Sekundärrohstoff neuen Produktionszyklen zuzufließen. Damit vereint das Projekt Technologieinnovation, Service und nachhaltige Entsorgungslogistik.

1 AUSGANGSLAGE UND PROBLEMSTELLUNG

Matratzen stellen weltweit eine der drängendsten und komplexesten Herausforderungen in der modernen Abfallwirtschaft dar. Nach dem Ende ihrer regulären Nutzungsdauer erweisen sie sich als massives Entsorgungsproblem, da der Großteil etablierter Modelle aus einem hochgradig heterogenen und irreversibel verklebten Materialverbund besteht. Typische Konstruktionen kombinieren Polyurethan-Schäume, viskoelastische Schäume, Latex, Textilfasern sowie gegebenenfalls metallische Federkerne. Die stoffliche Trennung dieser wertvollen Komponenten ist durch den flächendeckenden Einsatz industrieller, chemischer Klebstoffe wirtschaftlich und technisch nahezu unmöglich. (Arias Madero, Balmori Roiz, Basterra Otero, & Diaz Gonzalez, 2025)

Die direkte Konsequenz dieser Verklebung ist ein streng linearer Lebensweg. Da ein sortenreines Recycling der kontaminierten Schaumstoffe ausgeschlossen ist, endet die überwiegende Mehrheit aller ausgedienten Matratzen in der thermischen Verwertung (Müllverbrennung) oder auf Deponien (Faber & Gradus, 2025). Wertvolle, erdölbasierte Rohstoffe gehen der Wirtschaft dadurch dauerhaft verloren, was in direktem Widerspruch zu den Umweltzielen des EU Green Deals steht.

Genau an dieser Schnittstelle setzt das Kooperationsprojekt CirMat an. Das übergeordnete Ziel ist die grundlegende Neugestaltung des gesamten Lebenszyklus einer Matratze. Ausgehend von einem konsequenten zirkulären Produktdesign über eine erweiterte, serviceorientierte Nutzungsphase bis hin zu einem maßgeschneiderten, regionalen Entsorgungs- und Verwertungskonzept.

1.1 Klebstofffreie Verbindungstechnologien

Der technologische Hebel zur Überwindung der beschriebenen Recyclingbarriere liegt im vollständigen Verzicht auf klebende Bindemittel. Durch die Nutzung innovativer mechanischer Steck- und Verzahnungsverbindungen können die unterschiedlichen Schaumstoffschichten stabil gefügt werden. Die primäre Forschungsaufgabe besteht darin, spezifische Geometrien zu identifizieren,

die einerseits den extremen dynamischen Lasten während der mehrjährigen Nutzung standhalten, sich andererseits jedoch beim Recycling ohne mechanischen oder chemischen Zusatzaufwand sauber voneinander trennen lassen.

2 PRODUKTENTWICKLUNG

Der technologische Kern des Projekts basiert auf einer vollständigen Abkehr von traditionellen chemischen Fügeverfahren. Am Management Center Innsbruck (MCI) wird hierfür eine neuartige, potenziell patentfähige Verbindungstechnologie für Schaumstoffschichten erforscht. Statt Klebstoffe einzusetzen, kommen passgenaue, rein mechanische Verzahnungsgeometrien zum Einsatz. Diese Geometrien sind so konstruiert, dass die einzelnen Schichten im alltäglichen Gebrauch rutschfest und formstabil ineinandergreifen, nach der Demontage am Lebensende jedoch mit einfachen Handgriffen werkzeugfrei und vollkommen sortenrein separiert werden können.

2.1 Numerische Simulation

Zur präzisen Auslegung, Bewertung und Optimierung dieser mechanischen Verbindungen werden hochentwickelte numerische Finite-Elemente-Methode-Simulationen (FEM) herangezogen. Die Simulationen modellieren das nichtlineare viskoelastische Materialverhalten der Schaumstoffe unter realen Belastungsszenarien. Dies erlaubt es, die Spannungsverteilungen und Verformungen innerhalb der Verzahnungszonen exakt vorherzusagen. Technologisch wird so im Vorfeld sichergestellt, dass die Verbindungsstellen haptisch vollkommen unauffällig sind.
Im Rahmen der simulationsgestützten Produktentwicklung werden folgende Kernbereiche strukturiert bearbeitet:

- **Berechnung und Simulation:** Finite-Elemente-Modellierung der Kontaktmechanik im Schaumstoffverbund.
- **Materialeigenschaften:** Definition der elastischen und dämpfenden Rahmenbedingungen unterschiedlicher Schaumstoffdichten.
- **Variantenstudie Geometrie:** Systematischer Vergleich verschiedener Verzahnungsgeometrien.
- **Technologieentwicklung:** Konstruktive Umsetzung der simulativen Erkenntnisse in physikalische Prototypen.
- **Vergleich mit Klebstoffoptionen:** Benchmarking der mechanischen Festigkeit gegenüber klassischen Schmelzklebern.
- **Schutzrechtportfolio:** Strategische Absicherung der entwickelten Geometrien durch Patent- und Gebrauchsmusteranmeldungen.

3 SCHLAFLABOR

Um die theoretische Markttauglichkeit abzusichern und die Akzeptanz der Neuentwicklung durch den Endkunden lückenlos zu belegen, beinhaltet das Projekt CirMat eine engmaschige, iterative Phase aus Prototypenfertigung und realer empirischer Testung. Zu diesem Zweck errichtet die Betten Eberharter GmbH eine wissenschaftlich begleitete Schlaflabor-Infrastruktur.

3.1 Infrastruktur-Entwicklung

Entscheidend für den Projekterfolg ist die Abkehr vom herkömmlichen, oberflächlichen „Probeliegen“ im klassischen Facheinzelhandel. Im neu errichteten Labor absolvieren ausgewählte Testpersonen standardisierte Übernachtungstests unter kontrollierten, realen Bedingungen. Die empirische Evaluierung beruht auf einem dualen Validierungsansatz:

- **Subjektive Daten:** Systematische Erfassung des individuellen Schlafempfindens, des haptischen Komforts und des subjektiven Erholungsfaktors mittels detaillierter Fragebögen jeweils am nächsten Morgen.
- **Objektive Validierung:** Kontinuierlicher Abgleich und Korrelation der subjektiven Nutzerberichte mit den zuvor berechneten numerischen FEM-Simulationsdaten.
- **Iterativer Optimierungsprozess:** Das gesammelte Kundenfeedback fließt unmittelbar in die Entwicklungsabteilung des MCI und die handwerkliche Fertigung bei Betten Eberharter zurück, um Geometrien und Schichtanordnungen kontinuierlich zu verfeinern.

Die Meilensteine im Arbeitspaket Schlaflabor gliedern sich wie folgt:
- Umfassende Best-Practice-Analyse existierender ergonomischer Testzentren.
- Konzeption und detaillierte Ablaufplanung der empirischen Schlafanalytik.
- Physischer Aufbau und messtechnische Inbetriebnahme des Labors bei Betten Eberharter.
- Durchführung standardisierter Schlafanalysen zur Ermittlung der optimalen, kreislauffähigen Matratzenkonfiguration.

4 LOGISTIK UND SAMMELSYSTEM

Ein zirkuläres Produktkonzept kann seine ökologische Wirkung nur dann entfalten, wenn die Post-Consumer-Materialien nach Ablauf der Nutzungsdauer effizient, verlustfrei und unbeschadet in den regionalen Stoffkreislauf zurückgeführt werden. An dieser Stelle bringt das zertifizierte Entsorgungsunternehmen DAKA GmbH & Co KG seine weitreichende Logistik- und Recyclingexpertise ein. Parallel zur Produktentwicklung wird ein maßgeschneidertes, separiertes Matratzenabfallsammelsystem konzipiert und prototypisch umgesetzt.

4.1 Pilotregion

Die Implementierung und Erprobung des Sammelsystems erfolgt in einer repräsentativ ausgewählten Tiroler Pilotregion. Die primäre logistische und technische Herausforderung besteht darin, Altmatratzen konsequent trocken, sauber und witterungsgeschützt zu erfassen. Feuchtigkeit, Schimmelbildung und grobe Verschmutzungen im klassischen Sperrmüllcontainer machen eine hochwertige stoffliche Verwertung der Polyurethan-Schaumstoffe unmöglich. Dank des im Projekt realisierten klebstofffreien Verzahnungsdesigns können die sauber erfassten Matratzen im DAKA-Entsorgungszentrum ohne den Einsatz chemischer Hilfsmittel sortenrein in ihre Einzelkomponenten zerlegt werden. Die Sekundärrohstoffe stehen im Anschluss direkt für neue Produktionszyklen zur Verfügung.

Das logistische Gesamtsystem der DAKA gliedert sich in folgende strategische Säulen:
- **Kommunikationssystem:** Gezielte Aufklärung und Aktivierung der Bevölkerung in der Pilotregion zur korrekten Abgabe.
- **Logistiksystem:** Bereitstellung spezialisierter, feuchtigkeitsgeschützter Sammelbehälter an kommunalen Recyclinghöfen.
- **Technologierecherche:** Evaluierung automatisierter Demontage- und Zerkleinerungsverfahren für zirkuläre Schäume.
- **Logistik- und Verwertungsstudie:** Detaillierte Wirtschaftlichkeits- und Ökobilanzierung des Materialrückflusses.
- **Evaluierung und Skalierung:** Systematische Ableitung von Optimierungspotenzialen für die spätere Umsetzung.

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt CirMat demonstriert im Rahmen der Fachkonferenz Recy & DepoTech 2026 den aktuellen Projektstand und belegt, wie interdisziplinäre Zusammenarbeit die strengen ökologischen Anforderungen der Kreislaufwirtschaft mit handwerklichen Qualitätszielen und einem messbaren Kundennutzen in Einklang bringt. Als konkrete, validierte Ergebnisse liefert das Konsortium:

- **Produktinnovation:** Ein marktreifes, optimiertes Matratzendesign, das auf wissenschaftlichen Simulationen basiert und vollständig recycelbar ist.
- **Infrastruktur:** Ein voll funktionsfähiges Schlaflabor bei Betten Eberharter, das als dauerhafte Dienstleistungsinnovation zur Kundenberatung und Produktentwicklung genutzt wird.
- **Technologie & IP:** Eine patentierte bzw. schutzrechtsfähige Verzahnungsgeometrie zur Verbindung von Schaumstoffen ohne chemische Bindemittel.
- **Systemlösung:** Ein validiertes Logistikkonzept zur Matratzenrücknahme in einer Pilotregion, inklusive der notwendigen Kommunikationsmaßnahmen zur Sensibilisierung der Bevölkerung.

Das synergetische Zusammenspiel aus der akademischen Forschungskompetenz des MCI, der Fertigungs- und Marktexperitse von Betten Eberharter und dem ausgeprägten Logistik-Knowhow der DAKA schließt den Stoffkreislauf einer bisher hochgradig problematischen Abfallfraktion. CirMat zeigt damit einen wegweisenden, skalierbaren Pfad für nachhaltige Produkt-Service-Systeme in der modernen europäischen Abfall- und Ressourcenwirtschaft auf.

LITERATURVERZEICHNIS

Arias Madero, J., Balmori Roiz, J., Basterra Otero, L.-A., & Diaz Gonzalez, I. (2025). Discarded Mattresses: From Environmental Problem to Recoverable Resource. Sustainability, 17(18), S. 8371. doi:https://doi.org/10.3390/su17188371

Faber, B., & Gradus, R. (2025). Recycling of Discarded Mattresses Through Extended Producer Responsibility: Is It More Cost-Effective than Incineration? Sustainability, 17(12), S. 5542. doi:https://doi.org/10.3390/su17125542

KONTAKT

Dr. Thomas Senfter
Thomas.Senfter@mci.edu
Fluids & Mechanics / Leiter Forschungsschwerpunkt
MCI Internationale Hochschule GmbH
https://www.mci.edu

Kooperatives Zusammenwirken von Vorhabenträger und Behörde – ein Beitrag zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren

Ulrich Stock
[1)] ehemals Landesamt für Umwelt, Brandenburg, Deutschland

KURZFASSUNG: Die Dauer von Genehmigungsverfahren für Infrastruktureinrichtungen und Industrieanlagen wird durch „harte“ (objektive) Faktoren und „weiche“ (subjektive) Faktoren bestimmt. Dies wird am Beispiel von Planfeststellungsverfahren für Deponien beleuchtet. Die Dauer der Verfahren wird dargestellt. Es werden die harten Faktoren beschrieben. Schwerpunkt des Beitrags ist die Beeinflussung der Verfahrensdauer durch die weichen Faktoren. Zum Abschluss werden Formen des Zusammenwirkens von Behörde und Vorhabenträger beschrieben.

1 EINLEITUNG

Die Dauer von Genehmigungsverfahren wird durch „harte“ (objektive) Faktoren und „weiche“ (subjektive) Faktoren bestimmt. „Harte“ Faktoren sind solche, die die Bearbeiter in Behörde und Vorhabenträger nicht beeinflussen können: die genehmigungsrechtlichen Vorgaben zur Verfahrensführung, die fachrechtlichen Anforderungen an die Anlagenkonfiguration und die vorhandenen personellen und materiellen Kapazitäten. In der Diskussion um die Beschleunigung von Genehmigungsverfahren stehen diese Faktoren im Fokus. Dabei wird übersehen, dass die „weichen“ Faktoren, einen großen Einfluss auf die Verfahrensdauer haben können. Unter die weichen Faktoren fallen die Fähigkeit von Behörde und Vorhabenträger zu Kooperation, Kommunikation und Koexistenz. Diese Fähigkeiten können nicht durch Gesetze und Paragrafen geschaffen werden, sie äußern sich in Motivation und Haltung der Bearbeiter. Am Beispiel abfallrechtlicher Planfeststellungsverfahren für Deponien wird diese Problematik näher beleuchtet.

2 DAUER VON PLANFESTSTELLUNGSVERFAHREN FÜR DEPONIEN

Wie lange dauern Planfeststellungsverfahren für Deponien in Deutschland? Dazu wurde das UVP-Portal ausgewertet. Bei Manuskriptabgabe waren dort 102 Planfeststellungsverfahren aufgeführt. Davon waren 56 abgeschlossen und auswertbar. Als Dauer des Verfahrens wurde der Zeitraum von der ersten Antragstellung bis zur Entscheidung gewertet. Vorgespräche zwischen Behörde und Vorhabenträger oder Scopingverfahren flossen (noch) nicht ein. Es wurden die Zeiten nicht gewertet, die für ein dem Verfahren vorausgegangenes anderes Verfahren (Ablehnung durch Behörde, Gerichtsverfahren) aufgewendet wurde. Unter diesen Aspekten betrug die durchschnittliche Dauer der im UVP-Portal aufgeführten Verfahren 34,4 Monate. Die Spreizung ist aber groß (siehe Tabelle1). Von den noch nicht abgeschlossenen Planfeststellungsverfahren laufen 13 länger als 4 Jahre und von denen 7 länger als 8 Jahre.
Es würde sich lohnen, der Frage nachzugehen, worin die Ursachen für die enormen Unterschiede der Verfahrensdauer liegen. Deponieklasse? (Nein) Werden die Verfahren von oberen oder unteren Behörden geführt? (Datenlage unklar) Was machen Behörde und Vorhabenträger die Verfahren nach 2 Jahren abschließen, anders als Behörden und Vorhabenträger, die mehr als 8 Jahre bis zum Verfahrensabschluss benötigen?

Tab. 1: Dauer von Planfeststellungsverfahren von Deponien

Dauer der Verfahren	Anzahl
Bis zu 12 Monaten	5
Länger als 12 bis 24 Monate	19
Länger als 24 bis 48 Monate	22
Länger als 48 bis 96 Monate	7
Länger als 96 Monate	2

3 DIE HARTEN UND DIE WEICHEN FAKTOREN

3.1 Die harten Faktoren

3.1.1 Genehmigungsrechtliche Anforderungen an die Durchführung des Verfahrens

Planfeststellungsverfahren werden nach §§ 72 bis 78 des Verwaltungsverfahrensgesetzes geführt. Diese Regelungen haben sich in den letzten Jahren kaum verändert. Wesentliche Neuerung ist der Ersatz von § 27a durch §§ 27a bis 27c: Die elektronische Auslegung von Antragsunterlagen und der Ersatz des Erörterungstermins durch eine Onlinekonsultation wurden dauerhaft im Verfahrensrecht verankert.
Mit den harten Faktoren habe ich mich an anderer Stelle ausführlich auseinandergesetzt. Hier nur so viel: Zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren sollten diejenigen Verfahrensschritte gestrichen werden, bei denen der Beitrag zur Erkenntnis über die Genehmigungsfähigkeit in keinem Verhältnis zum Aufwand steht. Das sind die Umweltverträglichkeitsprüfung (leider europarechtlich vorgeschrieben) und der Erörterungstermin. Im Immissionsschutzrecht wurde die Durchführung des Erörterungstermins weitestgehend in das Ermessen der Behörde gestellt.
Aber auch der harte Faktor hat weiche Elemente. So können die Vorstellungen darüber, ob ein Antrag für die Einleitung der Öffentlichkeitsbeteiligung ausreichend vollständig ist, weit auseinandergehen. Einen Überblick über die Zeit, die von der Antragseinreichung bis zur Einleitung der Öffentlichkeitsbeteiligung vergeht und die von der Vollständigkeitsprüfung bestimmt wird, enthält Tabelle 2. Im Durchschnitt beträgt dieser Zeitraum 12,1 Monate. Im Immissionsschutzrecht ist für die Vollständigkeitsprüfung ein Zeitraum von einem Monat vorgesehen. Das Verwaltungsverfahrensgesetz enthält keine Vorgabe für die Dauer der Vollständigkeitsprüfung.
Es würde sich auch hier lohnen, die Ursachen für die große Spreizung des Zeitraums, der von der Antragstellung bis zum Beginn der öffentlichen Auslegung vergeht, zu klären.

Tab. 2: Zeitraum von der Antragstellung bis zur öffentlichen Auslegung (UVP-Portal)

Zeitraum	Anzahl der Verfahren
Bis 2 Monate	25
Mehr als 2 bis 6 Monate	23
Mehr als 6 bis 12 Monate	17
Mehr als 12 bis 24 Monate	18
Mehr als 24 bis 48 Monate	10
Mehr als 48 Monate	3

3.1.2 Fachrechtliche Anforderungen an die Errichtung und den Betrieb von Deponien

Maßgebliche Rechtsnorm ist die Deponieverordnung. Dieser „harte“ Faktor enthält zahlreiche „weiche“ Elemente: Die Deponieverordnung beinhaltet viele Regelungen, in denen dem Vorhabenträger Gestaltungsspielraum und der Behörde Ermessen eingeräumt wird. Des Weiteren wird der Stand der Technik durch eine Fülle weiterer Regelungen und Normen mit unterschiedlichen Verbindlichkeitsgraden bestimmt. Das Deponiewesen nimmt Anleihen bei anderen technischen Fachgebieten (Wasser- und Straßenbau), deren Regelungen keine Vorgaben für Deponien enthalten. Es werden Deponien errichtet, die nicht der idealtypischen Deponie-Konfiguration der Deponieverordnung entsprechen. Die Schaffung von Gestaltungs- und Ermessensspielräumen berücksichtigt, dass jede Deponieerrichtung einen Einzelfall darstellt mit spezifischen Standortgegebenheiten und Besonderheiten der technischen Ausführung. Wenn es zwischen Behörde und Vorhabenträger unterschiedliche Vorstellungen über Ausnutzung der Gestaltungs- und Ermessensspielräume gibt, kommt es zu Konflikten. Die Dauer eines Planfeststellungsverfahrens wird wesentlich davon bestimmt, wie Behörde und Vorhabenträger mit diesen Konflikten umgehen.

3.1.3 Personelle und materielle Ressourcen

Dieses Thema (Stichworte: Personalausstattung, Qualifikation, Digitalisierung) kann hier nicht behandelt werden.

4 STRATEGIEN DER KONFLIKTLÖSUNG

In Genehmigungsverfahren für Deponien können Konflikte zwischen Behörde und Vorhabenträger entstehen. Die Konflikttheorie bietet Strategien für die Lösung von Konflikten an.

- Flucht
- Unterwerfung
- Verhandlung mit dem Ziel eines Kompromisses
- Delegation der Konfliktlösung auf einen Dritten
- Kampf mit dem Ziel der Vernichtung oder der Unterwerfung des Konfliktgegners

Diese martialisch klingenden Begriffe müssen für unsere Thematik übersetzt werden.

Flucht: Der Vorhabenträger kann erwägen, in den Zuständigkeitsbereich einer anderen Behörde zu „fliehen". Jedoch: Der öffentlich-rechtliche Deponiebetreiber muss in seinem Entsorgungsgebiet bleiben. Der private Deponiebetreiber errichtet die Deponie auf seinem eigenen Grundstück. Der Behörde steht die Möglichkeit der Flucht nicht zur Verfügung.
Unterwerfung: Der Vorhabenträger kann ein hohes Interesse an einer schnellen Verfahrensabwicklung haben und sich deshalb den Forderungen der Behörde unterwerfen.
Die umgekehrte Variante ist zwar grundsätzlich möglich, ein Beispielsfall ist mir nicht bekannt.
Verhandlung mit dem Ziel des Kompromisses: Behörde und Vorhabenträger suchen im Rahmen der rechtlich vorhandenen Gestaltungs- und Ermessensspielräume nach einer für beide Seiten befriedigenden Lösung.
Delegation der Konfliktlösung auf einen Dritten: Behörde und Vorhabenträger können sich auf einen Gutachters verständigen, dessen Votum als Entscheidungsgrundlage verwendet wird. Als „Dritter" kann die die Verwaltungsgerichtsbarkeit gesehen werden. Die Klage vor dem Verwaltungsgericht steht dem Vorhabenträger als Strategie immer zur Verfügung, ist jedoch sehr zeitaufwendig. Die Behörde muss aber diese Möglichkeit immer ins Kalkül ziehen.
Kampf: Beharrt die Behörde auf „Unterwerfung", kann der Vorhabenträger erwägen, sich auf einen „Kampf" einzulassen. Die Behörde muss nicht kämpfen, sie kann sich per Bescheid durchsetzen. Kampf kann heißen, die Behörde zu bewegen, sich auf andere Konfliktlösungen als Unterwerfung einzulassen, oder den Kampf um die Durchsetzung seines Antrags zu führen. „Kampfmittel" sind die fachliche Diskussion, Gutachten, rechtlicher oder politischen Druck o.ä.

5 DIE WEICHEN FAKTOREN

Die Interaktion zwischen Behörde und Vorhabenträger wird dadurch bestimmt, dass der der Vorhabenträger von der Behörde etwas erwartet (die Genehmigung für sein Vorhaben). Im Prozess der Konfliktlösung übernimmt der Vorhabenträger daher eher den aktiven Part. Die Last der Entscheidung über die Konfliktlösungsstrategie liegt überwiegend auf der Seite des Vorhabenträgers. Ausnahmen: Vorhaben, an den die politischen Ebenen ein Interesse haben.
In welcher Art und mit welchem Zeitaufwand Konflikte zwischen Behörde und Vorhabenträger gelöst werden können, hängt vom Umgang mit den weichen Faktoren ab.

5.1 Kooperation

Die Fähigkeit zur Kooperation beschreibt die Bereitschaft von Behörde und Vorhabenträger, jeder in seiner Rolle, auf den gemeinsamen Erfolg hin zu arbeiten. Es besteht Übereinstimmung, dass der Erfolg in der Realisierung des Vorhabens (der Errichtung der Deponie) besteht. Die

Möglichkeiten zur Kooperation besteht aber nur in den Grenzen der Genehmigungsfähigkeit des Vorhabens, also im Rahmen der rechtlichen Gestaltungs- und Ermessensspielräumen. Bei unüberwindbaren Genehmigungshindernissen hilft Kooperationsbereitschaft nicht weiter.

5.2 Kommunikation

Die Fähigkeit zur Kommunikation beschreibt die Bereitschaft von Behörde und Vorhabenträger zum ständigen Informationsaustausch: unverzügliche Weiterleitung von Stellungnahmen, Informationen über den Fortgang des Genehmigungsverfahrens, auftretender Komplikationen, Planungsänderungen etc. Notwendiger Bestandteil der Kommunikation in Konfliktfällen ist die Fähigkeit und Bereitschaft, der anderen Seite die eigenen Auffassungen nachvollziehbar zu begründen. Gestörte Kommunikation führt zu erheblichen Verfahrensverzögerungen.

5.3 Koexistenz

Die Fähigkeit zur Koexistenz beschreibt die Fähigkeit von Behörde und Vorhabenträger, den Anderen in seinen jeweiligen Aufgaben und sowie in seinen Grenzen zu akzeptieren. Die Kooperation zwischen Behörde und Vorhabenträger ist keine Kooperation auf Augenhöhe. Der Vorhabenträger tritt in der Rolle des „Bittstellers“ auf, die Behörde in der Rolle des „Gebenden“. Die Kunst der Koexistenz besteht insbesondere darin, dies nicht zum bestimmenden Element der Kooperation zu machen. Die Grenze der Behörde liegt bei ihren rechtlichen Möglichkeiten. Es kann nichts von der Behörde verlangt werden, dass außerhalb der Ermessensgrenzen liegt. Die Grenze des Vorhabenträgers liegt bei der Wirtschaftlichkeit seines Vorhabens. Es kann vom Vorhabenträger nicht erwartet werden, ein nicht wirtschaftliches Vorhaben zu realisieren.

5.4 Indizien für eine im Konfliktfall vorhandene Kooperationsbereitschaft

Ausdruck einer Kooperationsfähigkeit der Behörde ist die Bereitschaft, vorhandene Konflikte im Rahmen der Ausnutzung von Ermessensspielräumen durch „Verhandlungen mit dem Ziel eines tragbaren Kompromisses“ zu lösen. Dabei ist die Behörde auch bereit, Ermessensspielräume zugunsten des Vorhabenträgers auszunutzen. Im Gegenzug ist der Vorhabenträger bereit, bestimmte behördliche Anforderungen zu akzeptieren und höhere Aufwendungen zu betreiben, um der Behörde die Ermessensausübung zu erleichtern. Beharren Vorhabenträger und Behörde auf ihrer jeweiligen Auffassung, ist Kooperations-bereitschaft nicht vorhanden. Jede Seite beharrt darauf, dass sich die andere Seite ihren eigenen Forderungen unterwirft.

Ausdrücke mangelnder Kooperationsbereitschaft seitens des Vorhabenträgers sind auch:

- mangelhafte, unvollständige, nicht prüffähige Antragsunterlagen
- Drohungen mit Untätigkeitsklagen, Schadensersatzforderungen und politischem Druck schon zum Verfahrensbeginn.

6 KOOPERATIONSBEREITSCHAFT UND INDIVIDUELLE MOTIVATION

Lösungsorientierung und Grad der Kooperationsbereitschaft von Behörde und Vorhabenträger wird durch die individuell bei den Bearbeitern vorhandene Motivation bestimmt, mit denen diese Genehmigungsverfahren bearbeiten. Der Druck auf den Vorhabenträger, sich im Sinne des Verfahrenserfolgs kooperativ zu verhalten, ist sehr viel größer ist als der Druck auf die Behörde. Dem Vorhabenträger droht im Falle unkooperativen Verhaltens die Ablehnung seines Antrags, der Behörde droht bei unkooperativem Verhalten schlimmstenfalls eine Niederlage vor dem Verwaltungsgericht. Es kann sich also lohnen, bei den Bearbeitern zu hinterfragen, mit welcher Motivation sie an die Bearbeitung von Genehmigungsverfahren herangehen.
Hier einige denkbare Antworten:

Behörde:
(1) „Es bereitet mir Freude, mit anderen an der Realisierung von Vorhaben zu arbeiten."
(2)„Nach der letzten Umstrukturierung ist meine alte Arbeitsaufgabe entfallen. Ich wurde in das Abfallreferat versetzt. Dort bearbeite ich jetzt Planfeststellungsverfahren für Deponien."

Und hier einige denkbare Antworten von Bearbeitern auf der Seite der Vorhabenträger.
(1) „Die Genehmigung ist Voraussetzung für die Errichtung der Deponie. Sie schafft gesellschaftliche Anerkennung und entfaltet für den Vorhabenträger drittschützende Wirkung."
(2) „Ich möchte Anerkennung bei meinem Chef erhalten, in dem ich auf die Behörde Druck aufbaue, unseren Antrag schnell und nach den Wünschen des Vorhabenträgers zu bearbeiten"

Eine andere Frage ist die nach der Sichtweise der Bearbeiter auf die Bearbeiter auf der anderen Seite. Auch hier wieder einige denkbare Antworten.

Behörde:
(1) „Die Bearbeiter des Vorhabenträgers realisieren wichtige Infrastrukturobjekte."
(2) „Die Mitarbeiter des Vorhabenträgers nerven ständig mit neuen Ideen. Warum halten sie sich nicht an meine Vorgaben? Dann wäre alles viel einfacher und würde schneller gehen."

Vorhabenträger:
(1) „Die Behördenmitarbeiter sind für den Schutz der Umwelt auf der Basis der einschlägigen Gesetze zuständig und erfüllen damit eine wichtige gesellschaftspolitische Aufgabe.
(2) „Behördenmitarbeiter sind grundsätzlich faul und bequem. Sie müssen durch Druck auf Trab gebracht werden."

Der Leser ahnt: Die Antworten (1) stehen für Kooperationsbereitschaft („grün"), die bei den Antworten (2) eher bezweifelt werden muss („rot")

Wie wirkt sich nun das Aufeinandertreffen der unterschiedlichen Motivationslagen auf die Bearbeitungsdauer aus?

a) Behörden-grün trifft auf Vorhabenträger-Grün
   Auf beiden Seiten besteht Kooperationsbereitschaft. In dieser Konstellation ist zu erwarten, dass durch „Verhandlungen" in einem akzeptablen Zeitraum eine beiderseits akzeptable Lösung gefunden wird. Ein Automatismus besteht nicht. Auch das Ringen um eine Lösung kann zeitraubend sein.

b) Behörden-grün trifft auf Vorhabenträger-rot
   Äußert sich Vorhabenträger-rot durch Inkompetenz (fehlerhafte Antragsunterlagen) oder Sturheit bei der Durchsetzung eigener Vorstellungen, wird die Selbstmotivationsfähigkeit der Behörde zu Kooperation übermäßig strapaziert. Es fällt der Behörde nicht schwer, den Konflikt durch Ablehnung des Antrags zu bewältigen. Der Vorhabenträger steht in der Verantwortung, Ordnung in seinen eigenen Reihen zu schaffen oder sein Verhalten kritisch zu hinterfragen.

c) Behörden-rot trifft auf Vorhabenträger-grün
   Ist die Behörde nicht kooperationsbereit, vorhandene Ermessensspielräume zugunsten des Vorhabenträgers zu nutzen, und ist der Vorhabenträger aus wirtschaftlichen Erwägungen nicht zur „Unterwerfung" bereit, drohen ihm langwierige Auseinandersetzungen. Der Vorhabenträger muss darum kämpfen, dass sich die Behörde auf andere Konfliktlösungen als die „Unterwerfung" einlässt. Gelingt ihm das, folgt die fachliche Auseinandersetzung. Kommt es zu keiner Lösung, bleibt dem Vorhabenträger die Anrufung der Verwaltungsgerichtsbarkeit.

d) Behörden-rot trifft auf Vorhabenträger-rot
Da kann man nur sagen: Schade um das schöne Projekt.

7 FORMEN DER ZUSAMMENARBEIT VON BEHÖRDE UND VORHABENTRÄGER

Projektgruppe: Struktureinheit, die temporär geschaffen wird, um ein einzelnes Projekt zu bearbeiten. Sie steht außerhalb der Linienstruktur. Sie hat einen Leiter und Mitarbeiter, die aus den ständigen Struktureinheiten in die Projektgruppe zu einem Anteil ihrer Arbeitszeit entsandt werden. Der Vorteil der Projektgruppe besteht in der Bereitstellung der für die Bearbeitung eines prioritären Vorhabens erforderlichen Personalkapazität. Der Nachteil besteht in der Schaffung einer Parallelstruktur, was die Gefahr von Konkurrenzkämpfen schafft. Die Projektgruppe sichert die Bereitstellung der Personalressourcen für die Bearbeitung eines prioritären Infrastruktur- oder Ansiedlungsvorhabens, wozu Deponien allerdings selten gehören.
Projektmanager: Projektmanager sind meist durch Ingenieurbüros gestellte Dritte, die der Behörde organisatorische Routineaufgaben abnehmen. Dadurch wird die Behörde entlastet und das Verfahren beschleunigt. Bewährt hat sich die Beauftragung von Projektmanagern bei Vorbereitung und Durchführung von Erörterungsterminen. Die Beschleunigungswirkung sollte nicht überschätzt werden. Notwendige behördliche Entscheidungen können nicht vom Projektmanager übernommen werden.
Jour fixe: „Feste Stunde“. Behörde und Vorhabenträger vereinbaren einen festen, ständig wiederkehrenden Beratungstermin. Es wird der Stand bzw. Fortschritt des Genehmigungsverfahrens festgestellt und die nächsten Schritte vereinbart. Im Jour fixe werden keine Entscheidungen getroffen, sondern die Herbeiführung von Entscheidungen organisiert.
Zeitplan: Behörde und Vorhabenträger erarbeiten zu Beginn des Genehmigungsverfahrens einen Zeitplan. Dies soll dem Vorhabenträger Planungssicherheit geben und Vorhabenträger und Behörde zu einer zügigen Verfahrensführung motivieren. Die Einhaltung des Zeitplans kann von Faktoren abhängen kann, auf die Vorhabenträger oder Behörde keinen Einfluss nehmen können. Insofern kann der Zeitplan nicht verbindlich sein. Trotzdem sollten beide Seiten die Einhaltung des Zeitplans anstreben, und ihn gegebenenfalls fortschreiben.

8 SCHLUSSBEMERKUNG

Mit meinem Vortrag wollte ich das Bewusstsein dafür stärken, dass subjektives Verhalten und Motivationen erheblichen Einfluss auf die Dauer von Genehmigungsverfahren haben können.
Die Mehrzahl der Verfahren sind durch kooperatives Verhalten charakterisiert sind. Darüber wird wenig gesprochen, vielleicht noch bei der Feier zur Inbetriebnahme der Deponie. Zu Ärger, Diskussionen und Aufmerksamkeit führen die anderen Verfahren.

LITERATURVERZEICHNIS

Deponieverordnung (2009). vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 3. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 225) geändert worden ist

Kreislaufwirtschaftsgesetz (2012). vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), dass zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr.56) geändert wurde

STOCK, U. (2024). Wieviel Regelung ist möglich, wieviel Entbürokratisierung ist nötig?, Berlin, Deutschland, Umweltrechtliche Beiträge aus Wissenschaft und Praxis, Heft 3/2024, Lexxion

STOCK, U. (2026). Kooperatives Zusammenwirken zwischen Vorhabenträger und Behörde ein Beitrag zur Beschleunigung von Genehmigungsverfahren, Augsburg, Bayerische Abfall- und Deponietage, Tagungsband

Verwaltungsverfahrensgesetz (2003). i.d.F. der Bekanntmachung vom 23. Januar 2003 (BGBl. I S. 102), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 236)

www.uvp-verbund.de, UVP-Portal der Länder

Konfliktbewältigung im Genehmigungsverfahren – kann das gelingen?

Ulrich Stock
ehemals Landesamt für Umwelt, Brandenburg, Deutschland

KURZFASSUNG: Im Beitrag wird die Möglichkeit der Bewältigung von Konflikten, die zwischen Vorhabenträger und Betroffenen bei der Realisierung infrastruktureller und industrieller Großprojekte entstehen, im Rahmen des Genehmigungsverfahrens betrachtet. Der Autor geht dabei auf die Struktur der Genehmigungsverfahren, die Arten der auftretenden Konflikte, den Ablauf der Genehmigungsverfahren im Lichte der Aarhus-Konvention, die Rollen der Beteiligten ein und beendet den Vortrag mit Ergebnissen und Schlussfolgerungen.

1 EINLEITUNG

Nach Beendigung des Genehmigungsverfahrens für die TESLA-Fabrik in Grünheide (Brandenburg) wurden in der Öffentlichkeit demokratische Defizite bei der Beteiligung der Öffentlichkeit moniert, die durch die Art und Weise der Bewältigung der im Verfahren aufgetretenen Konflikte verursacht wurden. Der Autor dieses Beitrags, der in der Genehmigungsbehörde das immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren geleitet hat, hat sich mit diesen Thesen auseinandergesetzt. Im Mittelpunkt stand die Frage, ob die bei der Realisierung von Großprojekten auftretenden Konflikte im Rahmen der Genehmigungsverfahren bewältigt werden können.

Es kann kein Zweifel daran bestehen, dass die Genehmigungsentscheidung nach dem in der Bundesrepublik Deutschland herrschenden Demokratieverständnis der indirekten Demokratie auf demokratischem Wege zustande gekommen ist. Denn das Genehmigungsverfahren wurde durch Anwendung demokratisch zustande gekommener Gesetze geführt. Schwieriger ist die Frage nach der Möglichkeit der umfassenden Konfliktbewältigung zu beantworten.

2 AUSFLUG IN DAS GENEHMIGUNGSRECHT

Die Errichtung und der Betrieb von Anlagen der Infrastruktur setzt die Durchführung eines Planfeststellungsverfahrens gemäß §§ 72 bis 78 Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG) voraus. Die Beteiligung der Öffentlichkeit ist obligatorisch. Anstelle eines Planfeststellungsverfahrens kann ein Plangenehmigungsverfahren ohne Öffentlichkeitsbeteiligung geführt werden. Das Fachrecht regelt, welche Voraussetzungen für die Erteilung einer Genehmigung erfüllt werden müssen. Die Genehmigungsbehörde hat zu entscheiden, ob die mit der Errichtung der Anlage verbundenen Eingriffe in Rechtsgüter durch den Nutzen bzw. Bedarf an der Anlage gerechtfertigt wird (Planrechtfertigung). Ein Antragsteller muss nachweisen, dass für die Anlage nach dem Fachplanungsrecht ein Bedarf besteht und die mit der Errichtung verbundenen Eingriffe durch den Bedarf oder Nutzen der Anlage gerechtfertigt sind. Dies gelingt umso eher, je dringlicher die Errichtung der Anlage ist oder umgekehrt je weniger schwerwiegend die Eingriffe sind. Da das Verhältnis Nutzen – Schwere der Eingriffe standortabhängig ist, geht dem Planfeststellungsverfahren oftmals ein Standortsuchverfahren voraus. Insofern hat die Genehmigungsbehörde ein Ermessen und enthält das Planfeststellungsverfahren Elemente der Konfliktbewältigung.

Die Errichtung und der Betrieb von industriellen Anlagen, die Lärm, Luftverunreinigungen, Stäube, Gerüche erzeugen, setzt die nach Durchführung eines Genehmigungsverfahrensgemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz (§ 10 BImSchG, 9. Verordnung zum BImSchG - 9. BImSchV) voraus. Die Anlagen, die einer Genehmigung nach BImSchG bedürfen, sind im Anhang 1 der 4. Verordnung zum BImSchG (4. BImSchV) abschließend aufgeführt. Ist eine Anlage mit dem Zusatz „G“ versehen, ist das Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung zu füh-

ren. Ist nach dem UVP-Gesetz eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen, zieht das automatisch eine Öffentlichkeitsbeteiligung nach sich. Genehmigungsvoraussetzung ist, dass die Vorschriften des BImSchG und der auf der Grundlage des BImSchG erlassenen Verordnungen und Rechtsvorschriften eingehalten werden und andere öffentlich-rechtliche Vorschriften Errichtung und Betrieb der Anlage nicht entgegenstehen. Unter dieser Voraussetzung ist die Anlage zu genehmigen („muss genehmigt werden"). Ein Ermessen hinsichtlich Nutzen, Standortauswahl hat die Behörde nicht. Es wird der Standort geprüft, den der Vorhabenträger in das Genehmigungsverfahren einführt.

3 URSACHEN FÜR DIE BEI GROSSPROJEKTEN AUFTRETENDEN KONFLIKTE

Die Konflikte können 3 Gruppen zugeordnet werden. Die Zuordnung ist manchmal schwierig,

Gruppe 1: Sorge vor Verlust an Lebensqualität.
Diese Konflikte thematisieren direkte Einwirkungen auf die betreffenden Personen oder ihre Lebensumstände, die unstreitig bei der Realisierung von Großprojekten entstehen können.
(A) Beeinträchtigungen und Gesundheitsgefährdungen durch Lärm
(A) Gesundheitsgefährdung durch Luftschadstoffe
(A) Beeinträchtigungen durch Gerüche
(A) Gesundheitsgefährdung durch Störfälle (Explosionen, Brände …)
(B) Minderung des Erholungspotentials der Umgebung
(C) Störung des Landschaftsbilds
(B) Minderung des Werts des eigenen Grundstücks
Gruppe 2: Verstöße gegen ethische, moralische und politische Überzeugungen.
(A) Verstöße gegen Grundsätze des Naturschutzes
(A) Verstöße gegen das Prinzip des Schutz des Waldes
(A) Verstöße gegen den Tierschutz (speziell bei Tierhaltungsanlagen)
(B) Verstöße gegen (umwelt)politische Überzeugungen („Es gibt gar keinen Klimawandel")
(B) Verstöße gegen demokratische Überzeugungen („Alle Einwohner der Gemeinde sind gegen die Anlage")
Gruppe 3: „diffuse Ängste", man könnte auch sagen **„irrationale Ängste"** (Konflikte aus Unkenntnis naturwissenschaftlicher Zusammenhänge, Umweltgefährdungen, die man nicht riechen, nicht sehen und nicht hören kann, Misstrauen gegenüber dem Vorhabenträger)
(A) Furcht vor Radioaktivität
(A) Sorge vor unkontrollierbaren Grundwasserkontaminationen , verursacht durch Deponien
(C) Furcht vor Ultra-/Infraschall, verursacht durch Windkraftanlagen

Die mit (A) gekennzeichneten Konflikte sind im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren relevant, weil es Rechtsnormen gibt, die Regelungen zu den betreffenden Sachverhalten enthalten und die Genehmigungsfähigkeit des Vorhabens beeinflussen. Insoweit verfügt das immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren über Konfliktlösungspotential. Dies jedoch nur eingeschränkt, da die Konflikte nur im Rahmen der Rechtsnormen gelöst werden können und daher zu erwarten ist, dass die Konfliktlösung nicht alle Betroffenen zufriedenstellt.
Die mit (B) gekennzeichneten Konflikte werden im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren nicht behandelt, weil es keine Rechtsnormen gibt, die Regelungen zu den betreffenden Sachverhalten enthalten. Dies, obwohl die Sachverhalte durchaus Einflüsse auf die Lebensumstände der Betroffenen haben und die angesprochenen Probleme von gesellschaftlicher Bedeutung sein können.
Die mit (C) gekennzeichneten Konflikte werden zwar im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren behandelt. Dies erfolgt aber in einer Art und Weise, die der Erwartungshaltung der Betroffenen in keiner Weise entspricht und so von vornherein nicht zu erwarten ist, dass der Behandlung dieser Sachverhalte irgendein Konfliktlösungspotential innewohnt.

Der vom Vorhabenträger ausersehene Standort wird im immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren darauf geprüft, ob die Genehmigungsvoraussetzungen an diesem Standort erfüllt sind. Wenn ja, war die Standortauswahl im genehmigungsrechtlichen Sinne richtig. Ob es geeignetere Standorte für die Errichtung der Anlage gab, spielt keine Rolle.

Ursache für Konflikte im Genehmigungsverfahren ist der Fakt, dass ein Vorhabenträger eine Anlage errichten will und die Betroffenen dies verhindern oder die Pläne ändern wollen (Primärkonflikt). Die Behörde ist objektiv nicht in der Lage, im genehmigungsverfahren die Erwartungshaltung der Betroffenen zu erfüllen. Daraus resultiert ein Konflikt der Betroffenen mit der Behörde (Sekundärkonflikt), häufig verbunden mit einer von den Betroffenen unbeabsichtigt herbeigeführten Solidarisierung von Behörde und Vorhabenträger.

4 GRUNDLAGEN DER ÖFFENTLICHKEITSBETEILIGUNG – DIE AARHUS-KONVENTION

Die Grundlagen der Regelungen zur Öffentlichkeitsbeteiligung sind in der Aarhus-Konvention festgehalten. Die Aarhus-Konvention ist ein Vertrag, in dem sich 47 Staaten (darunter alle EU-Mitglieder) 1. zu Fragen des Zugangs zu Umweltinformationen, 2. der Öffentlichkeitsbeteiligung in Entscheidungsverfahren und 3. zum Zugang zu Gerichten in Umweltangelegenheiten verständigt haben. Für unser Thema ist der Punkt 2. von Interesse.
Der Inhalt wurde durch die Verordnung (EG) Nr. 1367/2006 in europäisches Recht umgesetzt. Die deutschen Regelungen wurden durch Änderungen der betreffenden Gesetze angepasst. .
Auf einige Aspekte, die für die Konfliktbewältigung von Bedeutung sind, möchte ich im Folgenden eingehen.

Öffentlichkeit und betroffene Öffentlichkeit
Durch die Definition wird klargestellt, welcher Personenkreis in Genehmigungsverfahren zu informieren ist bzw. sich am Genehmigungsverfahren beteiligen darf. Öffentlichkeit bedeutet *eine oder mehrere natürliche oder juristische Personen und, in Übereinstimmung mit den innerstaatlichen Rechtsvorschriften oder der innerstaatlichen Praxis, deren Vereinigungen, Organisationen oder Gruppen.* Betroffene Öffentlichkeit bedeutet *die von umweltbezogenen Entscheidungsverfahren betroffene oder wahrscheinlich betroffene Öffentlichkeit oder die Öffentlichkeit mit einem Interesse daran, im Sinne dieser Begriffsbestimmung haben nichtstaatliche Organisationen, die sich für den Umweltschutz einsetzen und alle nach innerstaatlichem Recht geltenden Voraussetzungen erfüllen, ein Interesse.*
Die betroffene Öffentlichkeit ist zu informieren und zu beteiligen.
Das Interesse wird nicht weiter erläutert. Ein Interesse kann also jedermann haben, auch wenn er von der Anlage persönlich nicht betroffen ist. Jeder, der einen Konflikt mit einer Anlage hat, kann sich an einem Genehmigungsverfahren beteiligen. Dies stellt unter dem Aspekt der Verfahrensökonomie ein erhebliches Problem dar. Denn die Bearbeitung von Stellungnahmen von Personen, die von der Anlage nicht direkt betroffen sind, kann den Aufwand in einem Genehmigungsverfahren enorm erhöhen.

Es wird auch nicht weiter erläutert, ob das Interesse an der Anlage aus einer positiven Betroffenheit (z.B. Entlastung von Verkehrslärm) oder einer negativen Betroffenheit (z.B. Belastung durch Umgehungsstraße) herrührt. Die Aarhus-Konvention spricht wertneutral von „Stellungnahmen“. Es könnten sich also auch positiv Betroffene in ein Genehmigungsverfahren einbringen. Für die Frage der Konfliktbewältigung ist das interessant, da die Zahl der von einer Anlage positiv betroffenen oft größer ist als die Zahl der persönlich negativ Betroffenen.
Zu einer umfassenden Konfliktbewältigung würde die Einbeziehung der positiv betroffenen Öffentlichkeit dazugehören. Dies stößt aber auf unüberwindliche verfahrensrechtliche Hindernisse. Denn der Nutzen einer Anlage ist nicht rechtlich normierbar und kann auch im Genehmigungsverfahren nicht gegen Betroffenheiten wie zum Beispiel der Gefährdung der

menschlichen Gesundheit aufgewogen werden. Konsequenterweise mutiert daher die „Stellungnahme“ der Aarhus-Konvention zur „Einwendung“ bei der Umsetzung in deutsches Recht.

Zeitpunkt der Öffentlichkeitsbeteiligung
Jede Vertragspartei sorgt für eine frühzeitige Öffentlichkeitsbeteiligung zu einem Zeitpunkt, zu dem alle Optionen noch offen sind und eine effektive Öffentlichkeitsbeteiligung stattfinden kann. Jede Vertragspartei sollte zukünftige Antragsteller dazu ermutigen, die betroffene Öffentlichkeit zu ermitteln, Gespräche aufzunehmen und über den Zweck ihres Antrags zu informieren, bevor der Antrag auf Genehmigung gestellt wird. (Hervorhebungen durch den Autor)

Erörterungstermin
In Verfahren zur Öffentlichkeitsbeteiligung hat die Öffentlichkeit die Möglichkeit, alle von ihr für die geplante Tätigkeit als relevant erachteten Stellungnahmen, Informationen, Analysen oder Meinungen in Schriftform vorzulegen oder gegebenenfalls während einer öffentlichen Anhörung oder Untersuchung mit dem Antragsteller vorzutragen.
Die Durchführung einer öffentlichen Anhörung (Erörterungstermin) ist nicht verpflichtend festgelegt, auch nicht in der Verordnung (EG) Nr. 1367/2006. Erst mit der Umsetzung in deutsches Recht wird die Durchführung des Erörterungstermins verbindlich, wobei es jüngerer Vergangenheit zu einer zunehmenden Flexibilisierung gekommen ist.

5 UMSETZUNG DER INHALTE DER AARHUS-KONFERENZ IM VERFAHRENSRECHT

Es soll nun beleuchtet werden, ob der Ablauf eines Genehmigungsverfahrens den Intentionen der Aarhus-Konvention gerecht wird. Betrachten wir dazu den Ablauf eines immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahrens unter der Annahme, dass es noch keine Verfahren (etwa im Rahmen der Bauleitplanung) gegeben hat, die den Grad der Offenheit der Optionen bezüglich der Planung des Vorhabenträgers aus genehmigungsrechtlicher Sicht gegeben hat.

Verfahrensschritt	Grad der Offenheit
	100%
Selten: Einbeziehung der Behörde in die Standortentscheidung Vorgespräche nach § 2 Absatz 2 der 9. BImSchV Ggf. Antragskonferenz unter Einbeziehung betroffener Behörden Scopingtermin nach § 15 Absatz 3 UVPG	
Antragstellung	< 100%
Vollständigkeitsprüfung, ggf. unter Einbeziehung betroffener Behörden	
Einleitung der Öffentlichkeitsbeteiligung	<< 100%
Anforderung der Stellungnahmen der betroffenen Behörden Auslegung der Antragsunterlagen, Erhebung von Einwendungen Eintreffen der Stellungnahmen der betroffenen Behörden	
Erörterungstermin	<<< 100%
Entscheidung	0

Von einem 100%igen Grad der Offenheit kann nur solange ausgegangen werden, bis die Behörde Kenntnis von dem Vorhaben hat und beginnt, sich mit dem Antrag zu befassen. Mit Beginn der Befassung setzt ein Prozess ein, in dem die Behörde im Dialog mit dem Antragsteller, durch Einholung von Stellungnahmen von Fachbehörden und der betroffenen Behörden und eigene Prüfungen zunehmend Erkenntnisse über die Genehmigungsfähigkeit gewinnt. Es gehört zu den gesetzlichen Aufgaben der Behörde, den Vorhabenträger bei der Erlangung der Genehmigungsfähigkeit seines Vorhabens zu beraten, so dass die Behörde Einfluss auf die Anlagenkonfiguration und andere die Genehmigungsfähigkeit betreffende Sachverhalte nimmt. Im Zuge dieses Prozesses nimmt der Grad der Offenheit der Optionen immer weiter ab.
Zum Zeitpunkt der Einleitung der Öffentlichkeitsbeteiligung haben Vorgespräche, Antragskonferenzen, Scoping-Verfahren und die Vollständigkeitsprüfung der Antragsunterlagen stattgefunden. Der Grad der Offenheit der Optionen ist zu diesem Zeitpunkt schon erheblich gesunken.

6 DER ERÖRTERUNGSTERMIN

Zum Zeitpunkt des Erörterungstermins ist der Erkenntnisgewinn bei der Behörde über die Genehmigungsfähigkeit des Antrags auf der Basis von Stellungnahmen, Einwendungen oder eigener Erwägungen relevant. Die Offenheit der Entscheidung liegt nach meiner Schätzung bei 20%, die Wahrscheinlichkeit der Ablehnung des Antrags bei 10%. Der Vorhabenträger hatte auf der Basis des mit der Behörde geführten Dialogs, den Stellungnahmen der betroffenen Behörden und der vorliegenden Einwendungen Gelegenheit bekommen, seinen Antrag in Richtung Genehmigungsfähigkeit zu korrigieren. Im Erörterungstermin wird den Einwendern aus den Ausführungen der Behörde, der betroffenen Behörden und des Vorhabenträgers zu ihren Einwendungen bewusst, dass das Genehmigungsverfahren in Richtung Genehmigung läuft.
Bei dem Teil der Einwender, die als Erfolg der Konfliktbewältigung ausschließlich die Ablehnung des Vorhabens sehen, führt das zum falschen Eindruck der Parteilichkeit der Behörde. Es ist nachvollziehbar, dass dieser Teil der Einwender den Erörterungstermin als Farce ansieht. Er ist aber keine Farce, sondern spiegelt den Stand des Erkenntnisprozesses zur Genehmigungsfähigkeit des Antrags inklusive der deutlich eingeschränkten Offenheit der Optionen wider.

Nach meinen Erfahrungen steht der Beitrag des Erörterungstermins zur Konfliktbewältigung und zum Erkenntnisgewinn über die Genehmigungsfähigkeit des Antrags in keinem Verhältnis zum Aufwand, den Behörde und Vorhabenträger für Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung leisten müssen. Das gilt auch für die Durchführung von Online-Konsultationen.
In vielen Fällen erfüllt der Erörterungstermin nur den Zweck, für die Einwender eine Öffentlichkeit herzustellen. Die Flexibilisierung der Verpflichtung zur Durchführung eines Erörterungstermins trägt zur Beschleunigung des Genehmigungsverfahrens bei, ohne dass ein Schaden für die Erkenntnisgewinnung oder die Konfliktbewältigung eintritt.

7 INTERESSEN DER BETEILIGTEN AN DER KONFLIKTBEWÄLTIGUNG

Der Vorhabenträger: Der Vorhabenträger hat von allen Verfahrensbeteiligten das größte Interesse an einer umfassenden Konfliktbewältigung. In der Realität vertrauen viele Vorhabenträger darauf, dass die Behörden die Kastanien aus dem Feuer holen.
Die Behörden (Genehmigungsbehörde und beteiligte Behörden): Es ist nicht Aufgabe der Behörden, für eine umfassende Konfliktbewältigung zu sorgen. Die Aufgabe der Behörden besteht in der Führung eines transparenten und rechtsfehlerfreien Genehmigungsverfahrens. Sie sollte höchstens für Akzeptanz ihrer Entscheidung werben.
Die negativ betroffene Öffentlichkeit: Besteht das Ziel in der die Verhinderung des Vorhabens, ist keinerlei Interesse an einer Konfliktbewältigung vorhanden. Es wird versucht, vorhandene Konflikte zu verschärfen. Besteht das Ziel in der Minderung der Beeinträchtigungen, sollte sie Hautzielobjekt der Bemühungen des Vorhabenträgers um Akzeptanz sein.
Die positiv betroffene Öffentlichkeit: Die Akzeptanz für das Vorhaben ist vorhanden. Es besteht ein Interesse an der Konfliktbewältigung. Sie ist ein natürlicher Verbündeter des Vorhabenträgers. In der Realität tritt die positiv betroffene Öffentlichkeit selten und nur außerhalb des Genehmigungsverfahrens in Erscheinung.

Weitere Akteure bei der Konfliktbewältigung sind Kommunalpolitik, Landes- und manchmal Bundespolitik und Medien. Landes- und Bundespolitik müssen, sofern sie Teil der Regierung und damit Vorgesetzte von Genehmigungsbehörden sind, Interessenkonflikte vermeiden.

8 ERGEBNISSE

1. im Rahmen von Genehmigungsverfahren kann eine umfassende Konfliktbewältigung nicht geleistet werden. Es werden nur die rechtlich normierten Konflikte thematisiert.

2. Die Öffentlichkeitsbeteiligung kommt zu spät, Zum Zeitpunkt des Erörterungstermins sind die Weichen überwiegend gestellt. Die Forderungen der Aarhus-Konvention, die Öffentlichkeit zu einem möglichst frühen Zeitpunkt, zu dem noch alle Optionen offen sind, sind nicht umgesetzt.
3. Die Vorhabenträger verhalten sich teilweise passiv und tragen bisher überwiegend wenig zur Konfliktbewältigung bei.
4. Im Genehmigungsverfahren sind nicht alle Parteien, die an einer Konfliktbewältigung interessiert sein müssen, vertreten, insbesondere die positiv betroffene Öffentlichkeit nicht.

9 SCHLUSSFOLGERUNGEN

1. Die Konfliktbewältigung muss außerhalb des Genehmigungsverfahrens durchgeführt werden.
2. Die Konfliktbewältigung muss vor der Antragstellung im Genehmigungsverfahren einsetzen.
3. Der Vorhabenträger muss die Verantwortung tragen und die Federführung übernehmen.
4. Es ist zu überlegen, ob und wenn ja wie der Prozess der Konfliktbewältigung genehmigungsrechtlich flankiert werden sollte.

Die Vorhabenträger sollten mit dem Prozess der Konfliktbewältigung Institute beauftragen, die über Erfahrungen mit der Mediation in Konfliktfällen verfügen. Geeignete Instrumente im Konfliktmanagement können Einwohnerversammlungen, Informationsveranstaltungen, Informationsstätten sein. Die Behörde sollte sich mit Informationen über den Ablauf des Genehmigungsverfahrens und den rechtlichen Möglichkeiten der Betroffenen beteiligen

Konfliktmanagement kann nur erfolgreich sein, wenn der Vorhabenträger bereit ist, Kompromisse einzugehen und das Ziel der Einwender nicht allein in der Verhinderung des Vorhabens besteht.

LITERATURVERZEICHNIS

Bundes-Immissionsschutzgesetz (2013). i.d.F.d. Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBL. I S. 1274), zuletzt geändert durch Artikel I des Gesetzes vom 24. Febr. 2025 (BGBL. 2025 I Nr. 58)

Deponieverordnung (2009). vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 3. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 225)

Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (2021). i.d.F.d. Bekanntmachung vom 18. März 2021 (BGBl. I S. 540), zuletzt geändert durch Artikel 10 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 323)

Kreislaufwirtschaftsgesetz (2012). vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr.56)

KÜHN, M. (2023). Planungskonflikte und Partizipation: die Gigafactory Tesla, München, Deutschland, Raumforschung und Raumordnung Nr. 81, oekom

STOCK, U. (2025). Konfliktbewältigung im Genehmigungsverfahren – kann das funktionieren?, Berlin, Deutschland, Umweltrechtliche Beiträge aus Wissenschaft und Praxis Heft 3/2025, Lexxion-Verlag

Übereinkommen über den Zugang zu Informationen, die Öffentlichkeitsbeteiligung an Entscheidungsverfahren und den Zugang zu Gerichten in Umweltangelegenheiten (1998). vom 25. Juni 1998 (BGBl 2006 II S. 1251), zuletzt geändert durch Änderungsübereinkommen vom 27.5.2007 (BGBl. 2009 II S. 794

Verordnung über das Genehmigungsverfahren (1992). i.d.F.d. Bekanntmachung vom 29. Mai 1992 (BGBl. I S. 1001), zul.geändert durch Art. 4 des Gesetzes vom 3. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 225)

Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (2017). i.d.F.d. Bekanntmachung vom 31. Mai 2017 (BGBl. I S. 1440), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 12. November 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 355)

Verwaltungsverfahrensgesetz (2003). i.d.F. der Bekanntmachung vom 23. Januar 2003 (BGBl. I S. 102), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 236)

Focus on Finishing: Detection of Textile Finishes Using Near-Infrared Spectroscopy

Felix Scheidl[1], Gerald Koinig[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Die Vielfalt und Komplexität von Textilien nimmt zu, dies betrifft einerseits unterschiedliche Faserarten, aber auch eine Vielzahl an chemischen und physikalischen Ausrüstungen. Diese Ausrüstungen ermöglichen eine große Bandbreite verschiedener Anwendungsbereiche für Textilien, da sie wesentliche Eigenschaften hervorrufen (z.B. flammhemmend, wasserabweisend, antimikrobiell). Viele dieser Ausrüstungen können jedoch für Recyclingverfahren aus technischer oder ökonomischer Sicht nachteilig sein und aus diesem Grund ist die Erkennung von Ausrüstungen ein wichtiger Aspekt in der sensorgestützten Sortierung. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde daher die Eignung der Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR-Spektroskopie) zur Detektion von Textilausrüstungen untersucht. Durch systematische NIR-Aufnahmen definierter Faserarten und deren Ausrüstungen, wurden spektrale Signaturen erfasst und miteinander verglichen.

1 EINLEITUNG

Moderne Bekleidungs- und Heimtextilien sind das Ergebnis aufwendiger Herstellungs- und Ausrüstungsprozesse, die gezielt auf spezifische Anwendungsbereiche abgestimmt sind. Neben der Auswahl unterschiedlicher Faserarten, wie natürliche oder synthetische Fasern, spielen insbesondere chemische und physikalische Ausrüstungen (im Englischen: Finishing) eine entscheidende Rolle für die Funktionalität von Textilien. Diese reichen von wasserabweisenden, flammhemmenden und antimikrobiellen Eigenschaften, bis hin zur Verbesserung des Tragekomforts oder der Haltbarkeit.

Prinzipiell unterscheidet man bei der Textilausrüstung zwischen dem physikalischen und chemischen Ausrüsten. Beim physikalischen Ausrüsten wird hauptsächlich durch mechanische oder thermische Einwirkung die Gewebeeigenschaft verändert, dadurch kommt es zu einer spürbaren Änderung des Gewebes. Typische Beispiele dafür wären das Pressen, Kalandrieren oder Dekatieren. Das chemische Ausrüsten erfordert den Einsatz von Chemikalien und ermöglicht die Verleihung gezielter Eigenschaften. Heutzutage kommen beide Verfahren auch in Kombination vor. (Choudhury 2017)

Beispiele für typische Ausrüstungen wären:
Wasserabweisende Ausrüstung: Wird meistens als Emulsion oder Film per Pad-Dry-Cure aufgebracht. Polyurethan und Silikon Beschichtungen kommen hier häufig zum Einsatz, wenn eine geschlossene und wasserdichte Barriere verlangt wird (Choudhury 2017).

Flammschützende Ausrüstung: Für den Flammschutz kommen vor allem phosphorhaltige, schwefelhaltige und anorganische Wirkstoffe zum Gebrauch. Sie werden als Imprägnierung, Beschichtung oder als chemisch gebundene Additive angewandt. (Choudhury 2017)

Fluorcarbon-Imprägnierung: Diese Art der Imprägnierung eignet sich für Wasser-, Öl und Trocken-Schmutzabweisung. Dabei wird eine dünne Schicht auf die Oberfläche des Gewebes aufgebracht und anschließend thermisch fixiert. Auch Perfluorcarbon (PFC) freie Imprägnierungen kommen zum Einsatz, jedoch eignen sich diese nur begrenzt als Öl-Repellent. (Choudhury 2017)

Antimikrobielle / Antischimmel-Ausrüstung: Antimikrobielle Ausrüstungen schützen entweder den Nutzer oder das Textil vor Geruch und Flecken. Eingesetzt werden unter anderem Ammoniumverbindungen, halogenierte Phenole, Chitosan und organosilikonische Systeme. Die Applikation erfolgt einerseits durch Oberflächenbehandlung wie Imprägnierungen und Beschichtungen oder auch durch tiefergehende chemische Pfropfung oder einmischen der Additiven in die Spinnlösung. (Chruściel 2022)

Die Ausrüstungen sind in der Nutzungsphase praktisch, führen jedoch zu einer steigenden Komplexität der Textilmatrix und somit zu weiteren Herausforderungen im Recycling, aber auch in Sortierprozessen. Speziell im Bereich der Abfallwirtschaft hat sich die Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR) bereits als leistungsfähige Technologie im sensorbasierenden Sortieren erwiesen, ist jedoch speziell für die Erkennung von Ausrüstungen herausfordernd. Denn Ausrüstungen liegen in der Textilmatrix in zumeist sehr geringen Konzentrationen vor und erzeugen – wenn überhaupt - nur schwache spektrale Signale, die von den Absorptionsbanden des Grundmaterials überschattet werden. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde daher das Potential der NIR-Spektroskopie für die Erkennung von Ausrüstungen systematisch untersucht.

2 METHODIK

Um möglichst viele verschiedene Faser- und Ausrüstungsarten abzudecken, wurden mehrere Batches angelegt (vgl. Tabelle 1). Innerhalb eines Batches blieb die Faserart gleich, ein Batch umfasste allerdings unterschiedliche Ausrüstungen. Das ermöglicht einen direkten Vergleich innerhalb der Batches und Batch übergreifend. Die Proben für die einzelnen Batches wurden von einem Textilausrüster erhalten oder in Textilfachgeschäften gekauft.

Tab. 1: Übersicht der zusammengestellten Batches

Bezeichnung	Faserart	Ausrüstung
Batch 1	Baumwolle (BW)	Gefärbt
Batch 2	Hanf (H)	Teilweise stoffgebleicht
Batch 3	Leinen	Teilweise stoffgebleicht
Batch 4	Viskose (V)	Gefärbt
Batch 5	Polyester (PES)	Gefärbt
Batch 6	Merinowolle	Gefärbt, Dekantierung mit Dampf und Druck
Batch 7	Polyamid (PA)	Primär unterschiedliche Ausrüstungen: silikonbeschichtet, PU beschichtet, C6 Fluorcarbon-Imprägnierung
Batch 8	Polyester	Primär unterschiedliche Ausrüstungen: Flammhemmend, PU beschichtet, silikonbeschichtet, Acryl beschichtet
Batch 9	Baumwolle	PFC-freie Imprägnierung
Batch 10	Polyester	primär flammhemmend, teilweise PU beschichtet
Batch 11	Polyester	PFC-freie C0-Imprägnierung
Batch 12	Polyester	PU beschichtet
Batch 13	Polyester oder Polyester-Acrylat-Polyurethan Gewebe	Primär Anti-Pilling, teilweise flammhemmend, Antibakteriell/-schimmel
Batch 14	Baumwolle oder Polyester-Acrylat-Polyurethan (PUR) Gewebe	Primär Anti-Schimmel, teilweise flammhemmend, Anti-Pilling

Alle Proben wurden zunächst im Wellenlängenbereich 1615-2330 nm mit einem Handheld NIR gemessen. Um Messabweichungen gering zu halten wurden die Proben jeweils fünf Mal gemessen und ein Mittelwert gebildet. Da nicht ausgeschlossen werden konnte ob es sich nur um einseitig beschichtete Materialien handelt, wurden stets beide Seiten des Textils gemessen. Zusätzlich wurden diverse Kontroll-Spektren von unbehandelten Fasern aufgenommen. Die erhaltenen Spektren wurden normalisiert und geglättet (Standard Normal Variate (SNV) und Savitky-Golay-

Methode). Anschließend wurden die Proben mit einem experimentellen sensorgestützten Sortiersystem (SBS-System) mit einem NIR-Sensor EVK-Helios-G2-NIR1 erfasst. Das während der Versuche ausgewertete Wellenlängenband lag zwischen 991 nm und 1677 nm.

Im vorliegenden Beitrag werden jedoch nur die ersten Erkenntnisse aus den Messungen mittels NIR-Handheld vorgestellt.

3 BISHERIGE ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die bisher durchgeführten Auswertungen zeigten, dass Farbstoffe im Wellenlängenbereich des NIR-Handheld-Gerätes in der Regel keine Abweichung zum unbehandelten Textil aufweisen. Dies wird beispielhaft am Batch 1 (Baumwolle mit verschiedenen Farben) in Abbildung 1 gezeigt. Für flammhemmende und antimikrobielle Ausrüstungen konnten ebenfalls keine signifikanten Differenzen der Spektren festgestellt werden. Dagegen führten Beschichtungen mit Polymeren, etwa auf Basis von Polyurethan (PUR) zu sichtbaren Abweichungen gegenüber dem Kontrollspektrum (vgl. Abbildung 2). Im Bereich um 2000 nm zeigte sich bei den PU-Beschichtungen ein Anstieg der Absorption. Diese Bande ist laut Miller et al. (1990) einer Kombinationsschwingung der N-H Gruppe zuzuordnen und bestätigt somit die Anwesenheit der Polyurethanschicht. Die bisherigen Ergebnisse darauf hin, dass die Detektionsfähigkeit von Textilausrüstungen in diesem Wellenlängenbereich begrenzt ist.

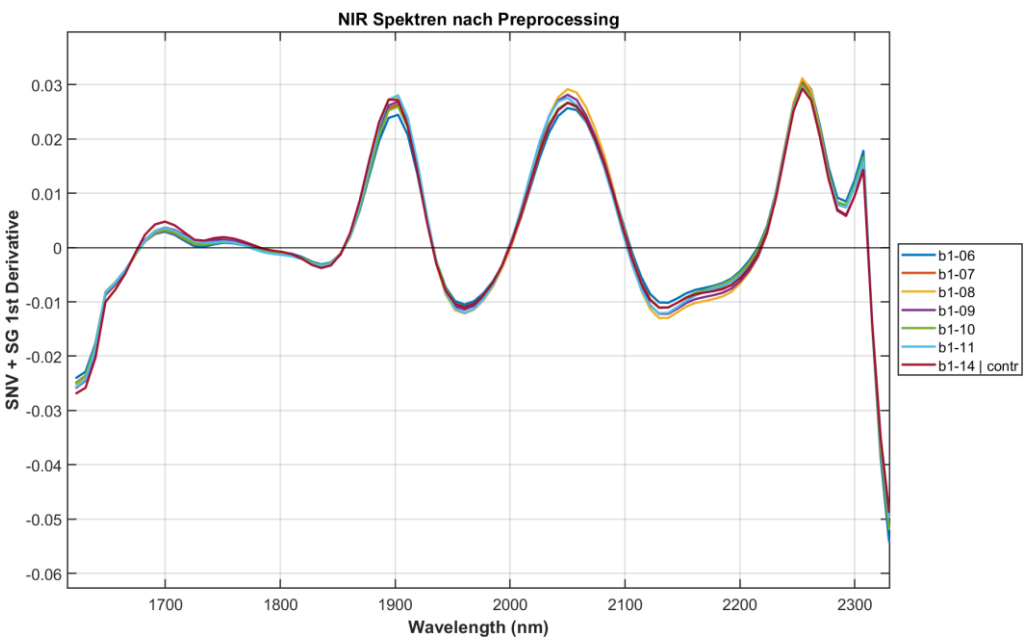


Abb. 1: Batch 1 - Baumwolle gefärbt; Probe 6 bis 11 waren mit unterschiedlichen Farben gefärbt, Probe 14 stellte die Kontrollprobe dar (ungefärbte Baumwolle)

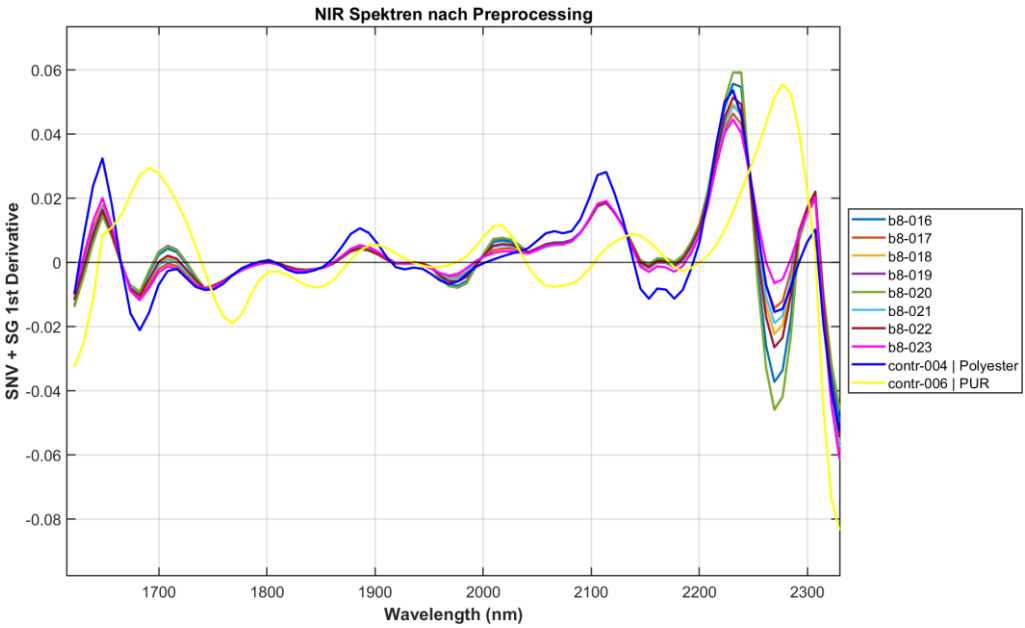


Abb. 2: Batch 8 - Polyester mit TPU-Beschichtung; Probe 16 bis 23 wiesen eine TPU-Beschichtung auf, Probe 4 stellte die Kontrollprobe für Polyester (ohne Beschichtung) dar und Probe 6 war die Kontrollprobe für Polyurethan

DANKSAGUNG

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsprojekts „StraTex“ (FO999917957), gefördert von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft.

LITERATURVERZEICHNIS

Choudhury, A.K.R. (2017): Principles of Textile Finishing. United Kingdom. Woodhead Publishing.

Chruściel, J.J. (2022) Modifications of Textile Materials with Functional Silanes, Liquid Silicone Softeners, and Silicone Rubbers-A Review. Polymers (Basel). 2022 Oct 17;14(20):4382. doi: 10.3390/polym14204382.

Miller, C.E., Edelman, P.D., Ratner, B.D. (1990) Near-Infrared Spectroscopic Analyses of Poly(Ether Urethane Urea) Block Copolymers. Part II: Phase. Pennsylvania: Haverford College Department of Chemistry. Downloadbar unter: https://scholarship.haverford.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1283&context=chemistry_facpubs.

KONTAKT

Felix Scheidl, BSc
felix.scheidl@unileoben.ac.at
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben

Kompost absieben – Feinkorn absaugen

Hanns-Thomas Teubel
Ing. Teubel Umwelttechnik e.U., Handel & Handelsagentur, Gmunden, Österreich

KURZFASSUNG: In verschiedenen Praxisversuchen wurde bei der Absiebung von Kompost und Erdaushub vor allem das Feinkorn abgesaugt, um festzustellen wie viele kleine Plastikteile ausgeschleust werden können und welchen technischen Aufwand das zu Folge hätte.



Abb. 1: Nahaufnahme: Abgesaugte Plastikpartikel aus Bio-Kompost-Feinkorn <12 mm

1 FAKTEN

Plastik-Störstoffe sind seit mittlerweile Jahrzehnten ein massives Problem für Kompostieranlagen. Falsch entsorgter Plastikmüll im Grün- und Strauchschnitt und in Bioabfällen reichert sich als Mikroplastik im fertigen Kompost an, da oftmals mangels Alternative auch der bereits mit Störstoffen angereicherte Siebüberlauf in den Kompostierungsprozess zurückgeführt wird. Trotz Normen und Regelwerke zeigt die Praxis, dass jede fertig abgesiebte Komposterde mehr oder weniger Plastikpartikel beinhaltet und entweder auf die Felder aufgebracht oder in weiterer Folge durch Fertigmischungen als Sackware an die Endkunden verkauft wird.
Wissenschaftlich ist bewiesen, dass Menschen kleinste Plastikpartikel über Luft, Wasser und Nahrung aufnehmen. Wo und wie sich Mikro- und Nanoplastik-Partikel anreichern und ob die Plastikaufnahme gesundheitliche Folgen hat, ist gegenwärtig Gegenstand zahlreicher Untersuchungen [1].
Bei der Herstellung von Komposterde werden die geforderten Güterichtlinien durch möglichst feine Absiebung (QL <12 oder sogar <10 mm) erreicht. Trotzdem bleiben Störstoffe in unterschiedlichen Mengen und Größen wie oben erwähnt im Fertigprodukt enthalten.
Daher stellt sich grundsätzlich die Frage: Macht es Sinn, beim Absieben von Kompost, Erdaushub, Recyclingmaterial, etc. die Feinkornfraktion abzusaugen?

2 PRAXISTESTS

Um eine Aussage diesbezüglich machen zu können, haben wir verschiedene Materialien in der Praxis getestet. Dabei setzten wir eine Absaughaube auf das jeweilige Feinkornband einer Trommelsiebmaschine und saugten mit einem TUKWIND Saug-Gebläse (Elektro- oder Benzin Antrieb) die leichten Störstoffe (Kunststoff-Folien, Schnüre, etc.) in ein spezielles Bigbag-Netz ab.


Abb. 2: Feinkorn-Absaugung

2.1 Testmaterial Siebüberlauf

Der auf einer Bio-Kompostanlage angefallene Siebüberlauf wurde ca. 2 Monate zwischengelagert und dann mit einer Trommel-Siebmaschine mit 20 mm Quadratlochung abgesiebt. Dabei wurde am Feinkorn-Austragsband abgesaugt.
Da zuerst ohne (Abb. 3) und dann mit Absaugung abgesiebt wurde, hat man nicht nur augenscheinlich sehr deutlich den Unterschied erkennen können, sondern der Versuch musste nach nicht einmal einer Stunde unterbrochen werden, weil der Auffangsack mit 510 Liter-Inhalt (Abb. 4) bereits voll war!


Abb. 3: Feinkorn kleiner 25mm ohne Absaugung


Abb. 4 Abgesaugte Plastikteile nach 1 h

2.2 Testmaterial Erdaushub

Beim nächsten Versuch haben wir ein Material getestet, bei dem kaum Plastikteile zu erwarten waren: Erdaushub
Beim Versuchsaufbau wurde eine Trommel-Siebmaschine mit einer 15 mm Quadratlochung verwendet. Da wir, wie erwähnt, mit nur sehr geringen Mengen an Störstoffen gerechnet haben, wurde sowohl die Fein- als auch die Überkorn-Fraktion mit einem TUKWIND Saug-Gebläse (Abb. 5) abgesaugt.


Abb. 5: Versuchsaufbau Absaugung von Fein- und Überkorn

Bei einer sehr geringen Input-Menge von nur 7 m³ Erdaushub (2 Radlader Schaufeln) konnten insgesamt 2,6 Liter Plastikteile (Abb. 6) abgesaugt werden. Der Anteil <15 mm (Feinfraktion) betrug immerhin rund 0,6 Liter.


Abb. 6: Abgesaugte Plastikteile aus Fein- u. Überkorn

3 GRENZEN UND HERAUSFORDERUNGEN

Da kleine, weiche Kunststoffteile und Schnüre eine deutlich geringere Dichte und ein besseres Windfangverhalten haben als die schwereren, organischen Bestandteile, werden sie vom Luftstrom erfasst und anschließend in einem geeigneten BigBag-Auffangsack oder Container gesammelt. Allerdings gibt es auch Hartplastikanteile (z.B. zerkleinerte Joghurtbecher-Anteile), die ein ähnliches Gewicht wie Komposterde haben. Diese lassen sich durch bloße Absaugung kaum entfernen.

Der Kompost muss für eine effektive Störstoff-Ausschleusung trocken sein. Ist das Material zu feucht oder verklumpt, „kleben“ die Plastikteile an den Komposterde Partikeln und dadurch funktioniert die Abtrennung nicht mehr so gut.

Eine gut eingestellte Absaugung entfernt nicht alle Plastikteile, aber je nach Beschaffenheit des Materials können doch erstaunliche Mengen an leichten Störstoffen ausgeschleust werden. Dabei reduziert sich der Anteil an sichtbaren und unsichtbaren Kunststoffpartikeln im Fertigkompost. In weiterer Folge verringert sich die Freisetzung in Böden, Nahrungsketten und Grundwasser, es entsteht ein geringeres Risiko für Kleintiere.

Die Kosten für so eine Absaugung ist überschaubar und beträgt lediglich 5-10% Investanteil beim Kauf eines Trommelsiebes mit mittlerer Siebgröße (Siebtrommel-Länge ca. 5m und 1,8m Durchmesser).

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Das generelle Absaugen von Störstoffen ist ein unverzichtbarer Baustein im Störstoffmanagement, um grobe Plastikverunreinigungen aus dem Kompost zu entfernen. Der Stand der Technik kann einfach und mit wenig Kostenaufwand weiter ausgebaut werden, wenn bei der Absiebung auch jede Feinfraktion mitabgesaugt wird!

LITERATURVERZEICHNIS

[1] „Mikroplastik ist überall“, sagte die Medizinerin Vanessa Stadlbauer-Köllner von der Med Uni Graz in Science.orf.at, 15.01.2026

KONTAKT

Ing. Hanns-Thomas Teubel
t.teubel@teubel-kurz.com
+43 664 3551642
Inhaber
Ing. Teubel Umwelttechnik e.U.
www.teubel-kurz.com

Centrifugal Melt Separation of Co-Extruded Multi-Material Polymer Products for Recycling Applications

Katarina Marković[1,2], Jutta Geier[1,2], Weiyu Zhao[2], Michael Feuchter[2], Márton Bredács[1] & Gernot Oreski[1,2]
1) Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, Austria
2) Chair of Materials Science and Testing of Polymers, University of Leoben, Leoben, Austria

ABSTRACT: Co-extruded multi-material polymer products combine different thermoplastics in one bonded structure and are therefore difficult to recycle by conventional mechanical routes. When such materials are shredded and reprocessed without separation, one polymer can remain as a foreign phase in the other and reducing recyclate homogeneity and potentially impairing processing behaviour, mechanical performance and final material properties. This work investigates centrifugal melt separation as a physical separation route for a co-extruded system consisting of two thermoplastic materials. Thermogravimetric analysis was first used to define a suitable processing window for the centrifugal trials and to avoid thermal degradation during heating. Shredded specimens were then placed in a steel pipe, heated to temperatures above the softening or melting range and exposed to rotational motion. Based on density differences, the separation concept assumes radial migration of the molten phases, with one polymer expected to migrate closer to the outer region and the other closer to the inner region of the steel cylindric pipe. After controlled cooling, the solidified cylinders were evaluated by cross-section inspection and Fourier transform infrared spectroscopy to assess radial material distribution. The discontinuous setup enables direct observation of layer formation and provides a basis for optimizing temperature, time and rotational conditions. This melt separation approach could enable or support material-specific recovery from complex polymer products and can be further developed toward continuous operation by integration with extrusion.

1 INTRODUCTION

Mechanical recycling requires waste streams with sufficiently stable composition, limited contamination and an acceptable degradation state. This requirement is difficult to meet for co-extruded products, where different thermoplastics are permanently combined within one component. Although co-extrusion allows layers with complementary properties such as stiffness, toughness, surface quality or barrier function, the bonded structure becomes problematic at end of life because shredding does not separate the individual polymers.

Multilayer and co-extruded polymer products are therefore frequently described as difficult fractions in plastics recycling. Kaiser et al. reported that polymer-based multilayer packaging is often poorly recyclable because established sorting and reprocessing routes are not designed to recover the individual layers (Kaiser, Schmid, & Schlummer, 2018). Mechanical recycling is strongly affected by sorting quality, degradation and compositional variation; in co-extruded materials, this compositional complexity is already built into the product structure (Schyns & Shaver, 2021).

If incompatible polymers are processed together, phase-separated morphologies and weak interfaces can develop. This may reduce processing stability and mechanical performance. Compatibilization can improve some mixed-polymer systems, but it is mainly suitable when the composition is known and reproducible. For complex multi-material articles, a separation step before reprocessing can therefore be more suitable when material-specific recovery is desired. Typical examples include multilayer food packaging films such as PE/PA or PE/EVOH, as well as well as PET/PE trays where different polymers are combined to achieve complementary properties.

One possible route to address this limitation is to separate the polymers in the molten state, where material mobility allows phase migration under external force. Centrifugal melt separation uses the molten state rather than the solid particle state. Dobrovszky and Ronkay demonstrated that immiscible plastics can be separated in the molten state by centrifugal force, while a later study showed that temperature influences the separation of immiscible polymer blends (Dobrovszky & Ronkay, Alternative polymer separation technology by centrifugal force in a melted state, 2014), (Dobrovszky, Temperature dependent separation of immiscible polymer blend in a melted state, 2018). Medvid et al. modelled this principle and described radial migration, where the higher-density component moves toward the outer region of the rotating volume and the lower-density component is enriched closer to the centre (Medvid, Steiner, Irrenfried, Feuchter, & Brenn, 2023). However, these studies mainly considered dry-blended or prefabricated immiscible polymer mixtures, while less information is available on the behaviour of real co-extruded multi-material products with bonded layers and limited initial intermixing. The aim of this work is therefore to investigate whether centrifugal melt separation can induce radial material redistribution in a co-extruded polymer system and to compare this behaviour with manually prepared polymer mixtures.

2 MATERIALS AND METHODOLOGY

The investigated system was a co-extruded specimen consisting of two thermoplastic materials, referred to as Material 1 and Material 2. The specimens were mechanically shredded before testing so that the system could be introduced into the cylindrical steel pipe used as the separation container.

Thermogravimetric analysis was performed before centrifugal testing to define a suitable processing window. The material had to be heated sufficiently to allow softening or melting and phase movement, while avoiding relevant thermal degradation during the residence time of the experiment. The preliminary temperature range was selected between 260 and 300 °C. The upper part of this range was expected to reduce melt viscosity and improve phase mobility, but it also required confirmation that the material remained thermally stable during the experiment.

For the centrifugal melt separation test, shredded material was placed inside the steel pipe, heated to the selected temperature and subjected to rotational motion for a defined duration. During this step, centrifugal acceleration acts on the molten phases. If the phases remain largely immiscible and differ in density, the denser phase is expected to migrate toward the outer wall, while the lighter phase retains in the inner region. After the selected processing time, the pipe was cooled so that the radial distribution was fixed in the solidified cylinder.

The setup was operated discontinuously. Each experiment was processed, cooled, removed and evaluated before the next condition was tested. This limits throughput but is suitable for early-stage process development because the effect of temperature and rotational conditions can be directly compared.

After centrifugal treatment and cooling, the specimens were evaluated by cross-section inspection and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Cross-section inspection provided a first indication of whether radial layer formation occurred and whether the interface appeared sharp or diffuse. FTIR spectra were collected from defined positions across the cross-section. Characteristic absorption bands of Material 1 and Material 2 were compared between the inner and outer regions to determine whether the local composition changed after processing.

3 RESULTS AND DISCUSSION

The manually prepared polymer mixtures showed distinguishable radial regions after heating and rotation, indicating that phase redistribution can occur under centrifugal melt conditions. This observation is consistent with the expected separation mechanism for immiscible polymer melts in a centrifugal field, where material migration is influenced by density difference, viscosity, residence time, interfacial tension and the initial size of the dispersed domains. For the co-extruded material, however, clear radial layer formation was not observed under the applied experimental conditions. This suggests that the bonded multilayer structure and the limited initial intermixing may restrict phase migration compared with freely mixed polymer blends. In addition, the separation process is strongly temperature-dependent. If the temperature is too low, the phases cannot move sufficiently; if it is too high, thermal degradation may reduce the quality of the recovered fractions. FTIR supported the interpretation of material redistribution by comparing spectra from different radial positions. Characteristic bands assigned to one material in the outer region, combined with characteristic bands of the second material toward the inner region, indicate radial composition gradients caused by centrifugal treatment. At this development stage, the analysis is mainly qualitative. It can be extended to semi-quantitative evaluation by using peak area ratios, calibration blends or multivariate analysis of spectra from several positions.

From a recycling perspective, the main value of the method is the potential reduction of cross-contamination before reprocessing. As previously discussed, remelting without prior separation can leave each polymer as a foreign phase in the other. Depending on the polymer combination, this may contribute to processing defects, weak interfaces or reduced mechanical performance. A successful centrifugal separation in the molten state of the blends would allow the recovered fractions to be processed in more suitable recycling streams. The discontinuous experiments therefore serve as a screening method for evaluating whether the material system contains enough density contrast, thermal stability and melt mobility to justify further development.

Two limitations should be considered in the interpretation of the present results. First, visible layer formation is not identical to complete material purity. A separated region can still contain small dispersed domains of the second material, which must be evaluated by spectroscopic or thermal analysis. Second, the batch geometry does not yet represent the residence-time distribution and melt feeding conditions of a continuous device. The next experimental step should therefore combine positional FTIR analysis with quantitative purity assessment and tests on the recovered fractions. This would make it possible to connect the observed separation pattern with practical recyclate quality.

4 CONCLUSIONS

Centrifugal melt separation was investigated as a physical separation route for a co-extruded multi-material polymer system. The method uses heating and rotational motion to promote radial redistribution of immiscible molten phases. TGA was used to define a suitable temperature window, while cross-section inspection and FTIR were used to evaluate layer formation and material enrichment after cooling.

The approach addresses a recycling problem that cannot be solved by shredding and sorting alone because the individual materials remain bonded within one product structure. The discontinuous setup provides a practical basis for screening temperature, residence time and rotational conditions. Future work should quantify separation efficiency, determine the purity and properties of recovered fractions and translate the batch principle into a continuous process compatible with extrusion.

REFERENCES

Dobrovszky, K. (2018). Temperature dependent separation of immiscible polymer blend in a melted state. *Waste management (New York, N.Y.)*, 364–372.

Dobrovszky, K., & Ronkay, F. (2014). Alternative polymer separation technology by centrifugal force in a melted state. *Waste management (New York, N.Y.)*, 2104–2112.

Kaiser, K., Schmid, M., & Schlummer, M. (2018). Recycling of Polymer-Based Multilayer Packaging: A Review. *Recycling*.

Medvid, V., Steiner, H., Irrenfried, C., Feuchter, M., & Brenn, G. (2023). Computational modelling of the separation of molten polymer blends by a centrifugal technique. *J Polym Res (Journal of Polymer Research)*.

Schyns, Z. O., & Shaver, M. P. (2021). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communications*.

Was wir nicht wegwerfen, zählt: Ökobilanzen zur Quantifizierung von Abfallvermeidung und Wiederverwendung

Silvia Schütz[1] & Gudrun Obersteiner[1]
[1)] Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Abfallvermeidung ist gemäß Abfallhierarchie die wirksamste Strategie, wird jedoch gegenüber dem ökonomisch sichtbaren Recycling häufig unterschätzt. Vor dem Hintergrund des EU-Ziels der Klimaneutralität bis 2050 zeigt der Beitrag, dass Vermeidung und Wiederverwendung als Kern präventionsorientierter Strategien systematisch gestärkt werden müssen. Methodisch stützt sich die Arbeit auf Lebenszyklusanalysen und diskutiert Substitutionsansätze (Systemerweiterung), wie den „Avoided-Burden"-Ansatz sowie die „Circular-Footprint-Formula". Anhand von Fallstudien werden die Umweltwirkungen quantifiziert und die unterschiedlichen Ansätze diskutiert. Die Ergebnisse unterstreichen die zentrale Bedeutung transparenter Allokations- und Substitutionsentscheidungen. Insgesamt liefern präventionsorientierte Maßnahmen im Regelfall höhere Umweltentlastungen als nachgelagerte Behandlungsoptionen; Recycling bleibt wichtig, aber nachrangig, wenn Vermeidung und Wiederverwendung ausgeschöpft sind. Die Studie leitet daraus methodische Leitbedarfe und Handlungsimpulse für Politik, Wirtschaft und Konsum ab.

1 EINLEITUNG

Nach der Abfallhierarchie ist Vermeidung die wirksamste Option der Abfallwirtschaft. Dennoch wird sie von Politik, Wirtschaft und Konsumentinnen und Konsumenten oft unterschätzt, während Recycling bevorzugt wird, weil es direkte ökonomische Wertschöpfung erzeugt. Um das EU-Ziel einer klimaneutralen Wirtschaft bis 2050 zu erreichen, müssen die Vorteile der Vermeidung und der Wiederverwendung klarer kommuniziert und als zentrale Elemente umfassender Präventionsstrategien verankert werden—vor allem in überwiegend linearen Branchen wie der Textilindustrie, die durch den Aufbau ressourcenschonender Systeme besonders profitieren kann.

Die größten Belastungen für Primärrohstoffe, Wasser und Treibhausgase entstehen in den Bereichen Ernährung, Wohnen, Verkehr und Textilien. Obwohl Abfallvermeidung an der Quelle ein hohes Minderungspotenzial besitzt, ist ihre Wirkung bislang nur unzureichend quantifiziert. Einige Studien zeigen die Richtung: Llatas et al. (2021) beziffern für die Vermeidung von Bauabfällen eine Emissionsreduktion um 57 % gegenüber Nicht-Vermeidungs-Szenarien; De Laurentiis et al. (2024) weisen Netto Klimavorteile durch die Umverteilung von Lebensmitteln und durch verbraucherbedingte Verhaltensänderungen zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen nach.

2 METHODE

Lebenszyklusanalysen (LCA) nach ISO 14040 und 14044 (ISO 2006a, ISO 2006b) dienen der systematischen Beschreibung von Produkten und Dienstleistungen sowie deren Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus. In der Methodik werden Emissionen und Ressourceneinsätze primär den jeweiligen Produktionssystemen zugerechnet; Abfallströme gelten als Outputs dieser Systeme. Nichtsdestotrotz lassen sich Dienstleistungen des Abfall- und Ressourcenmanagements eigenständig bilanzieren, sofern die Systemgrenzen, funktionelle Einheit und Allokationsregeln transparent definiert sind.

Zur Lösung der Multifunktionalität von Produkten bzw. zur Einteilung der Umweltauswirkungen auf den ersten oder weiteren Lebenszyklus eines Produktes existieren mehrere Varianten: Im Cut-off-Ansatz werden die Vorteile des späteren Recyclings dem nachfolgenden System zugeschlagen, während das erstnutzende System keine Gutschriften erhält; im „Avoided-Burden"-Ansatz (Substitutions-Ansatz) werden Gutschriften für die Substitution von Primärmaterial bzw. Primärprozessen oder vergleichbaren Produkten am Lebensende gewährt. Der Allokationsfaktor verteilt die Lasten und Vorteile des Recyclings und der Primärmaterialproduktion zwischen den beiden verbundenen Lebenszyklen und spiegelt die Marktsituation wider. In Situationen, in denen Angebot und Nachfrage für Sekundärrohstoffe nicht eindeutig feststellbar sind oder die Qualitätsäquivalenz zum Primärmaterial nicht gegeben ist (z. B. bei Kunststoffen oder Textilien), kann die „Circular-Footprint-Formula" (CFF) des „Product Environmental Footprints" (Europäische Kommission 2021) zusätzliche Klarheit schaffen, indem sie qualitäts- und marktbasierte Faktoren explizit berücksichtigt. Der „Avoided-Burden"-Ansatz wird besonders häufig für Vergleiche von Abfallbehandlungsoptionen herangezogen.

Vergleichende Bewertungen von Abfallbehandlung mit Abfallvermeidung sind hingegen seltener, da Prävention methodisch und funktional grundlegend von Abfallmanagement abweicht (vgl. Van Ewijk & Stegemann 2015). Am Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft befassen wir uns seit Jahren mit Strategien der Abfallvermeidung und -wiederverwendung. Aufbauend auf den genannten methodischen Grundlagen präsentieren wir Ergebnisse aus laufenden und abgeschlossenen Forschungsprojekten und quantifizieren die ökologischen Effekte anhand konkreter Fallstudien – von Emissionsminderungen bis zur Ressourcenschonung.

Die Fallbeispiele umfassen die Vermeidung von Lebensmittelabfällen und die Verteilung von Überschusswaren, die Weiternutzung von Sekundärbatterien aus der Elektromobilität, das Redesign von Photovoltaik-Modulen sowie die Sanierung von Kastenfenstern. Diese Analysen zeigen, dass präventionsorientierte Maßnahmen im Regelfall höhere Umweltentlastungen erzielen als nachgelagerte Behandlungsoptionen, vorausgesetzt, die funktionelle Einheit ist konsistent definiert, Substitutionseffekte werden adressiert und Allokationsentscheidungen sind nachvollziehbar dokumentiert.

3 ERGEBNISSE

3.1 Lebensmittelabfälle vermeiden

In Gollnow et al. (2019) wurden mehrere Pilotmaßnahmen (pilot action, PA) zur Abfallvermeidung von Lebensmittelabfällen ökologisch bewertet. Annahmegrundlage ist jeweils die Substitution: Gerettete Lebensmittel ersetzen marktübliche Produkte. PA1 (Nachernte/„Gleaning") nutzt sonst verlorene Feldfrüchte; geringere Nährstoffrückstände im Feld erhöhen den Düngerbedarf der Folgekultur. PA2 verarbeitet nicht marktfähige Kartoffeln statt Biogaseinsatz zu Tiefkühl-Chips, die Retail-Ware ersetzen. PA3 vermarktet aussortiertes Obst/Gemüse (kleine Mängel, Größe/Farbe) an lokale Restaurants über ein Direktnetzwerk. PA4 ermöglicht das Einsammeln und Spenden gekühlter/gefrosteter Waren durch Kühlinfrastruktur der polnischen Tafelorganisation. PA5 erweitert die Kapazität der Prager Tafel durch Verarbeitungs- und Gefriereinheiten, um mehr Frischware anzunehmen, zu konservieren und zu verteilen. PA6 quantifiziert in Hotels die Effekte von Vermeidungsmaßnahmen anhand Sortieranalysen vor/nach Umsetzung.

Alle Präventionsmaßnahmen erzielten potenzielle Einsparungen bei Treibhausgasen und weiteren Wirkungskategorien. Die höchsten Einsparungen pro vermiedener Tonne entfielen auf Maßnahmen, die Fleisch- und Molkereiabfälle verhindern (PA4, PA6). Der Hauptbeitrag zur Minderung stammt aus der Substitution: Gerettete Lebensmittel werden konsumiert und ersetzen Neuprodukte. Die direkten Umweltwirkungen der Pilotmaßnahmen sind vergleichsweise gering; Maßnahmen mit zusätzlicher Verarbeitung (PA2, PA5) haben höhere eigene Auswirkungen. Ersetzte Entsorgungswege können zusätzliche Einsparungen bringen (z. B. Vermeidung von Deponierung) oder auch Nachteile, wenn etwa Biogaserzeugung entfällt und dadurch weniger Energie bereitgestellt wird.

Die Multifunktionalität wurde hier mittels „Avoided-Burden"-Ansatz gelöst. Die Annahmen der Substitution sind für das Ergebnis entscheidend.

3.2 Fahrzeug-Batterien weiter nutzen

Die Wiederverwendung ausgedienter Lithium-Ionen-Batterien (LIB) für stationäre Sekundärspeicher zeigt in einer LCA von Spindlegger et al. (2025) deutliche ökologische Vorteile gegenüber Systemen mit Primärbatterien. Untersucht wurden vier Aufarbeitungsstrategien: ein neues Batteriemanagementsystem (BMS) und ein neues Modulgehäuse (Baseline), ein neues BMS bei Wiederverwendung des Gehäuses (Szenario 1), ein neues Gehäuse bei Wiederverwendung des BMS (Szenario 2) sowie die Wiederverwendung von BMS und Gehäuse (Szenario 3).

Die Nutzung von gebrauchten Lithium-Ionen-Batterien erzielten in allen Wirkungskategorien Umweltvorteile; die größten Einsparungen traten bei der Wirkungskategorie Metallverknappung auf (58 % bzw. 61 %). Szenario 2 und 3 steigerten die Gesamteinsparungen weiter, wiesen jedoch ökologische Nachteile in der Süßwasser- und Meeresökotoxizität auf. Die Sensitivitätsanalyse zeigte, dass dies durch die Zuordnung der Umweltauswirkungen zwischen dem 1. und 2. Leben der Batterie (Allokation) verursacht wird, insbesondere aufgrund reduzierter End-of-Life-Gutschriften, mit erheblichen Ergebnisabweichungen (von −22 % bis +233 %), je nach den angenommenen Allokationsfaktoren. Dies unterstreicht den erheblichen Einfluss der gewählten Allokationsmethode.

Der Allokationsfaktor zwischen dem 1. und 2. Leben der Batterie erfolgte mittels einer Experteneinschätzung unter der Annahme, dass eine vollständige Zusammenarbeit (etwa durch das Teilen von Batteriedaten) zwischen LIB-Hersteller und dem Energiesektor noch nicht existiert. Deshalb wurde der Systemerweiterungs-Ansatz hier nicht angewendet. Andererseits werden Second-Life-Batterien derzeit entwickelt und Second-Life-Packs/Module sind bereits verfügbar, was auf einen entstehenden Markt hinweist. Ein Allokationsfaktor von 0,25 wurde angewendet, d.h. für wiederverwendete Komponenten werden 25 % der Zweitnutzung zugerechnet; die übrigen Batteriekomponenten werden vollständig der Erstnutzung zugerechnet.

3.3 Photovoltaik-Module neu gestalten

Emerging Photovoltaiksysteme (EPVs) wie organische Solarzellen, Farbstoffsolarzellen, Perowskit-Solarzellen und Quantenpunkt-Solarzellen befinden sich derzeit in der Entwicklung und eröffnen aufgrund ihres leichten, flexiblen Aufbaus und der kostengünstigen Produktion neue Anwendungsfelder. Um die ökologische Nachhaltigkeit von Innovationen oder fortschrittlichen Materialien für EPV-Technologien zu bewerten, ist es notwendig, den gesamten Lebenszyklus zu betrachten.

Gressler et al. (2022) zeigen anhand von bisher durchgeführten LCAs, dass die EPV-Fertigung im Vergleich zu konventionellen PV-Technologien zu einem geringeren Energiebedarf und kürzeren energetischen Amortisationszeiten führen kann. Hinsichtlich der verwendeten Materialien,

der Energie und der Chemikalien zeigen die überprüften LCAs jedoch auch „ökologische Hotspots“. In Bezug auf ökologische Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft besteht weiterhin Optimierungsbedarf, insbesondere aufgrund des derzeitigen Einsatzes kritischer Rohstoffe, Edelmetalle sowie toxischer und energieintensiver Materialien. Im Sinne des Safe-and-Sustainable-by-Design-Ansatzes sollten bereits in der Entwurfsphase von EPVs nicht nur die Umweltverträglichkeit, sondern auch die Recyclingfähigkeit berücksichtigt werden.

Die Herausforderung bei der Entwicklung von derartigen neuen Produkten besteht darin, einen Kompromiss zu finden zwischen höchstem Wirkungsgrad, bester Stabilität und längster Lebensdauer unter realen Einsatzbedingungen, wirtschaftlichen Interessen und der Nachhaltigkeit aller über den gesamten Lebenszyklus eines EPV-Systems eingesetzten Materialien und Chemikalien. Eine Parameteranalyse in einer LCA ist dabei essenziell.

3.4 Kastenfenster sanieren

Ziel der Studie von Kain et al. (2025) war eine LCA zu historischen Fenstern zu erstellen, die entweder renoviert, technisch aufgerüstet oder durch ein neues Fenster ersetzt werden können. Als Methodik wurde ein LCA-Modell angewendet, bei dem nach der Definition eines Modellfensters sowie der Material- und Energieflüsse in drei Szenarien die damit verbundenen Umweltwirkungen untersucht wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der deutlich geringere Energieverlust bei einem neuen Fenster die Umweltauswirkungen aus der Herstellung des neuen Fensters bei Weitem überwiegt. Dies wird in nahezu allen Wirkungskategorien deutlich. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Energiequelle für die Heizung einen maßgeblichen Einfluss hat. Ein Wechsel von fossiler zu erneuerbarer Energie in der Zukunft wird den Vorteil neuer Fenster erheblich verringern. Solche neuartigen Ansätze sollten die Integration umweltbezogener Überlegungen in die Denkmalpflege unterstützen. Der U-Wert von Fenstern hat einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der LCA. Die Feststellung, dass die LCA eines Fensters stark gegenüber dem Emissionsfaktor für Heizung sensitiv ist, stimmt mit vorhandener Literatur (Sällström et al. 2024) überein, die darauf hinweisen, dass höhere Werte in dieser Hinsicht den Fensteraustausch begünstigen. Sie kommen zu dem Schluss, dass die periodische Instandhaltung bestehender Fenster in den meisten Szenarien die geringsten Lebenszyklus-Klimaauswirkungen und -kosten verursacht und ein Austausch nur unter spezifischen Bedingungen vorzuziehen ist, etwa bei sehr hohen Emissionsfaktoren für Heizung, schlechter thermischer Leistung der Bestandsfenster und sehr langen Gebäudenutzungsdauern (>75 Jahre).

Die Studie zeigt, wie wichtig eine systemische Perspektive ist: Neben dem Produkt Fenster muss auch die Gebäudenutzung einbezogen werden. Ohne Berücksichtigung des U-Werts in der LCA würden die Resultate abweichen.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Abfallvermeidung ist ein zentrales Prinzip nachhaltiger Ressourcenbewirtschaftung und umfasst mehrere, hierarchisch geordnete Strategien. An erster Stelle steht die Vermeidung an der Quelle: Durch die Reduktion des Ressourcenverbrauchs werden Abfälle gar nicht erst erzeugt. Dies schließt sowohl absolute Mengenreduktionen (z. B. materialeffizientes Produktdesign, längere Produktlebensdauern) als auch die Substitution oder konsequente Vermeidung von Stoffen mit hoher Umweltwirkung (hoher Impactfaktor) ein, um potenzielle ökologische Belastungen bereits im Entstehungsprozess zu minimieren.

In einem zweiten Schritt sind Maßnahmen zur effizienteren Nutzung, Verteilung und direkten Wiederverwendung von Ressourcen anzustreben. Effizienzsteigerungen (z. B. optimierte Prozessführung, Mehrfachnutzung von Komponenten) sowie verbesserte logistische Verteilung können Ressourceneinsatz und Abfallaufkommen deutlich verringern. Die direkte Wiederverwendung, also die erneute Nutzung von Produkten ohne wesentliche stoffliche oder energetische Umwandlung, gilt dabei als besonders wirkungsvoll, da sie die mit Neuherstellung und Entsorgung verbundenen Umweltlasten weitgehend vermeidet. Ergänzend dazu dient die Vorbereitung zur Wiederverwendung (z. B. Reinigung, Funktionsprüfung, kleinere Reparaturen) der Rückführung gebrauchter Produkte in den Nutzungskreislauf und erhöht deren Verweildauer im System.

Aus umweltwissenschaftlicher Perspektive ist diese Reihenfolge klar zu priorisieren: Vermeidung an der Quelle vor Substitutions- und Effizienzmaßnahmen, vor Wiederverwendung und deren Vorbereitung; das Recycling bildet die letzte Option. Obwohl Recycling einen wichtigen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leisten kann, sind damit in der Regel zusätzliche Aufwendungen verbunden (Sortierung, Transport, Aufbereitung) sowie Verluste in Qualität und Menge. Lebenszyklusanalysen zeigen daher, dass die höchsten Umweltentlastungen typischerweise durch frühzeitige Vermeidungs- und Wiederverwendungsstrategien erzielt werden, während Recycling vor allem dann sinnvoll ist, wenn die vorhergehenden Optionen ausgeschöpft sind (z.B. Anteile von Lebensmittelabfällen, die sich praktisch nicht vermeiden lassen, etwa Bananenschalen).

Die unterschiedlichen Ansätze der Allokation und damit der Lösung der Multifunktionalität zeigen einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis. Klare Leitlinien werden daher gefordert. Gewichtige Faktoren, wie der U-Wert bei Fenstern oder die Effizienz bei gebrauchten Batterien, sind essenziell bei der Analyse von Abfallvermeidung. Überlegungen müssen transparent dargestellt werden und die Ergebnisse der Umweltwirkungen dahingehend interpretiert werden.

Die „Circular Footprint Formula“ (CFF) stellt einen weiteren Ansatz zur Behandlung dieses Problems dar, doch ihre Anwendung auf genannte Beispiele bringt methodische Herausforderungen mit sich. Insbesondere ist die Einstufung von wiederverwendeten Produkten in Bezug auf ihre Funktion und Lebensdauerverlängerung, wie in einer Empfehlung der Europäischen Kommission dargelegt (Europäische Kommission 2021), keine einfache Aufgabe.

LITERATURVERZEICHNIS

De Laurentiis, V., Casonato, C., Mancini, L., Garcia Herrero, L., Valenzano, A., Sala, S., 2024. Building evidence on food waste prevention interventions, in: Centre, J.R. (Ed.), JRC137760, Luxembourg.

Europäische Kommission, 2021. COMMISSION RECOMMENDATION (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations.

Gollnow, S., Obersteiner, G., Sandor, R., J., d., 2019. Final Evaluation report of Implemented Waste Prevention and Waste Treatment Activities. Deliverable in the Framework of STREFOWA project funded by European Regional Development Fund.

Gressler, S., Part, F., Scherhaufer, S., Obersteiner, G., Huber-Humer, M., 2022. Advanced materials for emerging photovoltaic systems – Environmental hotspots in the production and end-of-life phase of organic, dye-sensitized, perovskite, and quantum dots solar cells. Sustainable Materials and Technologies, e00501.

ISO, 2006a. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO, 2006b. Environmental management -Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044:2006). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Kain, G., Idam, F., Brunnhuber, N., Salhofer, S., 2025. Heritage Conservation and Environmental Protection: Conflicting Interests in a Case Study of Historic Box-Type Windows. Buildings 15.

Llatas, C., Bizcocho, N., Soust-Verdaguer, B., Montes, M.V., Quinones, R., 2021. An LCA-based model for assessing prevention versus non-prevention of construction waste in buildings. Waste Manag 126, 608–622.

Sällström Eriksson, L.; Lidelöw, S., 2024. Maintaining or replacing a building's windows: A comparative life cycle study. IJBPA 2024, 43, 766–786.
Spindlegger, A., Slotyuk, L., Jandric, A., De Souza, R.G., Prenner, S., Part, F., 2025. Environmental performance of second-life lithium-ion batteries repurposed from electric vehicles for household storage systems. Sustainable Production and Consumption 54, 227–240.
Van Ewijk, S., Stegemann, J.A., 2016. Limitations of the waste hierarchy for achieving absolute reductions in material throughput. Journal of Cleaner Production 132, 122–128.

KONTAKT

Dr. Gudrun Obersteiner
gudrun.obersteiner@boku.ac.at
Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft
https://boku.ac.at/lawi/abfk

Bewusstseinsbildung in der Schule: Effekte der Wanderausstellung „GewissensBISS“

Gudrun Obersteiner[1] & Sandra Luck[1]
[1)] Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Lebensmittelverschwendung ist ein relevantes gesellschaftliches und ökologisches Problem; Haushalte verursachen in Österreich über 50 % der vermeidbaren Abfälle. Gleichzeitig sind es gerade die Haushalte, bei denen bisherige Maßnahmen keinen Erfolg gezeigt haben. Als neue Maßnahme wurde die Wanderausstellung „GewissensBISS – geerntet. gekauft. gekübelt“ mit 10 überwiegend interaktiven Stationen zur Vermittlung von Ursachen, Folgen und Anregungen zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen realisiert. Die Ausstellung wurde seit 2023 von mehr als 15.000 Schüler*innen in Österreich gesehen. Die begleitende Evaluation umfasst sowohl Schüler*innen (Pre- und Post-Erhebungen) als auch Pädagog*innen und Eltern. Die Evaluation zeigt ein positives Gesamtbild: Die Ausstellung wird als spannend, verständlich und informativ wahrgenommen, führt zu Wissensgewinnen sowie zu erhöhter Motvation zu lebensmittelbewusstem Verhalten. Über die Hälfte der Schüler*innen gibt an, künftig bewusster mit Lebensmitteln umgehen zu wollen (z. B. weniger wegwerfen, Reste verwerten oder sensorische Prüfungen bei MHD-Produkten durchführen). Rund zwei Drittel der befragten Schüler*innen wollen mit den Eltern über den Besuch der Ausstellung sprechen. Die Ergebnisse unterstreichen das Potenzial interaktiver Bildungsformate, Bewusstseinsbildung im Jugendalter anzustoßen und über familiale Multiplikationseffekte wirksam zu werden.

1 EINLEITUNG

Lebensmittelverschwendung stellt ein relevantes gesellschaftliches und ökologisches Problem dar, das insbesondere in Privathaushalten entsteht - diese verursachen in Österreich über 50 % der Gesamtmenge der vermeidbaren Lebensmittelabfälle (Obersteiner & Stoifl, 2024). Vor diesem Hintergrund hat das Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft der BOKU Wien gemeinsam mit der Tafel Österreich und Unterstützung vom Naturhistorischem Museum Wien die Wanderausstellung „GewissensBISS – geerntet. gekauft. gekübelt“ initiiert und umgesetzt (Abb. 1). Ziel der Ausstellung ist die Vermittlung von Ursachen und Folgen von Lebensmittelabfällen sowie die Bereitstellung von Vermeidungsstrategien und die Sensibilisierung für einen ressourcenschonenden Umgang mit Lebensmitteln in zehn großteils interaktiven Stationen. Die Ausstellung richtet sich primär an Schüler*innen ab etwa zehn Jahren, da Kinder und Jugendliche eine zentrale Rolle in der Bewusstseinsbildung und in der Weitergabe von Wissen an Familie und soziales Umfeld einnehmen.

Die Ausstellung eröffnet die Möglichkeit, nicht nur Wissen zu vermitteln, sondern über die Schüler*innen auch deren Familien zu erreichen und bestenfalls ebenfalls zu bilden. Dieser Prozess wird in der Fachliteratur auch als Reverse Sozialisation bezeichnet – wie diese Effekte verstärkt werden können und wie man sich diese zukünftig zu Nutze machen kann, sollte im vorliegenden Projekt untersucht werden. Im Zentrum der Untersuchung steht die Frage, in welchem Ausmaß die Wanderausstellung bei Schülerinnen und ihrem Umfeld tatsächliche Lern- und Verhaltensprozesse anstößt. Umweltbildungsmaßnahmen sollen einerseits Wissen vermitteln und andererseits im Idealfall langfristig auch zu Verhaltensänderungen führen. Daher wird erstens untersucht, inwiefern der Besuch der Ausstellung bei den Schülerinnen einen messbaren Wissenszuwachs und/oder eine erhöhte Bereitschaft zu umweltbewusstem Handeln bewirkt. Zweitens stellt sich die Frage, ob diese Impulse über den schulischen Kontext hinausreichen – also ob sich Anzeichen für Verhaltensänderungen im familiären Alltag erkennen lassen.



Abb. 1: Beispiele von Exponaten der Wanderausstellung GewissensBISS

2 METHODE

Um zu analysieren, inwiefern die Wanderausstellung dabei unterstützen kann, dass es zu Lerneffekten und zumindest geplanten Verhaltensänderungen bei Schüler*innen und idealerweise auch deren Eltern im Umgang mit Lebensmitteln kommt, und welche Rahmenbedingungen dies unterstützen, wurden unterschiedliche Maßnahmen getestet. In rund der Hälfte der Schulen wurde keine weitere Information zur Ausstellung zur Verfügung gestellt und die Eltern wurden nicht zusätzlich über die Ausstellung informiert. In den anderen Schulen wurden in Kooperation mit der Schulleitung die Eltern wahlweise über Plakate in der Schule oder über Elternbriefe über die Ausstellung in Kenntnis gesetzt.

Insgesamt wurden vier unterschiedliche online ausfüllbare Umfragen für die jeweiligen Zielgruppen (Pädagog*innen, Schüler*innen vor und nach dem Ausstellungsbesuch, Eltern) erstellt und jeweils zeitnahe zur Durchführung an die Schulen verschickt. Um mehr Eltern zum Teilnehmen zu motivieren, wurden zusätzlich Hofergutscheine verlost.

3 ERGEBNISSE

Die Ausstellung wurde von den teilnehmenden Schüler*innen (n=469) überwiegend positiv bewertet. Die häufigste Note war „Gut“ mit 45,4 %, gefolgt von „Sehr gut“ und „Befriedigend“ mit jeweils 23,0 %. Die Note „Genügend“ wurde von 6,4 % vergeben, während „Nicht genügend“ mit 2,1 % nur einen sehr kleinen Anteil ausmacht. Insgesamt liegen damit rund 68 % der Bewertungen im positiven Bereich („Sehr gut“ oder „Gut“).

Die Ausstellung hat bei vielen Schüler*innen unterschiedliche Gefühle ausgelöst. Am häufigsten gaben die Befragten an, sich informiert zu fühlen (56 %, 261 Nennungen), was dafürspricht, dass die Ausstellung wissensvermittelnd wahrgenommen wurde. Darüber hinaus berichteten 21 % (100 Personen), schockiert gewesen zu sein – ein Hinweis darauf, dass bestimmte Inhalte emotional berührt und zum Nachdenken angeregt haben.

In weiterer Folge hatten Schüler*innen die Möglichkeit bis zu drei Exponate zu wählen, welche ihnen am besten in Erinnerung geblieben sind. Am beliebtesten war der Kühlschrank-Fernseher zum digitalen Selbsteinräumen, der von 46 % der Schüler*innen genannt wurde, er liegt damit deutlich an der Spitze. Ebenfalls sehr gut angekommen ist die Fernseh-Ecke mit Kochrezepten mit 35 % Zustimmung. Jeweils 28 % entschieden sich für die „Ist das noch gut?“-Tafel sowie für

die Sinnes-Stationen mit Tasten und Schädlingen. Auch der Lagerkreis zum Drehen wurde mit 24 % häufig genannt.
Um den Wissenszuwachs durch die Ausstellung messbar zu machen, wurden identische Wissensfragen sowohl vor als auch nach dem Besuch gestellt (Abb. 2).

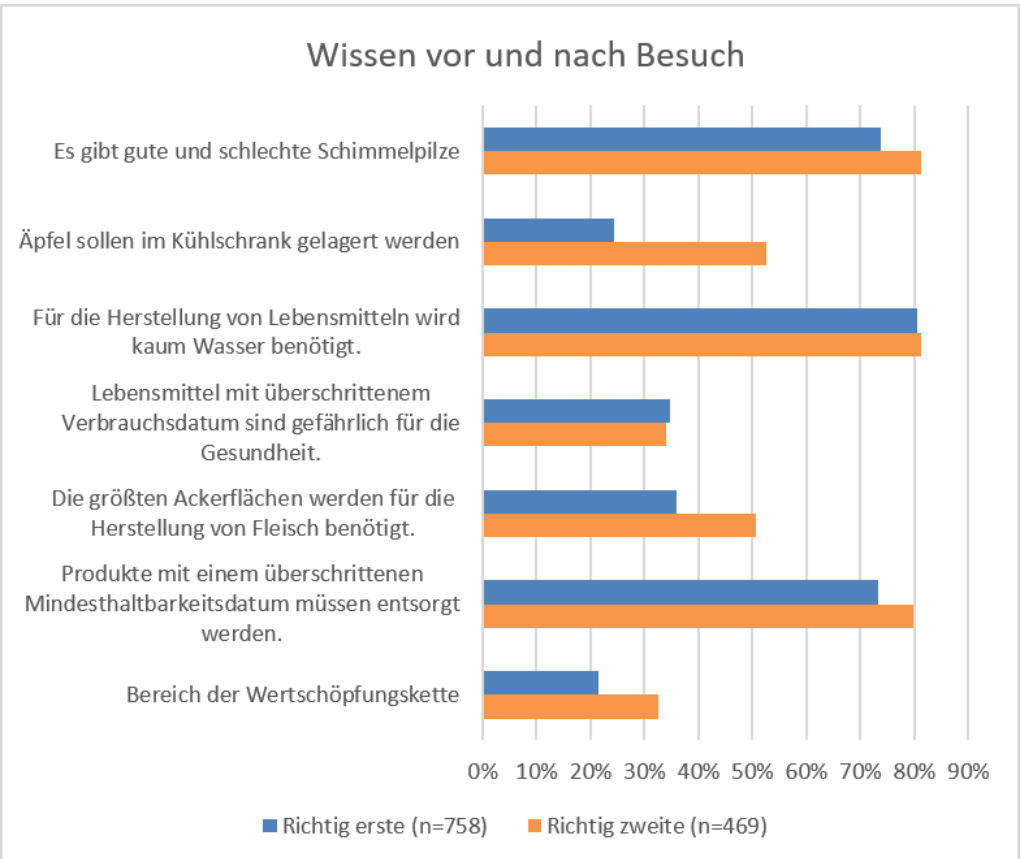


Abb. 2: Antworten auf Wissensfragen im Vorher-Nachher Vergleich

Der Vergleich zeigt deutlich: Nach dem Ausstellungsbesuch wissen die Schüler*innen in mehreren Bereichen spürbar mehr. Am stärksten verbessert hat sich das Wissen zur richtigen Lagerung von Lebensmitteln – hier steigt der Anteil richtiger Antworten um ganze 29 Prozentpunkte (von 24 % auf 53 %). Ein klarer Hinweis darauf, dass praxisnahe Alltagsthemen besonders gut ankommen.

Schüler*innen wurden außerdem dazu befragt, inwiefern sie sich vorstellen können, nach dem Ausstellungsbesuch auch in ihrem Alltag Dinge umzusetzen, die sie bei der Ausstellung erfahren haben. 58 % der befragten Schüler*innen sind sehr oder eher sicher, wenn es darum geht die Eltern über die Ausstellung zu informieren. Besonders hoch ist die Zustimmung zur Aussage, Lebensmittel nach Überschreiten des Mindesthaltbarkeitsdatums nicht sofort wegzuwerfen, sondern sich zunächst auf die eigenen Sinne zu verlassen. 47 % stimmen dem „definitiv“ zu, weitere 24 % eher ja. Zusätzlich geben 15 % an, dies bereits zu tun. Damit zeigt sich hier die größte Bereitschaft zu einer konkreten Verhaltensänderung.

140 befragte Eltern haben bestätigt, dass die Kinder zumindest kurz die Ausstellung erwähnt haben, etwas mehr als 40 % der Befragten gaben an, dass diese Gespräche dazu geführt haben, sich eingehender mit der Thematik auseinanderzusetzen und, dass sie seither konkrete Maßnahmen zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen umgesetzt haben. Ein interessanter Aspekt hierbei: Ausführliche Gespräche führten deutlich häufiger zur Umsetzung von Maßnahmen als kurze. So teilten 64 % der Eltern, die ein ausführliches Gespräch mit den Kindern führten mit, dass sie Maßnahmen im Haushalt umsetzten – im Vergleich dazu nur 41 % derjenigen, die nur kurze Gespräche führten.

Es konnte auch eindeutig festgestellt werden, dass vorinformierte Eltern eher mit den Kindern über die Ausstellung sprachen. So gab es in 78 % der Haushalte Gespräche zwischen Kinder und Eltern, in denen die Eltern bereits davor informiert wurden, jedoch nur in 35 % der Haushalte, die nicht im Vorfeld informiert wurden

4 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Wanderausstellung GewissensBISS wurde gleichermaßen sehr positiv von Lehrer*innen, Schüler*innen und Eltern in Niederösterreich aufgenommen. Von 469 teilnehmenden Schüler*innen bewerteten 68% die Ausstellung mit sehr gut oder gut. Der Vergleich zeigt deutlich: Nach dem Ausstellungsbesuch wissen die Schüler*innen in mehreren Bereichen spürbar mehr. Am stärksten verbessert hat sich das Wissen zur richtigen Lagerung von Lebensmitteln – hier steigt der Anteil richtiger Antworten um ganze 29 Prozentpunkte. Auf die Fragen hinsichtlich potenzieller Verhaltensänderungen gab es eine besonders hohe Zustimmung der Schüler*innen zur Aussage, Lebensmittel nach Überschreiten des Mindesthaltbarkeitsdatums nicht sofort wegzuwerfen, sondern sich zunächst auf die eigenen Sinne zu verlassen.

Durch das Projekt konnte eindeutig festgestellt werden, dass es zu einer Multiplikatorwirkung kommt und Schüler*innen auch das Verhalten ihrer Eltern beeinflussen - so wurden in 20 % der befragten Haushalte nach dem Gespräch mit den Schüler*innen Maßnahmen umgesetzt.
40 % der Befragten gaben an, dass diese Gespräche dazu geführt haben, sich eingehender mit der Thematik auseinanderzusetzen und, dass sie seither konkrete Maßnahmen zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen umgesetzt haben.

LITERATURVERZEICHNIS

Obersteiner, G., Stoifl, B. Lebensmittelverluste und -abfallaufkommen in Österreich. Österr Wasser- und Abfallw 76, 238–248 (2024). https://doi.org/10.1007/s00506-024-01032-9

KONTAKT

Dr. Gudrun Obersteiner
gudrun.obersteiner@boku.ac.at
Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft
https://boku.ac.at/lawi/abfk

Batterien im Abfall: Immer noch ein unterschätztes Risiko

Nina Nowak[1], Elena Dvorak[1], Roland Pomberger[1] & Thomas Nigl[1]
[1)] Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: In der österreichischen Abfallwirtschaft besteht eine strukturelle Sammellücke: Während die Sammelquote für Gerätebatterien in Österreich zwar erreicht wurde, haben Sortieranalysen im Jahr 2026 gleichzeitig gezeigt, dass acht Lithium-Batterien (LiB) pro Tonne Abfall und damit eine enorme Anzahl an Zündquellen im Restmüll zu finden sind. In diesem Beitrag wird auf die Neuerung in der Kategorisierung von Batterien laut EU eingegangen. Anschließend wird anhand des Thermal Runaways die Begünstigung von Batteriebränden in der Abfallwirtschaft begründet. Basierend darauf wird die aktuelle Situation um Sammelmengen und in Verkehr gesetzte (IVS) Mengen in Österreich im Zeitraum 2018 bis 2024 betrachtet. Das abschließende Kapitel widmet sich Risiken und Folgen, die in der bisherigen Betrachtung häufig unberücksichtigt bleiben.

1 EINLEITUNG

Der Ursprung des Brandrisikos durch Lithium-Batterien (LiBs) in der österreichischen Abfallwirtschaft liegt unter anderem in einer strukturellen Sammellücke. Nicht alle Batterien, die einmal in Verkehr gesetzt wurden, finden auch den Weg zurück in ein geeignetes Sammelsystem. Laut der Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria (EAK) lag der Lithiumanteil der gesamten in Verkehr gesetzten Masse Gerätebatterien im Jahr 2024 bereits bei 46,5 % (EAK 2025). In diesem Jahr belief sich die berechnete Sammelquote für Lithium-Batterien laut der neuen Berechnungsmethode der EU Batterienverordnung 2023/1542 auf nur rund 15,7 %. Die größten Probleme dabei sind die Entsorgung über falsche Sammelsysteme, der Bestandsaufbau durch Hortung in den Haushalten sowie die stetig wachsende Zahl an Batterien in der Nutzung, die sich aus der jährlich steigenden Anzahl in Verkehr gesetzter Batterien mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von ca. 5 Jahren (Nigl et al. 2020) ergibt. Ein Großteil dieser Batterien verschwindet in beträchtlichen Massen entweder in den Schubladen zuhause oder, was deutlich gefährlicher ist, in anderen Fraktionen des Siedlungsabfalls. Im Jahr 2026 befinden sich acht Stück LiBs pro Tonne Abfall im Restmüll (VOEB 2026). Verglichen dazu waren es im Jahr 2016 noch zwei Stück pro Tonne (Nigl et al. 2020). Verschärft wird das Problem durch eine bislang uneinheitliche Kategorisierung der Batterien. Österreich unterschied bis Ende 2025 nur drei Batteriekategorien, nämlich Geräte-, Fahrzeug- und Industriebatterien (EAK 2025). Erst mit der EU-Batterieverordnung 2023/1542 (EU 2023) gelten seit 01.01.2026 fünf Kategorien, darunter eine eigene für Batterien leichter Verkehrsmittel (LV-Batterien, z.B. E-Bike-Akkus). Bis zur flächendeckenden Umstellung der Sammelinfrastruktur im April 2026 landeten diese großformatigen, energiereichen Akkus faktisch im selben Sammelbehälter wie kleine Gerätebatterien (VÖA 2026). Angesichts der hohen Energiedichte von LV-Akkus stellt dieses Missverhältnis ein potenzielles eigenständiges Sicherheitsrisiko für Sammelstellen dar. Gefährlich wird es, wenn bestimmte Bedingungen ein thermisches Durchgehen ermöglichen und die Gegebenheiten in der Abfallwirtschaft anschließend die Entstehung oder Ausbreitung eines Brandes begünstigen.

1.1 Brandentstehung

Der Umgang mit lithiumhaltigen Batterien und Akkus in der Abfallwirtschaft erfordert besondere Sorgfalt, da es unter bestimmten Bedingungen zu sicherheitsrelevanten Problemen kommen kann. Bei unsachgemäßer Handhabung wie beispielsweise übermäßiger thermischer, elektrischer oder mechanischer Belastung eines vollständig oder teilweise geladenen Akkus besteht die Gefahr, dass dieser sich infolge eines thermischen Durchgehens entzündet oder sogar

explodiert (Wu et al. 2023). Ein Verbrennungsprozess benötigt jedoch mehr als nur eine Lithium-Batterie als Zündquelle, um eigenständig eine Recyclinganlage, ein Sammelfahrzeug oder einen Wirtschaftshof niederzubrennen. Für die Initiierung eines Brands sind drei Komponenten erforderlich: Brennstoff, Oxidationsmittel, beispielsweise Sauerstoff aus der Luft sowie eine ausreichende Energiezufuhr in Form einer Zündquelle, etwa ein elektrischer Funke (Hauptmanns 2013). Erst das gleichzeitige Vorhandensein dieser drei Faktoren ermöglicht den Brandbeginn. Zur Aufrechterhaltung des Prozesses ist eine vierte Komponente notwendig: die selbsterhaltende chemische Kettenreaktion (Nigl und Pomberger 2018). Abb. 1 a zeigt die vier essentiellen Komponenten eines selbstgängigen Brandes. In der Abfallwirtschaft sind alle vier Komponenten regelmäßig gegeben. Die Energiezufuhr liefern fehlentsorgte LiBs als Zündquelle, den Brennstoff die Abfallfraktion, in der sich die Batterien befinden und die Umgebungsluft das Oxidationsmittel. Die vierte Komponente, die Kettenreaktion, kann sich einstellen, sobald der Brand einmal initiiert ist und ausreichend Brennstoff sowie Sauerstoff nachströmen. Abfall selbst kann zudem bei unzureichender Durchlüftung und entsprechendem Lageraufbau durch mikrobiologische und chemische Umsetzungsprozesse Wärme entwickeln (Holzer 2007). Bei geringem Sauerstoffangebot wird die Temperaturentwicklung als „Schwelbrand" bezeichnet. Wird der Abfallhaufen, wie in der Abfallwirtschaft üblich, umgesetzt, kann Sauerstoff einströmen, wodurch der Schwelbrand offen zu brennen beginnt (Klinkhardt 2017). Neben dieser Selbsterhitzung des Abfalls kann jedoch auch die Batterie selbst zur eigentlichen Zündquelle eines Brandes werden – welche Ursachen und Prozesse dazu führen, wird im Folgenden erläutert.

1.2 Brandursache

Lithium-Batterien (LiBs) können durch unterschiedliche interne und externe Einwirkungen beschädigt werden, was im Extremfall zum vollständigen Versagen der Zelle führt. Die dabei ablaufenden Prozesse können hohe Temperaturen im Zellinneren hervorrufen und zu einer Brandentwicklung führen (Fleischhammer und Döring 2013). Insbesondere ein interner Kurzschluss kann die LiBs somit zur Zündquelle im Abfall machen (Nigl und Pomberger 2018). Jedoch gibt es auch andere Ursachen und Reaktionspfade zur Entstehung eines sogenannten Thermal Runaways. Diese Faktoren zeigt Abb. 1 b.

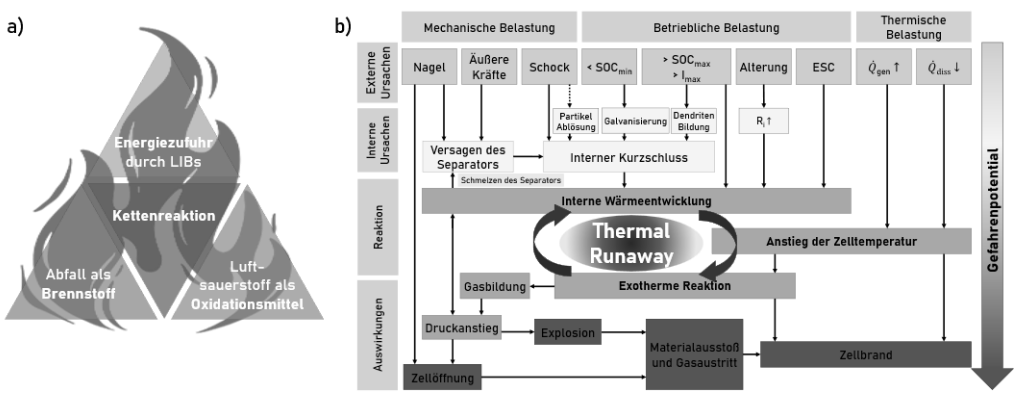


Abb. 1: a) Brandtetraeder adaptiert nach Nigl und Pomberger (2018), b) Interne und externe Auslöser und Ablauf des Thermal Runaways, ESC: external short circuit, SOC: state of charge, adaptiert nach Innovation News Network (2019)

Auslösend wirken mechanische, betriebliche und thermische Belastungen. Sie führen entweder zu einer direkten Schädigung der Zelle, zu einer Zellöffnung oder zur Initiierung interner Wärmeentwicklungsprozesse. Übersteigen die entstehende Wärme und die exothermen Reaktionen die Wärmeabfuhr, entwickelt sich ein selbstverstärkender Thermal-Runaway-Prozess. Dieser geht

mit Gasbildung und Druckanstieg einher und kann zum Austritt von Material und brennbaren Gasen führen, wodurch ein Zellbrand begünstigt wird (Innovation News Network 2019). Entscheidend für die Abfallwirtschaft ist, dass zwei der drei Belastungsarten auch nach dem Ende der Nutzungsphase fortbestehen. Während die betriebliche Belastung fast ausschließlich während der Nutzung auftritt, sind mechanische und thermische Belastungen auch im End-of-Life-Stadium präsent und stellen dort ein reales Gefährdungspotenzial dar, sei es durch mechanische Einwirkungen bei Transport-, Umlade- und Aufbereitungsprozessen oder durch thermische Einwirkungen infolge externer Hitze (z.B. Witterung) oder Selbsterhitzung.

2 BATTERIESAMMLUNG IN ÖSTERREICH

Die steigende Popularität von batteriebetriebenen Geräten in unseren Alltag lässt sich zwar durch ansteigende in Verkehr gesetzte Mengen (IVS) bestätigen, spiegelt sich allerdings nur bedingt in den rücklaufenden Mengen wider. In dem folgenden Kapitel werden die IVS Mengen und Sammelmengen für Gerätebatterien mit Fokus auf Lithium-Batterien im Verhältnis gesetzt. Anschließend wird die Frage aus Kapitel 1 nach dem Verbleib der Batterien nach ihrer Nutzungsdauer aufgegriffen.

2.1 Vom Verkauf zur Nutzung in die Sammlung – oder nicht?

Die Sammelmenge für Gerätebatterien setzt sich überwiegend aus End-of-Life-Batterien (EoL-Batterien) zusammen, die bereits eine Nutzungsdauer von wenigen Monaten bis mehrere Jahre durchlaufen haben und anschließend bei einer Sammelstelle oder einem Abfallsammler entsorgt wurden. In Österreich wurden im Jahr 2024 knapp über 7.000 Tonnen Gerätebatterien in Verkehr gesetzt, während die Rücklaufmenge (Sammelmenge) sich auf knapp über 3.500 Tonnen beläuft. Um das Verhältnis zwischen IVS Mengen und Sammelmengen abzubilden sind in Abb. 2 die Mengen für den Zeitraum 2018 bis 2024 dargestellt. Die Sammelquote berücksichtigt die gesammelten Menge des betrachteten Jahres und setzt diese in Relation zu der Summe der in Verkehr gesetzten Mengen des betrachteten Jahres und der zwei Jahre zuvor (EAK 2017-2025). Laut EU Batterienverordnung 2023/1542 wird für die Sammelquoten-Berechnung ab 18. Februar 2024 die gesammelte Menge des aktuellen Jahres (z.B. 2024) durch die in Verkehr gesetzte Menge der vorherigen drei Jahre (2021, 2022 und 2023) geteilt. Die neu berechnete Sammelquote für das Jahr 2024 ist ebenfalls in Abb. 2 dargestellt.

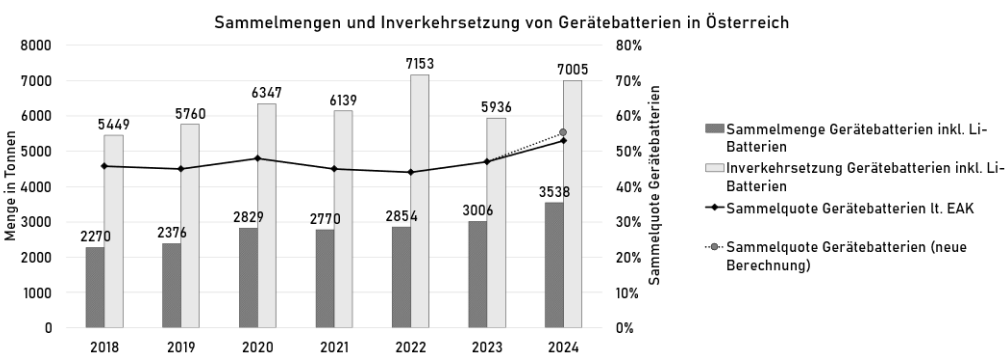


Abb. 2: Gerätebatterie-Sammelquote und Entwicklung der Gerätebatteriemengen in Österreich im Zeitraum 2018 bis 2024, erstellt mit Informationen aus den Tätigkeitsberichten der Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH nach alter Sammelquoten-Berechnung (EAK 2017-2025)

Während die vorgegebene Sammelquote von 45 % für Gerätebatterien im Zeitraum 2018 bis 2024 in Österreich mit Ausnahme von 2022 erreicht und sogar übertroffen werden konnte, stellt

sich die Frage nach dem Verbleib der nicht unbeachtlichen restlichen Menge an EoL-Batterien (EU 2023). Besonders bei Lithium-Batterien zeigt sich, dass die Menge an IVS LiBs steigt, während die Sammelquote für LiBs deutlich hinterherhinkt. LiBs machten beispielsweise in den Jahren 2020 bis 2022 einen Anteil von durchschnittlich 43 % der in Verkehr gesetzten Gerätebatterien aus, während sich die Sammelquote für LiBs im Jahr 2022 auf nur knapp über 8 % belief (berechnet auf Basis der Jahre 2020, 2021 und 2022 mit Informationen aus EAK 2017-2025).Um den Kontrast zur Gesamt-Sammelquote in Abb. 2 aufzuzeigen ist in Abb. 3 die Entwicklung der LiB-Sammelmenge und der IVS Menge LiBs sowie der Verlauf der LiB-Sammelquote in alter Berechnungsweise dargestellt. Für die Berechnung der Sammelquote für die Jahre 2018 und 2019 konnten keine Daten zum LiB-Anteil in der gesammelten oder in Verkehr gesetzten Menge gefunden werden. Die ab dem Jahr 2024 neu berechnete LiB-Sammelquote nach EU Batterienverordnung 2023/1542 ist ebenfalls in Abb. 3 dargestellt.

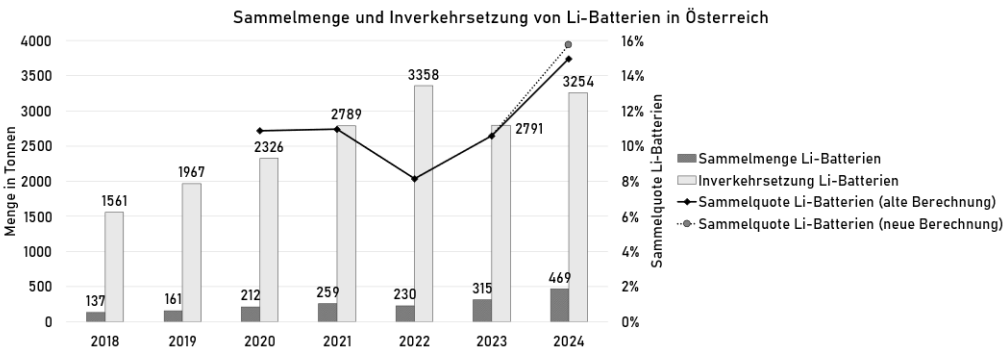


Abb. 3: LiB-Sammelquote nach alter und neuer Berechnung und Entwicklung der LiB-Mengen in Österreich im Zeitraum 2018 bis 2024, Berechnungen und Graphik erstellt mit Informationen aus den Tätigkeitsberichten der Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH (EAK 2017-2025)

Die dargestellte Diskrepanz zwischen der Menge an in Verkehr gesetzten Lithium-Batterien und deren erfasster Sammelmenge verdeutlicht, dass ein relevanter Anteil der EoL-Batterien und insbesondere LiBs den vorgesehenen Sammel- und Verwertungswegen entzogen bleibt. Eine unsachgemäße Entsorgung bzw. das Verbleiben von Batterien in nicht dafür vorgesehenen Abfallströmen ist allerdings nicht nur für das Erreichen der Sammelquoten relevant. Vielmehr ergeben sich daraus sowohl sicherheitstechnische Risiken durch mögliche Batteriebrände als auch ressourcenwirtschaftliche Folgen, da Wert- und kritische Rohstoffe einer Rückgewinnung entzogen werden. Insbesondere bei Lithium-Batterien gewinnt diese Problematik vor dem Hintergrund ihres zunehmenden Einsatzes und der damit steigenden Mengen im Abfallstrom an Bedeutung. Die daraus resultierenden Brandrisiken sowie deren vermutete Dunkelziffer werden im folgenden Kapitel näher betrachtet.

3 RISIKO

Unsachgemäße Entsorgung von Batterien aller Bauarten führt nicht nur zu unmittelbaren Brandrisiken, sondern entzieht der Kreislaufwirtschaft wertvolle und kritische Rohstoffe wie Lithium, Kupfer, Kobalt und Nickel (Heimes et al. 2024). Dadurch gehen Substitutions- und Wertschöpfungspotenziale verloren und die Abhängigkeit von Primärrohstoffen bleibt bestehen. Kommt es im Abfallstrom zu Bränden, steigt die Risikolage zusätzlich durch akute Emissionen toxischer und entzündlicher Verbindungen.

3.1 Emissionen

Der zu Beginn erläuterte Thermal Runaway von Lithium- und Lithium-Ionen-Batterien kann abhängig von Zellchemie, Ladezustand und Umgebungsbedingung komplexe Gemische aus brennbaren und toxischen Gasen freisetzen. Zu den häufig nachgewiesenen Bestandteilen zählen insbesondere Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2), Schwefeldioxid (SO_2) und verschiedene Kohlenwasserstoffe (Bugryniec et al. 2024). Darüber hinaus können weitere toxikologisch relevante organische Verbindungen, darunter flüchtige organische Verbindungen (VOC), Cyanwasserstoff (HCN) (Jalali et al. 2026) sowie Carbonylverbindungen und fluorhaltige Zersetzungsprodukte wie Fluorwasserstoff (HF) und Phosphoroxidfluorid (POF_3) entstehen (Bugryniec et al. 2024). Letztere stehen insbesondere mit der Zersetzung des lithiumhaltigen Leitsalzes $LiPF_6$ und den daraus gebildeten fluorhaltigen Reaktionsprodukten in Zusammenhang (Nedjalkov et al. 2016; Larsson et al. 2017). Bei kontrollierten Brandversuchen in Sammelfahrzeugen in Neuseeland wurden CO-Konzentrationen von bis zu 1.658 ppm gemessen (Jalali et al. 2026). Damit wird der in Österreich geltende MAK-Kurzzeitwert für Kohlenmonoxid von 60 ppm bei einer Bezugsdauer von 15 Minuten um mehr als das 27-fache überschritten (GKV, vom BGBl. II Nr. 339/2025). Neben der Luftschadstofffreisetzung ist das kontaminierte Löschwasser ein entscheidender Faktor. Jalali et al. 2026 zeigt bei Brandversuchen, dass sich erhöhte Konzentrationen an Fluorid, Phosphat- und Phosphor-Spezies, Nickel, Kupfer, Aluminium und Mangan im kontaminierten Löschwasser wiederfinden. Dies kann aquatische Systeme schädigen und Abwasserbehandlungsanlagen überfordern (Jalali et al. 2026). Aufgrund der Möglichkeit der Wiederentzündung von Bränden in der Abfallwirtschaft ist das vollständige Kühlen und Abzielen auf betroffene Einheiten und Glutnester ausschlaggebend. Aktuelle Studien wie Zhang et al. 2026 diskutieren hier Vor- und Nachteile von Tensid-basierten, fluorfreien Löschmitteln gegenüber konventionellen Schäumen, insbesondere hinsichtlich Benetzbarkeit, Kühlleistung und Vermeidung persistenter Fluorchemikalien (u.a. PFAS), legen aber nahe, dass für den Einsatz umweltschonender, fluorfreie Löschsysteme aktuell noch an Langzeitstudien und umfangreiche Evaluierung fehlen. Nichtsdestotrotz zeigt die Praxiserfahrung der Feuerwehren, dass die geringen Vorteile LiB-spezifischer Löschmittelzusätze nicht ausreichen, um die Mehraufwände in Beschaffung und Logistik zu rechtfertigen.

3.2 Dunkelziffer

Die tatsächliche Anzahl batterieverursachter Brände in der Abfallwirtschaft als auch österreichweit gilt als unterschätzt. Gründe sind u.a. unsichere Ursachenbestimmung (Batterie als Zündquelle oft nicht mehr nachweisbar), betriebsinterne Meldelogik (Near-Miss-Ereignisse oder intern gelöschte Brände werden nicht extern berichtet), reputations- bzw. versicherungsrechtliche Zurückhaltung und fehlende standardisierte Erfassungssysteme (Nigl und Pomberger 2018; Heimes et al. 2024). Beispielsweise werden Batterie- und Akkubrände in den Brandstatistiken der Bundesländer sowie der österreichübergreifenden Statistik nicht einzeln erfasst. Eine Presseaussendung des Kuratoriums für Verkehrssicherheit (KFV) zeigt allerdings, dass die bestätigten Akkubrände in der Steiermark im Jahr 2022 einen Anteil von 8,7 % der durch elektrische Energie entstanden Brände verursacht haben. Im Jahr 2024 ist dieser Anteil auf 13,3 % gestiegen und machte damit rund 2 % der gesamten Brandereignisse des Jahres 2024 in der Steiermark aus (Rosenkranz 2025; BV Steiermark 2025). Eine Verbesserung der Datenlage erfordert somit eine einheitliche Brandursachenkodierung für Entsorgungsbetriebe, Anreize für anonymisierte Meldungen von Batterie-Brände inklusive Near-Miss-Ereignisse und sensorbasierte Früherkennung (z.B. IR-Thermografie) mit strukturierter Datenauswertung. Zusammen mit Maßnahmen wie Öffentlichkeitsarbeit und der Etablierung einer eigenen Aufzeichnung von Batteriebränden in Betrieben als auch in den Brandstatistiken lassen sich Risiko, Emissionen nachhaltig senken, während der Wertstoffkreislauf geschlossen werden kann.

LITERATURVERZEICHNIS

Bugryniec, P. J., Resendiz, E. G., Nwophoke, S. M., Khanna, S., James, C., & Brown, S. F. (2024). Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure — Considering toxic and flammable compounds. *Journal of Energy Storage*. doi:10.1016/j.est.2024.111288

BV Steiermark. (2025). *Brandschadenstatistik 2024.* Landesstelle für Brandverhütung in Steiermark. Retrieved August 21, 2026, from https://bv-stmk.at/statistik/archiv

EAK. (2017-2025). Tätigkeitsberichte. Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH. Retrieved August 21, 2026, from www.eak-austria.at: https://www.eak-austria.at/news/?_newskategorie=taetigkeitsbericht

EAK. (2025). Tätigkeitsbericht 2024. (Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH, Ed.) Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH. Retrieved August 19, 2026, from https://www.eak-austria.at/taetigkeitsbericht-des-jahres-2024/

EU. (2023). Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien. (Europäisches Parlament, Ed.) Retrieved August 21, 2026, from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj?locale=de

Fleischhammer, M., & Döring, H. (2013). Chemische Sicherheit. In R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (pp. 285–298). Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-642-30653-2_23

GKV. (2025). Verordnung des Bundesministers für Arbeit und Wirtschaft über Grenzwerte für Arbeitsstoffe sowie über gefährliche Arbeitsstoffe. *(BGBl. II Nr. 339/2025)*. Österreich. Retrieved August 21, 2026, from https://www.ris.bka.gv.at

Hauptmanns, U. (2013). *Prozess- und Anlagensicherheit.* Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-37253-7

Heimes, H. H., Kampker, A., Offermanns, C., Vienenkötter, J., Maltoni, F., Cattani, N. S., . . . Kreisköther, K. (2024). Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. *Kampker, Heimes (Hg.) 2024 – Elektromobilität*, pp. 687-704. doi:10.1007/978-3-662-65812-3_43

Holzer, C. (2007). *Anforderungen an die Zwischenlagerung von heizwertreichen Abfällen.* Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Innovation News Network. (2019). *Why calorimeters are essential to improve battery safety*. Retrieved August 21, 2026, from Innovation News Network: https://www.innovationnewsnetwork.com/calorimeters-battery-safety/948/

Jalali, H., Collie, L., & Baroutian, S. (2026). Air emissions & firewater runoff contamination from lithium-ion battery fires in rubbish trucks. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*. doi:10.1016/j.envpol.2025.127437

Klinkhardt, U. (2017). Brandschutz in Recycling- und Abfallverwertungsanlagen. In T. e. Thomé-Kozmiensky, *Recycling und Rohstoffe*. TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky. Retrieved August 21, 2026

Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., & Mellander, B.-E. (2017). Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Scientific reports*. doi:10.1038/s41598-017-09784-z

Nedjalkov, A., Meyer, J., Köhring, M., Doering, A., Angelmahr, M., Dahle, S., . . . Schade, W. (2016). Toxic Gas Emissions from Damaged Lithium Ion Batteries—Analysis and Safety Enhancement Solution. *Batteries*. doi:10.3390/batteries2010005

Nigl, T., & Pomberger, R. (2018). Brandgefährlicher Abfall – Über Risiken und Strategien in der Abfallwirtschaft. *Konferenzband zur 14. Recy & DepoTech Band*. Retrieved August 21, 2026

Nigl, T., Schwarz, T. E., Walch, C., Baldauf, M., Rutrecht, B., & Pomberger, R. (2020). Characterisation and material flow analysis of end-of-life portable batteries and lithium-based batteries in different waste streams in Austria. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, pp. 649-659. doi:10.1177/0734242X20914717

Rosenkranz, S. (2025). *Experten warnen vor Elektro- und Akkubrandgefahr in den kommenden Monaten.* Pressemitteilung, Kuratorium für Verkehrssicherheit (KFV). Retrieved August 18, 2026, from https://www.kfv.at/elektro-und-akkubrandgefahr/

VÖA. (2026). Neue Sammelbehälter für e-Bike- und e-Scooter-Akkus ab 1. April. (Vereinigung öffentlicher Abfallwirtschaftsbetriebe, Ed.) Retrieved August 21, 2026

VOEB. (2026). *LITHIUMBATTERIEN: 70 POTENZIELLE BRANDHERDE.* Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe. Retrieved August 21, 2026

Winslow, K. M., Laux, S. J., & Townsend, T. G. (2018). A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 263-277. doi:10.1016/j.resconrec.2017.11.001

Wu, S., Wang, C., Luan, W., Zhang, Y., Chen, Y., & Chen, H. (2023). Thermal runaway behaviors of Li-ion batteries after low temperature aging: Experimental study and predictive modeling. *Journal of Energy Storage*. doi:10.1016/j.est.2023.107451

Zhang, Y., Yao, M., Tian, J., Ma, Y., & Mao, B. (2026). Surfactant-based firefighting agents: recent advances and applications in lithium-ion battery fire suppression — A critical review. *Journal of Energy Storage*. doi:10.1016/j.est.2026.122347

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



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

English Abstracts

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

Manufacturer Independent Repair Options for Modular Smartphones

Ralf Brüning[1], Florian Witt[1] & Thomas Krause[2]
[1)] Dr. Brüning Engineering UG, Brake, Germany
[2)] SHIFT GmbH, Wabern-Falkenberg, Germany

It's no secret that smartphones rank first among the most widespread and most-used electronic devices per person in society. Approximately 7.6 billion smartphones will be “in use” worldwide in 2026. With a global population of approximately 8.3 billion people in the same year, theoretically almost everyone owns a smartphone. In 2024, approximately 71 million people in Germany used a smartphone. Based on Germany’s population of approximately 83 million people, this corresponds to over 85% of the country’s population. One of the consequences of rapidly advancing technological change is that users replace their smartphones, on average, every 2 to 3.5 years. While users in Germany replace their smartphones every 24 months on average, the European average is approximately 40 months. In addition, users do not immediately make unused devices available for a “second life” - for example, by reselling them or donating them for further use - nor do they dispose of them as waste. The replaced and unused devices remain in users’ households. There are approximately 200 million unused devices in German households. The consumption of resources is enormous, as each device contains a large number of valuable metals, rare earth elements, and so-called conflict minerals. The environmental impact becomes even more significant when devices have a short life cycle or useful life, as is often the case with smartphones. Extending the service life of electrical and electronic devices can therefore help reduce the use of resources for new production and the associated environmental impacts. This can be achieved primarily by improving repairability, such as by ensuring that the device meets high eco-design standards. Against this backdrop, SHIFT GmbH is conducting the research project “loopSHIFTED - The Contribution of Modularized Used Smartphones and Tablets with Manufacturer Independent Repair Options to the Circular Economy and the Reduction of Environmental Impacts” in cooperation with the University of Kassel, Kassel - Institute for Sustainability, Center for Environmental Systems Research and Dr. Brüning Engineering UG as a scientific partner for data collection and technical aspects. The goal of the project is to develop and test the concept of “Shiften” - the transition of smartphones to a modular design - in order to make potential future repairs or the replacement of wear-and-tear parts, particularly the battery, economically viable. “Shiften” is defined here as a repair and remanufacturing process based on the modular design of the SHIFTPHONES. To this end, a demonstrator model was selected from among various smartphone models, on which the simulated repair work was tested as an example. As part of the practical work carried out, the focus was on key conceptual components, where measurable efficiency gains in disassembly and assembly were achieved through their modular design and the adaptation of the connecting elements used. Specifically, these components include the housing (back cover), display, and battery, as well as the fasteners used with them. This is because separating the display or the housing (from the rest of the device is the first step in accessing the other components located inside the device. In practical test runs, the design modifications to the housing - which were specifically conceived for repair purposes while maintaining the device’s original properties (water and dust resistance) - reduced the simulated repair time by approximately 70%. This figure does not yet include synergy effects on other device components, which can also be accessed more easily and quickly during a repair thanks to a back cover that is easier to remove. When these synergy effects were included, initial calculations showed that the Repair Score classification (Reparability Index Calculator for Smartphones and Slate Tablets in support of the Commission Delegated Regulation (EU)) for the demonstrator model could be raised from Class C to Class B. The work carried out in the project focuses on a specific device model. However, the approach can be adapted from this reference model to other models.

Social Urban Mining in the Refurbishment of the Otto-Möbes-Academy Graz – From Planning to Implementation

Markus Meissner[1], Thomas Romm[1], Sonja Zumpfe[1] & Jasmin Bermadinger[1]
[1)] BauKarussell e.Gen., Vienna, Austria

The construction sector plays a pivotal role in advancing circular economy and resource efficiency strategies. This paper presents the application of Social Urban Mining (SUM) in the refurbishment of the Otto-Möbes-Academy in Graz, Austria, following a two-phase approach of conceptual planning and operational implementation.

The results highlight significant multi-dimensional impacts. More than 87 tonnes of materials were systematically managed, including 8.6 tonnes reused internally, 32 tonnes transferred to external users, and remaining fractions sorted into recyclable and non-recyclable waste streams. Over 500 components were catalogued at detailed level, enabling high reuse rates via a structured digital marketplace. The findings show that detailed inventories and sufficient marketing time are key to maximizing reuse potential. From a socio-economic perspective, the project generated 1,786 working hours and enabled the qualification of eight individuals from labour market integration programmes, demonstrating the potential to combine circular practices with social inclusion. Economically, revenues of approximately €37,000 were achieved, with over 97% originating from the sale of reused components. Considering avoided disposal, procurement, and dismantling costs, the project reached cost neutrality. All key indicators exceeded initial projections, confirming the robustness of the planning approach. Beyond quantifiable outcomes, the project activated regional reuse networks and supported SMEs, non-profits, and community initiatives. The involvement of an independent intermediary ensured transparency, fair pricing, and legal certainty, particularly relevant for public-sector clients.

The findings confirm that SUM is highly applicable to refurbishment projects, where early intervention enables higher reuse rates. Additional benefits include reduced project duration through parallelized processes. In conclusion, Social Urban Mining represents a scalable approach to implementing circular economy principles in construction. It generates ecological, economic, and social value by reducing waste, lowering emissions through lifecycle extension, and fostering inclusive employment, with success depending on skilled stakeholders and effective coordination.

Industrial Wastewater in Germany as a Source of Critical Metals

Lisa-Marie Hess[1], Daniel Vollprecht[1], Frank Haubrich[2], Jana Pinka[2], Janina Leiblein[3] & Thomas Heß[3]

[1)] University of Augsburg, Chair of Resource and Chemical Engineering, Augsburg, Germany
[2)] G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, Halsbrücke, Germany
[3)] Leiblein GmbH, Hardheim, Germany

Recent developments have shifted the focus from merely treating wastewater to recovering valuable materials from it. One of the goals of the LiquidMining project is to evaluate the potential of industrial wastewater in Germany for critical metals. A literature review revealed that there is currently no comprehensive overview of critical metal concentrations in industrial wastewater. Furthermore, many elements, such as rare earth elements and lithium, have rarely been investigated in individual studies. Data on metal concentrations and wastewater volumes from facilities requiring a water law permit were obtained from the Bavarian Environment Agency (LfU). These data indicate a total load of more than 3 t of critical metals in Bavaria in 2024, including 881 kg of tungsten. The manufacturing industries with the highest loads were found to be chemical production, metal production and processing, and the manufacture of data processing, electronic and optical equipment. In addition to the literature review, real samples were systematically acquired from various industrial sectors. Overall, 70% of participating companies came from the economic sectors that, according to LfU data, had the highest loads. The next phase of the project will involve analyzing the samples and investigating the extraction of relevant metals.

Resilience of Water Service and Reservoirs in Rural Areas – Collaborative Project SpeicherLand

Philipp Dost[1a], Falk Händel[2,3], Timm Wunderlich[4], Maike Rath[1a], Tanja Morgenstern[1a], Anna-Maria Hasterok[1b], Clara Brandes[1a], Sascha Rudolph[5], Felix Bilek[5], Andreas Hänel[6], Martin Pumpa[6], Elisabeth Grube[6], Thomas Grab[4], Bernd Bräutigam[7], Maria-Barbara Schaller[8], Georg Kramer[8], Martin Binder[9,10], Fritz Kalwa[2,3] & Traugott Scheytt[2]

[1a)] GICON© Resources GmbH, Dresden, Germany
[1b)] GICON© Resources GmbH, Freiberg, Germany
[2)] TU Bergakademie Freiberg, Hydrogeology and Hydrochemistry, Freiberg, Germany
[3)] TU Dresden, Institute of Groundwater Management / INOWAS, Dresden, Germany
[4)] TU Bergakademie Freiberg, Technical Thermodynamics, Freiberg, Germany
[5)] Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V., Dresden, Germany
[6)] DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig, Germany
[7)] PLEJADES GmbH, Freiberg, Germany
[8)] GGB© Gesellschaft für Geomechanik und Baumesstechnik mbH, Rötha (OT Espenhain), Germany
[9)] TU Bergakademie Freiberg, Soil Mechanics and Foundation Engineering, Freiberg, Germany
[10)] University of Basel, Hydrogeology / Applied and Environmental Geology, Basel, Switzerland

Water utilities in Germany are facing risks and challenges imposed by the impending impact of climate change. The core challenges consist of ensuring the long-term availability of water resources – mainly groundwater and surface water – together with their integration into a resilient and secure supply strategy. Such strategies must consider not only the availability of raw water but also the functionality of energy and structural infrastructures. However, often the necessary requirements of resilience, which derive from adaptation to climate change, energy supply, and disruption prevention and mitigation, are not considered across sectors.

Against this backdrop, the central goal of the “SpeicherLand” project is to conduct a comprehensive description of the state and processes of key water cycle and supply components with regard to quantity, temporal availability, spatial availability, and vulnerability. The security-enhancing, central management entity, stored water, comes into focus due to its multiple buffering effects. However, the individual water storage facilities are not considered in isolation but as part of a storage concept encompassing the various compartments of the water cycle. In this process, risks and potentials for various usages and storage types are identified and compared. For example, supplementary thermal storage in technical storage facilities such as tanks - analogous to large-scale thermal storage systems - represents a promising potential that warrants evaluation. In order to examine various scenarios of risks and potential for a resilient and efficient water supply, a model-based coupling between the sectors of “natural hydrological system”, “energy infrastructure”, and “water supply infrastructure” is being developed. This coupling is ultimately intended to enable the examination of the influences of various spatially and temporally variable boundary conditions, even beyond the water sector itself.

In the SpeicherLand research project, this work is being carried out within the scope of Mittelsachsen, Germany. The particular challenge of this pilot area lies in its heterogeneity from a hydrological (lowland and mountainous regions), hydrogeological (bedrock and unconsolidated aquifers), and supply engineering perspective (long-distance water supply and local water extraction sites). To strengthen the resilience of the water supply in this district, various cross-sectoral catalogs of measures and recommendations for action are to be developed.

Preventing Resource Loss Through Digital Innovations

Susanne Roßkogler[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing and Waste Management, Leoben, Austria

Across the corporate sector, considerable efforts are being made to minimize resource losses throughout production processes. This principle applies not only to energy losses but also to losses of raw and auxiliary materials. Beyond the associated economic benefits, such measures also contribute to achieving environmental objectives. This is particularly important because industry accounts for approximately 20% of emissions in the European Union. Numerous strategy papers at both European and Austrian levels have called for an industrial transformation. For example, the Clean Industrial Deal conceptualizes increased energy efficiency as a pathway to enhanced competitiveness. Similarly, Austria's industrial strategy identifies the implementation of digital technologies as a key driver for improving the efficiency of industrial processes. In addition to cost savings and reduced emissions, greater resource efficiency provides clear added value by strengthening the resilience of manufacturing facilities.

This paper provides a comprehensive assessment of the potential environmental implications of a digital sustainability platform conceptualized within the ZERO3 project. The project developed a Sustainability Monitoring Platform (SMP) that analyzes value streams, identifies potentials and bottlenecks, and recommends basic technologies for improvement from a curated compendium. In this paper, the authors present one possible impact pathway in the energy sector.

The new reusable wine bottle in Austria

Christian Pladerer[1] & Philipp Haderer[1]
[1)] Austrian Institute of Ecology, Vienna, Austria

Climate protection and the careful use of resources are among the key challenges of the coming years. The circular economy – through reuse and multi-use systems – is seen as an important pillar of a sustainable economy and is increasingly gaining acceptance among consumers. In the wine industry, reusing 0.75-liter bottles offers significant potential to reduce waste and CO_2 emissions. Since 2023, an interdisciplinary project team of experts in wine, packaging, logistics, and sustainability has been developing a standardized reusable system with the goal of creating a fully integrated solution. Two durable 0.75-liter bottle types in the Rhine wine and Bordeaux styles have been designed for at least twelve reuse cycles. The system is complemented by a neutral, reusable six-bottle plastic crate as well as a pooling management system, which is being introduced for the first time in Austria and represents a key innovation. Each year, approximately 118 million single-use 0.75-liter glass bottles are placed on the Austrian market. Replacing even 20% of these bottles with reusable alternatives could prevent around 9.7 million kilograms of glass waste annually while also reducing CO_2 emissions, lowering the demand for virgin raw materials and energy-intensive glass production, and helping to mitigate littering.

Towards spectroscopic monitoring of antioxidant concentration in polypropylene granulates for circular plastic processing

Peter Bardenheuer[1], Alena Maria Spies[1] & Kathrin Greiff[1]
[1)] Chair of Anthropogenic Material Cycles (ANTS), RWTH Aachen University, Aachen, Germany

Reliable monitoring of antioxidant content is important for improving the quality and consistency of recycled polypropylene. Since conventional analytical methods are often time-consuming or destructive, this study evaluates short-wave infrared hyperspectral imaging as a rapid and non-destructive method for detecting antioxidant concentrations in polypropylene granulates.

Design recyclates containing 0.1–7.5 wt.% of the antioxidant blend Irganox® B225 were produced by compounding and analyzed in the 900–1730 nm spectral range. Measurements were performed on granulates transported on a black conveyor belt to approximate a process-related measurement scenario. The raw spectra showed strong overlap between polypropylene and antioxidant absorption features, making direct evaluation difficult. However, a relevant spectral region between 1500 and 1560 nm was identified, where concentration-dependent differences became visible. After local baseline correction and normalization, the spectra showed a clear correlation with antioxidant concentration.

The results demonstrate that SWIR hyperspectral imaging can detect variations in antioxidant content in polypropylene granulates. However, the weak spectral signatures and limited signal-to-noise ratio indicate that robust quantitative analysis under realistic recycling conditions remains challenging. Overall, the method shows potential for supporting quality control and targeted re-additivation in circular plastic processing.

Chemical Characterization of Mineral Aggregates Derived from Fluidized-Bed and Grate Incineration Bottom Ashes: A Statistical Evaluation of Industrial-Scale Production Trials

Simon Mika[1], Julia Mühl[1] & Jakob Lederer[1]
[1)] Christian Doppler Laboratory for Design and Assessment of an efficient, recycling-based Circular Economy, Institute of Chemical, Environmental and Bioscience Engineering, TU Wien, Vienna, Austria

Municipal solid waste (MSW) incineration bottom ash (IBA) represents a significant material stream of the Austrian MSW management sector, with approximately 500,000 tonnes generated annually. Besides valuable ferrous and non-ferrous metals, these residues contain substantial mineral fractions that can potentially be utilized as secondary construction materials after appropriate treatment. In Austria, the Austrian Federal Waste Management Plan 2023 established, for the first time, a regulatory framework for the production and use of industrially produced aggregates derived from IBA. Within the Christian Doppler Laboratory “Design and Assessment of an Efficient Recycling-Based Circular Economy”, industrial-scale processing trials were conducted using IBAs from six Austrian MSW incineration plants, including both grate and fluidized bed incinerators. Together, these facilities represent 34% of the annually generated IBA from grate incineration and 77% of IBA from fluidized bed incineration in Austria. The treatment process was carried out at the “Slagtory” facility operated by Brantner green solutions and comprised advanced metal recovery, washing of the mineral fraction, and subsequent ageing of the processed material. The resulting aggregate fraction of 2–8 mm was analyzed according to the environmental requirements defined in BAWP 2023. Eleven datasets were available for each aggregate type derived from grate and fluidized-bed incineration IBAs. Median values and 80th percentiles were calculated in accordance with the requirements specified by the BAWP 2023. Evaluated parameters included residual metal contents, total concentrations of heavy metals, total organic carbon, and eluate concentrations of heavy metals and salts.

The results demonstrate that the industrially produced aggregates 2-8 mm can comply with the environmental requirements for use as road base material as well as for incorporation into concrete. Aggregates produced from fluidized bed incineration IBA showed a substantial margin to all applicable limit values. Aggregates produced from grate incineration IBA exhibited elevated concentrations of chromium and cadmium compared to bed ash; however, all median values and 80th percentiles remained within the regulatory limits for concrete applications. Additional safety margins can be achieved by reducing the aggregate substitution rate in concrete from 20% to below 10%, thereby allowing the application of less restrictive threshold values.

The findings confirm that appropriate processing technologies enable the recovery of environmentally compliant mineral secondary raw materials from the mineral fraction of IBA. In addition to meeting the environmental criteria defined by BAWP 2023, the aggregates produced by Brantner green solutions are certified according to EN 12620 and EN 13242 and are marketed with CE marking. The associated quality control ensure a reproducible material quality for their customers. Compliance with environmental requirements together with documented quality consistency represents an important prerequisite for the further development of potential end-of-waste criteria for industrially produced aggregates from IBA. Conclusively, the study highlights the potential of advanced IBA processing to contribute to the transition towards a circular economy not only for metals but also for mineral materials.

Changes for IPPC Installations under the Revised Industrial Emissions Directive – Baseline Report and Monitoring

Roman Hummel[1], Katrin Amort[1], Evgenij Gerstner[1] & Arne M. Ragoßnig[1]
[1)] RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Vienna, Austria

The Industrial Emissions Directive (IED) requires operators of IPPC installations to prepare a baseline report where relevant hazardous substances are used, produced or released during the operation of the installation. The baseline report documents the initial condition of soil and groundwater and provides the reference for evaluating potential changes during operation and upon the definitive end of activities. Based on the baseline report, soil and groundwater must be monitored regularly, and the monitoring results must be documented.

The 2024 revision of the Industrial Emissions Directive extends the requirements for the operation of IPPC installations and further specifies the provisions for environmental monitoring. In addition to the mandatory implementation of an environmental management system, operators are required to prepare a transformation plan for the gradual decarbonisation of industrial activities with the objective of achieving climate neutrality by 2050. Furthermore, the minimum monitoring frequencies for soil and groundwater have been tightened. Groundwater must generally be monitored at least every four years and soil at least every nine years, unless BAT conclusions or permit conditions require shorter intervals or a risk-based assessment justifies a different monitoring frequency.

The preparation and periodic updating of a baseline report require a comprehensive inventory of substances, the identification of relevant hazardous substances, and the consideration of site-specific conditions. In practice, a systematic 'bottom-up' approach has proven effective for compiling the substance inventory, as it enables hazardous constituents contained in complex mixtures to be identified. The definition of the reference area, the development of a site-specific monitoring concept, and the selection of appropriate analytical parameters provide the basis for a reliable assessment of the baseline condition and for an effective long-term monitoring programme.

The enhanced requirements introduced by the 2024 revision of the Industrial Emissions Directive increase the importance of regularly updating the substance inventory and implementing risk-based monitoring concepts. As a result, baseline reports are a dynamic management tool that supports environmental protection and provides a robust basis for assessing the condition of an installation throughout its entire life cycle.

Classification of Products from Chemical Recycling of Plastics – Experience Report & Challenges from an Austrian Perspective

Arne M. Ragossnig[1], Markus Dielacher[2] & Werner Kruschitz[2]
[1)] RM eco consultants ZT GmbH, Vienna, Austria
[2)] Syncycle Operations GmbH, Vienna, Austria

This article addresses the waste law related challenges of the legally compliant placing of chemical recycling products on the market in the Austrian waste law context. In addition to the European legal framework, which defines requirements for the national implementation of end-of-waste and also provides the framework for the implementation of the circular economy, as well as the realities on the recycling plastics market, the challenges arising from the specifics of Austrian waste law and a concrete approach to solutions are presented.

The current situation of chemical recycling and its role in the transition to a circular economy is discussed. The analysis of the recycling market for plastics makes it clear that 1) chemical recycling has an important role to play in the implementation of already legally defined objectives and 2) a significant acceleration in the implementation of recycling infrastructure is required in order to achieve already defined targets in the area of minimum recyclate quotas in products.

Buyers from the petrochemical industry for pyrolysis oils expect pyrolysis oils with product status, which requires legal certainty through a determination of the end of waste for pyrolysis oils produced in chemical recycling plants as well as their REACH registration.

Currently, a reform in the area of end-of-waste in Austria is being worked out as part of a deregulation initiative. It would be desirable if this initiative could lower the barriers to the marketing of high-quality recyclates from chemical plastics recycling and thus strengthen the establishment of a plastics circular economy.

The representations in question are based on the findings of the legally compliant implementation of the production and marketing of pyrolysis oils of Syncycle Operations GmbH from a chemical plastics recycling production plant in Kühnsdorf in Austria.

Carbonation from by-products from the metal industry

Ann-Kathrin Hans[1,2], Andreas Neumann[1,3] & Ralf Wehrspohn[1,3]
[1)] ITEL – Institute of Technologies and Economics of Lithium, Halle (Saale), Germany
[2)] Institute of Chemistry, Inorganic Chemistry, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, Halle (Saale), Germany
[3)] Institute of Physics, Department Microstructure-based Material Design, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, Halle (Saale), Germany

In the steel and copper industries, significant quantities of by-products in the form of slag are produced in addition to the main products, most of which are currently sent to landfill or used for construction. However, it is worth noting that these slags contain reactive olivine type silicates (M_2SiO_4 (M = Mg, Fe, Ca), which have the potential to carbonate over long periods of time under natural conditions and form stable carbonates.

It is possible that the targeted use of slag carbonation could contribute to long-term CO_2 sequestration for example as a substitute in the building materials sector. The primary objective is the identification of the key parameters governing the carbonation of slags. Furthermore, a systematic investigation of the conditions, like pressure, temperature, reaction time, Liquid to solid ratio, and pH value, under which these processes can be optimized is considered essential. For steel slag with high proportions of Mg and Ca silicates, carbonation has already been well studied in the literature. In contrast, the carbonation of copper slags, which mainly contain iron-bearing silicates, has not yet been extensively researched. Nevertheless, initial indications of relevant reaction mechanisms and parameters can be derived from the behavior of natural Fe-silicate minerals. In light of this, the present doctoral thesis will commence the experimental phase, during which systematic parameter studies on the carbonation of copper slags will be conducted. It seems that the key influencing factors include the chemical and mineralogical composition of the slag. At the process level, the influence of pressure, temperature, reaction time, and pH value are considered in particular. The proceeding results indicate that temperature and pressure have a significant effect on carbonation of Copper-Slag and that the degree of carbonation analyzed by quantitative XRD of iron silicate is nearly quantitative.

Improving SO_2 Removal in Existing Flue Gas Cleaning Systems Using Hygroscopic Additives and Pozzolans from Residual Materials

Joel da Silva Félix[1], Daniel Wohter[1] & Peter Quicker[1]
[1)] RWTH Aachen University, Thermoprocesses and Emission Control in Waste Management and Recycling Teaching and Research Unit (TEER), Aachen, Germany

Stricter emission limits and increasing economic pressure require efficient and adaptable strategies for flue gas cleaning in waste-to-energy plants. This work investigates the targeted additive enhancement of lime-based sorbents to improve SO_2 removal in existing flue gas cleaning systems. Selected hygroscopic additives and pozzolanic materials derived from residues were characterized and evaluated regarding their influence on SO_2 removal. The investigated additives included calcium chloride ($CaCl_2$), sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3), while pozzolanic materials were produced from paper sludge ash and lignite fly ash. To evaluate their SO_2 removal performance, a test rig capable of generating defined synthetic flue gas atmospheres was constructed and used to record breakthrough curves under conditions representative of industrial flue gas cleaning applications. The results show that additive enhancement of hydrated lime can improve SO_2 removal efficiency and that suitable residual materials may serve, after appropriate processing, as pozzolanic additives or standalone technical sorbents. These findings provide promising approaches for the optimization of existing flue gas cleaning systems and the further development of lime-based sorbents for industrial applications.

The circularity center of the future

Verena Schmid[1], Josef Adam[1], Roland Pomberger[1], Roland Wernik[2], Thomas Maierhofer[2] & Stefan Schnöll[2]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] Salzburg Housing Association, Salzburg, Austria

Waste collection centers, resource parks, recycling yards, waste collection points or similar facilities serve as an interface between citizens and the waste management sector. Circularity centers are a modern, state-of-the-art progression of waste collection centers which aim to increase the collection rate, recycling rate and participation of the citizens in waste collection. In Austria, there is no strategy for these facilities in place which is valid in all nine federal states of our country. Therefore, there are major differences between the federal states, on the one hand with some great examples like the resource parks in Styria and on the other hand a partially outdated recycling yard structure for example in wide areas of Salzburg. To offer a solution for this issue, a concept of local circularity centers on the levels of conceptual design, construction, organization and communication was developed based on the current state of the art in Salzburg and beyond as well as on a workshop for collecting new ideas with members of universities, housing associations and municipalities. Based on these results, a catalogue of applicable suggestions for circularity centers was developed and will be offered to interested municipalities. These suggestions can be implemented on and are useful for different scales (one community, multiple communities, a city or association). In the communication field elements from psychology and sociology are planned to be applied, especially the concept of “Nudging” introduced by Richard Thaler. These measures require small expenses and can lead to step-by-step improvements and increased attention towards the topic of waste collection.

The term “Repurpose” in a textile circular economy

Verena Schmid[1], Silvia Jölli[2] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] Fensterplatz association, work project heidenspass, Graz, Austria

The textile industry is in need of a transformation from a linear to a circular economy. Within the framework of the R-strategies an organization of potential approaches is possible. For extending the product lifetimes, the eighth strategy “Repurpose” offers a variety of solutions. All share a change in an item’s function through the repurposing process, though the procedures and definitions differ. On one hand non-textile materials can be used for textile applications, on the other hand textiles which are to be disposed of can be applied for an alternative purpose. An example for the first case is a Polyester t-shirt made from PET bottles. For the second case enhancement of pavement soils with textile scraps can be mentioned. It is also feasible to use fabrics from manufacturing side streams. Repurpose in the consumption-stage utilizes the complete disposable product or parts of it (e.g. clothes made from military tents) while in the post-consumption-stage recycled fabrics or fibers are repurposed (e.g. sound insulation with recycled fibers). Creative Repurposing in the design sector can be carried out through a design process, as a service or business model, through consumers as well as with attention to a cultural context. These practices often fall under the term “Upcycling” which may also encompass remanufacturing or repair. Considering these diverse classifications and applications of the term “Repurpose” communication and research in this field are hindered, underscoring the need for a common understanding and definition of the practice.

Automated Disassembly Instructions for EOL Electric Vehicles: A Hybrid CV and VLM Concept

Nils Baumann[1] & Sabine Flamme[1]
[1)] FH Münster, IWARU, Münster, Germany

The continuous surge in the adoption of electric vehicles (EVs) in the EU necessitates robust end-of-life (EOL) management and a closed-loop circular economy for critical materials. However, dismantling EVs remains a predominantly manual, unstandardized, and time-consuming process, making it economically challenging in high-wage countries. Existing theoretical Disassembly Sequence Planning (DSP) models often rely on perfect digital component representations, which fail to reflect the physical reality of EOL vehicles affected by dirt, corrosion, and deformation. Furthermore, workers frequently lack detailed instructions, relying instead on implicit experience.

To bridge this gap, this paper introduces a conceptual hybrid assistance system designed to automatically generate context-sensitive, step-by-step disassembly instructions for EOL components. The foundational methodology relies on comprehensive real-world dismantling data acquired from two representative test vehicles: a fully electric Renault Kangoo Z.E. and a modern Chery T26 plug-in hybrid. During the dismantling process, a synchronized multi-camera setup captures extensive visual data, which is later used to build a continuous, experience-based disassembly database.

The proposed technical architecture employs a multi-stage pipeline to assist human operators. First, a real-time object detection model based on the YOLO architecture is used to analyze RGB images captured directly from the worker's perspective to identify, classify, and locate fasteners of components from EOL EVs. Second, these visual findings are enriched with historical dismantling knowledge retrieved from the database via Retrieval-Augmented Generation (RAG). A Vision-Language Model then processes this multimodal input, combining live visual data, detected fastener parameters, and RAG-supplied context, to reduce hallucination risks and generate step-by-step disassembly instructions. This approach aims to enhance the dismantling depth and material recovery rates, with future efforts focusing on deploying these instructions directly into the operators' field of view via augmented reality systems.

Pilot-Scale Pyrolysis as a Methodological Tool for Evaluating Heterogeneous Post-Consumer Waste Streams

Angelika Luckeneder[1] & Daniela Meitner[1]
[1)] Next Generation Elements GmbH, R&D, Feldkirchen, Austria

Assessing the effectiveness of upgrading and sorting processes for heterogeneous post-consumer plastic waste remains a major challenge in recycling due to the high variability of material composition and the limited representativeness of conventional laboratory analyses. Established analytical methods, such as thermogravimetric analysis (TGA) and gas chromatography, typically rely on sample sizes below one gram and therefore provide only limited insight into the behaviour of complex waste streams at process-relevant scales.

This study presents a pilot-scale batch pyrolysis unit as an analytical tool for the characterization of material streams and the evaluation of upgrading steps along a recycling process chain. Representative samples of approximately 3–5 kg were thermochemically converted under an inert nitrogen atmosphere at temperatures between 430 and 460 °C. The resulting oil, gas, and solid residue fractions were quantified and characterized, enabling the establishment of mass balances and the assessment of feedstock quality.

By comparing samples collected before and after individual upgrading stages, changes in product distribution and product quality can be directly linked to process performance. The approach allows the quantitative evaluation of contaminant removal efficiency, material purification, and the overall impact of upgrading operations on feedstock suitability for pyrolysis. Results indicate a clear correlation between improved material quality, increased oil yields, and reduced contamination levels.

The proposed methodology bridges the gap between conventional laboratory analytics and process-oriented feedstock evaluation. It provides a practical and data-driven approach for assessing heterogeneous post-consumer waste streams and supports the optimization of recycling and feedstock recycling processes through improved material characterization and process monitoring.

Quantification and characterization of microplastic pollution in agricultural soils

Clemens Lang[1]
[1)] wpa Beratende Ingenieuere GmbH, Vienna, Austira

Plastics are essential for a wide range of human products and therefore cannot be missed in our daily lives, for example as, components of packaging materials, textiles, car tires, as well as electronic and electrical devices. Their widespread use indirectly leads to emissions into the environment, where plastics continue to accumulate and fragment due to natural and anthropogenic influences to an extent rendering their removal practically impossible. Agriculture also contributes to microplastic emissions into soils, for example through the use of fertilizers. This master thesis investigated the extent to which different fertilization practices affect microplastic contamination (plastic particles ranging from 20 µm to 5 mm in size) in soils. For this purpose, 13 reference fields were selected which had been fertilized differently (sewage sludge, farmyard manure and mineral fertilizer) and both the coarse and fine fractions of the topsoil (depth horizon 0–30 cm) were examined. On the one hand, the coarse fraction (0.5 to 5 mm) was analyzed for its plastic content and composition using visual analytics and ATR-FTIR spectroscopy, while the fine fraction (20 to 500 µm) was examined using FPA-FTIR microscopy. For each analysis, 50 g or 80 g of sample material were prepared and examined, and the results were extrapolated to one kilogram of dry matter to ensure comparability. The evaluation clearly showed that fields which were regularly treated with sewage sludge had the highest levels of contamination, with up to 1,400,000 particles per kilogram of dry matter (particles/kg DM). In total an average of 680,000 particles/kg DM was detected, followed by organically fertilized plots, where up to 185,000 particles/kg DM and 50,000 particles/kg DM in average were detected. The lowest number of polymers was detected on plots treated with mineral fertilizers, with maximum values of up to 59,000 particles/kg DM and an average of 20,000 particles/kg DM.

GreenHost – Sustainable accommodation through gamification

Hannah Hofbauer[1] & Maximilian Wagner[1]
[1)] Austrian Institute of Ecology, Vienna, Austria

The hospitality sector represents a significant contributor to resource consumption and waste generation, making it both a challenge and an important partner in advancing circular economy principles. Hotels and accommodation businesses handle continuous flows of materials: food, packaging, cleaning supplies, and furnishings. Transitioning from linear to circular models is demanding yet presents real opportunities for resource efficiency and cost reduction. GreenHost is an Erasmus+ project running from December 2024 to May 2027, bringing together partners from Austria, Germany, Poland, Bulgaria, and Italy to support small and medium-sized lodging industry businesses in their sustainability transformation. The project is grounded in a literature review and a survey of 81 industry stakeholders across the five partner countries. Findings reveal that food waste, particularly from buffets, poses a central challenge, shaped by operational processes, guest behaviour, and cultural expectations. Digital tools, including AI-based waste tracking systems, alongside behavioural nudges such as smaller plate sizes, offer promising avenues for reduction. Motivations for adopting sustainable practices include both environmental commitment and cost savings, while the most frequently cited barriers are limited financial resources (67%), lack of time, and insufficient knowledge. To bridge the gap between awareness and action, GreenHost is developing a good-practice collection, a practical toolkit, and a free gamified learning platform, set for release in early 2027. Its purpose is to guide both employees and managers through sustainable process changes, one step at a time. One of the overarching goals is to shift the lodging industry from passive resource consumers and waste producers into active partners within a circular economy.

Clean Dregs – Strategies for Reduction, Treatment and Utilization of Green Liquor Dregs

Andreas Klöckl[1,2], Markus Ellersdorfer[2], Johannes Leitner[3], Klaus Eibinger[4], Michael Strach[5] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]

[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

[2)] Technical University of Leoben, Chair of Process Technology and Industrial Environmental Protection, Leoben, Austria

[3)] Mondi AG, R&D MondiLabs, Hausmening, Austria

[4)] Zellstoff Pöls AG, Pöls, Austria

[5)] Smurfit Westrock Nettingsdorf AG & Co KG, Ansfelden, Austria

Green liquor dregs (GLD) are a residue from kraft pulping that is still predominantly landfilled. Austrian pulp producers aim to implement an operational solution by 2030 that eliminates landfilling of GLD. The Clean Dregs project addresses this challenge by reducing GLD volumes through improved dewatering, recovering valuable process chemicals, and delivering a residue suitable for material utilization.

To build a robust technical basis, GLD from several Austrian mills were sampled over the course of a full year and comprehensively characterized with respect to their physical, chemical, and mineralogical properties. The resulting dataset is complemented by laboratory-scale filtration and sedimentation experiments as well as a systematic survey and evaluation of technologies for sludge dewatering, recovery of Na and S, separation of interfering constituents, and identification of potential valorization routes. Based on these investigations, promising approaches to quality improvement are being tested in laboratory trials, accompanied by targeted analytics. All resulting material streams are assessed for the presence of problematic and hazardous substances to ensure environmental and regulatory compatibility.

Initial results reveal pronounced inter- and intra-mill variability in the physical, chemical, and mineralogical properties of GLD. Despite this variability, all investigated materials were found to be Ca-dominated, with Mg-bearing calcite as the predominant mineral phase. Furthermore, the use of precoat filtration with lime mud and differences in internal process loops were identified as key factors influencing GLD composition. These findings indicate the need for mill-specific strategies to improve GLD quality, recover process chemicals, and enable future material utilization.

From Recycled Material to Infrastructure Concrete: Low-Carbon Recycled Concrete for Restrained Tunnel Linings

Joachim Juhart[1], Amr HM Hassan[1], Michael Autischer[1] & Dirk Schlicke[2]
[1)] Graz University of Technology, Institute of Technology and Testing of Construction Materials, Austria
[2)] Graz University of Technology, Institute for Structural Concrete, Austria

Restraint stresses induced by hindered thermal and shrinkage-induced deformations are a major cause of cracking in massive reinforced concrete structures used in tunnel construction. In parallel, the decarbonization of the construction sector demands a significant reduction in both CO_2 emissions and the consumption of primary raw materials associated with concrete and steel production.

This paper presents the development of a low-carbon recycled concrete specifically designed for watertight restrained tunnel linings and compares its performance with that of a standard infrastructure concrete according to the Austrian guideline for inner tunnel linings ("ÖBV-Richtlinie Innenschalenbeton"). The proposed concrete combines a clinker-reduced binder system with recycled concrete aggregates and an optimized particle grading concept. Particular attention was paid to the influence of the material composition on hydration heat, shrinkage behavior, compressive and tensile strength, elastic modulus, and global warming potential (GWP).

From a structural perspective, the developed concrete exhibited a lower modulus of elasticity and reduced hydration heat generation compared to the reference mixture. Both characteristics are beneficial for restrained concrete members, as they reduce restraint stresses arising from prevented thermal and shrinkage deformations and therefore lower the risk of early-age cracking. Ongoing numerical and experimental investigations within the research project *GreenInfrastructures* indicate that these improved material properties may allow a reduction of the reinforcement required for crack control, resulting in additional savings of embodied carbon.

The results demonstrate that all functional requirements for tunnel lining concrete, including mechanical performance, water tightness and workability, can be achieved despite the incorporation of significant quantities of recycled aggregates (i.e. 50% of the aggregate fractions 4/32 mm). At the same time, the proposed approach is expected to reduce the GWP by approximately 25% for the concrete and by 50% for the reinforcement required for crack width control compared with a conventionally designed reference concrete. The use of recycled aggregates also contributed to a significant reduction in primary raw material consumption and demonstrated the feasibility of closed material loops within large infrastructure projects.

The findings highlight the considerable potential of low-carbon recycled concrete for future tunnel and infrastructure applications. However, broader implementation will require a transition from prescriptive mixture-based specifications toward performance-based design approaches, as well as corresponding adaptations of existing standards and procurement guidelines. In particular, current Austrian regulations for tunnel linings and watertight concrete structures should be revised to enable the use of high-quality recycled aggregates in structural infrastructure concrete.

Development of the first stage of recycling for PV modules and a study of options for the further processing of the resulting raw materials

Felix Kiem[1], Matthias Zitterbart[2], Thomas Senfter[1] & Martin Pillei[1]
[1)] MCI Internationale Hochschule, Innsbruck, Austria
[2)] DAKA Entsorgungsunternehmen GmbH & Co. KG., Schwaz, Austria

The expected sharp rise in the volume of end-of-life (EoL) photovoltaic (PV) modules presents waste management companies with an opportunity to develop innovative solutions that offer not only environmental but also economic benefits. The increase in the volume of so-called EoL PV modules generated in Austria is projected to rise from a few hundred tonnes at present to a cumulative 70 to 184 kt by 2040. By this point, the break-even point of 20 kt per year is also expected to be exceeded. The potential profit from recovered PV materials in the EU by 2050 is estimated at over 20 billion US dollars. The efficient recovery of these materials is also of central importance due to the finite availability of critical raw materials such as silver and rare earth metals.

This article examines a mechanical PV module disassembly plant and thus the first step in the process chain for the recovery of EoL PV modules. The plant was optimised and fine-tuned by analysing the mass flows following the separation of the various fractions. The immediate subsequent processing and separation of the resulting fractions were also investigated. As mechanical processes can prepare the proportion of modules required by the EU for recovery and recycling (Directive 2012/19/EU), but do not sufficiently separate critical raw materials, recommendations for further raw material recovery processes are presented and discussed. A comprehensive technology review provides an overview of current hydrometallurgical, physical and thermal processing methods in the recycling of EoL modules. A strategy and yield forecast for the raw materials trade took into account local conditions such as the availability of specialised recycling facilities, the applicable legal framework and logistics structures. In addition, an analysis was conducted on how the regional inflows of end-of-life PV modules should be optimally managed and coordinated in order to integrate them into the recycling concept in the long term. This is intended to reduce capital, transport and operating costs, thereby enabling more cost-effective recycling and a more efficient take-back system. This involves, for example, a systematic approach to a separate collection scheme.

The findings of this study enable the efficient management of future waste streams of EoL PV modules in accordance with the principles of the circular economy and contribute to a more sustainable energy sector. However, the raw materials recovered using current processes and under current economic conditions do not always meet the purity levels required for reuse within the industry. There are also losses due to incomplete recovery. Therefore, to optimise the recyclability of PV modules and make it more cost-effective, standardisation of cell structure and efficiency, as well as module design, would be crucial.

Robust AI-Based Real-Time Sorting of Shredder Scrap to Reduce the Intrinsic Copper Content

Gerald Koinig[1], Walter Martinelli[2], Yves Radmann[2] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] SCHOLZ Austria GmbH, Laxenburg, Austria

The European steel industry is transforming from the blast furnace route to the electric furnace route (EAF), which will reduce energy consumption and CO_2 emissions, but will focus more on tramp elements such as copper. Copper deteriorates mechanical properties and is subject to limit values, but cannot be removed in the EAF via gas phase or slag. In the present article, it was investigated whether visually recognizable characteristics are related to the intrinsic (alloyed) copper content and whether administration by rejecting special shredder scrap particles is a feasible way. A 700 kg sample (iron post-shredder fraction) was examined, which was manually presorted into six optically distinguishable categories and analyzed with handheld XRF. Over 4,700 particles were measured manually using XRF. Castings showed the highest intrinsic copper content (weighted median 0.24 wt.-%), while sheet metal had the lowest values (approx. 0.05 wt.-%). A GoogLeNet-based CNN (Transfer Learning) visually classified castings vs. non-castings robustly (overall accuracy >94%, F1: >80% for casting, 97% for non-casting) despite class imbalance. F1-oriented loss functions, weighted data loaders and weighted cross-entropy were effective. The results prove a correlation between appearance and intrinsic copper content, which seems to make a targeted removal of copper-rich parts possible despite limitations.

greenPLAST-food Green Plastic Recycling Factory for Food Contact Materials

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

Conventional object-detection metrics such as mean average precision, precision, and recall provide valuable information on model performance but do not directly reflect the operational requirements of sensor-based waste sorting. In this study, Recovery at a predefined Purity (Recovery@Purity) is investigated as an application-oriented evaluation and checkpoint-selection metric for YOLO-based sorting of lightweight polypropylene packaging. A dataset comprising 11,548 images and 18,490 manually annotated instances of food-contact PP packaging was recorded from 16 Big Bags. Multiple YOLO model variants were trained on incrementally increasing datasets, ranging from images of a single Big Bag to images from all 16 Big Bags, and evaluated on a common independent test set. While mAP@50–95, precision, and recall indicated comparatively high model performance even for small training datasets, the Recovery@95% Purity analysis revealed substantial limitations at the intended sorting operating point. Models trained on small datasets achieved recoveries below 10% while satisfying the required purity. Recovery increased with additional training data, with initial saturation effects occurring at approximately nine Big Bags. Even the best-performing models achieved only about 60% recovery at the specified purity. To assess the transferability of the object-based offline evaluation to real sorting conditions, physical sorting experiments were conducted using YOLO11-L. Despite differences between object-based prediction and mass-based evaluation, as well as additional errors caused by real particle ejection, the predicted and measured results showed reasonable agreement. The mean absolute error was 4.1 percentage points for purity and 9.2 percentage points for recovery. The results demonstrate that Recovery@Purity complements conventional detection metrics by translating model performance into an operationally interpretable sorting criterion. It can support application-specific checkpoint selection, communication between plant operators and model developers, and preliminary technical and economic assessments before industrial deployment.

Investigation of Mechanical Recycling as an EoL-Strategy for Thermoset Composite Materials

Romy Schwarz[1] & Jörg Fischer[1,2]
[1)] Johannes Kepler University, Institute of Polymeric Materials and Testing, Linz, Austria
[2)] Johannes Kepler University, LIT Factory, Linz, Austria

The increasing use of fiber-reinforced polymer composites in industries such as aerospace, automotive, and construction leads to growing quantities of end-of-life composite waste. In particular, thermoset-based composites pose a significant recycling challenge, as their crosslinked structure prevents remelting and reprocessing through conventional thermoplastic recycling routes. Mechanical recycling represents a promising approach for recovering these materials by converting them into particulate fillers for thermoplastic compounds.

This study investigates the feasibility of utilizing mechanically recycled thermoset composite waste as fillers for thermoplastics. In contrast to highly optimized recycling approaches, this study was intentionally designed as an initial assessment of the potential of this recycling route. The objective was not to maximize material performance but to evaluate whether technically viable compounds can be produced using a simple, industrially relevant, and cost-efficient recycling route. Therefore, the composite waste was processed without additional washing, sorting, classification, fiber separation, or compatibilization steps. The resulting compounds provide a baseline for future process optimization.

Two industrial composite waste streams were investigated: glass fiber-reinforced phenolic resin composites (GF Phenol) and carbon fiber-reinforced epoxy composites (CF Epoxy). Following mechanical size reduction, the recyclates were compounded with polypropylene, polyethylene, and polycarbonate. GF Phenol and CF Epoxy exhibited different particle morphologies and size distributions due to differences in both material composition and shredding processes. Both recyclates contained reinforcing fibers and residual thermoset matrix, resulting in hybrid filler systems rather than conventional short-fiber reinforcements. The incorporation of recyclates into the thermoplastic matrices increased melt viscosity, limiting the maximum filler contents to 30 wt.% for GF Phenol and 20 wt.% for CF Epoxy.

Mechanical testing revealed characteristic behavior of filled thermoplastics. Stiffness increased significantly for all investigated systems, while impact strength and yield strain decreased. Tensile strength was only slightly affected. The strong reduction in Charpy notched impact strength compared to the virgin thermoplastics suggests that the recyclate particles act as stress concentrators and facilitate crack initiation. Consistent with the limited effect on tensile strength, these results indicate a relatively weak interfacial adhesion between the thermoplastic matrix and the recycled composite fillers.

Although no compatibilizers or surface treatments were employed, several compounds achieved mechanical property levels comparable to thermoplastics filled with conventional mineral fillers such as talc or calcium carbonate. These findings demonstrate that mechanically recycled thermoset composites can serve as technically viable filler materials for thermoplastic compounds and highlight the potential of simple mechanical recycling routes for the valorization of currently difficult-to-recycle composite waste streams.

Evaluation of Waste Separation on Cemeteries and Derivation of Improvement Measures

Sarah Maier[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

The correct separate collection of municipal waste is becoming increasingly important in the wake of European guidelines on resource conservation. These guidelines also cover cemetery waste. However, to date there have been very few studies or publications on the composition of waste streams in cemeteries. Data on the proportion of batteries and waste electrical equipment in waste is particularly relevant, as these pose a risk to humans and the environment, especially in residual waste.

The aim of this work was to collect initial data on the quantity, collection, and composition of cemetery waste and to develop improvement measures for more efficient separate collection. To this end, two sorting analyses were carried out at three cemeteries (Großklein, Wildon and Leibnitz) in the Leibnitz district (Austria), which represent different settlement structures and differ in terms of the collection fractions available on site. The waste examined was manually sorted into predefined categories. After the initial sorting, improvement measures were implemented in the form of stickers and signs containing information on correct separate collection. A second sorting analysis was then carried out to evaluate the effectiveness of these measures.

The results show that there is room for improvement, especially in the residual waste and organic waste collection fractions. During both sorting processes, waste electrical equipment and hazardous materials were found in the residual waste at all cemeteries. In addition, batteries were found in the residual waste at the Leibnitz and Großklein cemeteries. The data obtained highlights the need for targeted measures to improve separate collection at cemeteries.

Performance Optimization of PP Recyclates through Coordinated Sorting Depth and Modification

Martin Berschl[1], Moritz Mager[1] & Jörg Fischer[1]
[1)] Johannes Kepler University Linz, Institute of Polymeric Materials and Testing & LIT Factory, Linz, Austria

Meeting the strict requirements of high-value packaging applications remains a major challenge for post-consumer polypropylene (PP) recyclates due to their performance gap compared to virgin grades. This technical limitation is mainly driven by the severe material heterogeneity inherent to post-consumer polypropylene waste streams. To overcome these deficiencies and upgrade the performance profile of recycled polypropylene (rPP), advances across the existing process chain are required. In this context, combining sorting depth (the extent to which mixed waste is separated into pure, specific fractions) with modification represents a promising pathway. This study investigates the interaction between sorting depth and targeted compounding-based modification to evaluate the extent to which the property profiles of rigid polypropylene recyclates can be tailored to approach an industrial virgin block-copolymer benchmark requiring high impact strength at adequate stiffness. Two post-consumer recyclates of differing sorting depth were evaluated: a conventional light-colored PP baseline fraction (rPP-base) processed without additional sorting and a rigid white PP fraction of higher sorting depth with eliminated flexibles (rPP-sort). To achieve precise property adjustments, systematic modification strategies based on blending with virgin materials and three impact modifiers at different concentrations were implemented using linear mixing rules and Arrhenius calculations to derive benchmark-oriented formulations at a mandatory constraint of at least 50 wt% recyclate content with a maximum modifier content of 5 wt%. The results demonstrate that advanced sorting and targeted impact modification yield a synergistic effect on the mechanical property profiles of the resulting blends. Due to non-PP contamination and compositional heterogeneity, the rPP-base material exhibits severe deficits, characterized by a relatively lower tensile modulus (1260 MPa), which ultimately caused the resulting compounds to fall short of the required benchmark values. In contrast, the superior initial tensile modulus of the advanced sorted rPP-sort recyclate (1520 MPa) represents a crucial advantage relative to the virgin benchmark requirement (1320 MPa). It acts as a vital structural buffer for stiffness-toughness trade-offs associated with impact modification, allowing the modulus to drop without falling below the targeted threshold and thereby expanding the technologically feasible recyclate content up to 60 wt%. The findings ultimately confirm that a modifier loading of 4 to 5 wt% represents a critical limit due to both economic feasibility and a severe loss in stiffness, proving that impact modification cannot act as an unlimited corrective measure for post-consumer plastics. Overall, the study underlines that performance-oriented PP recycling can be achieved through a systemic balance between heterogeneity reduction by additional sorting and targeted modification to satisfy technical property requirements within economic constraints.

These Boots Are Made for Sorting: Towards Automated Sorting for Reuse for Post-Consumer Shoes

Shirin Askari[1], Kseniia Grai[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

This study presents a first systematic, multi-attribute physical condition assessment of 951 post-consumer footwear pairs to generate ground-truth labels for AI-enabled sorting for reuse. Pairs were collected at designated points in Styria, Vienna, and Lower Austria and assessed by two independent assessors using a standardized protocol covering identification, measurements, materials, and zone-based condition grades for upper, sole, and insole, with odour recorded separately; reusability was classified as Reusable, Repairable-minor, Repairable-uncertain, or Not Reusable by consensus. Inter-assessor agreement reached 91%, indicating high reproducibility of the visual protocol. Of the assessed pairs, 18.4% were directly reusable, 11.9% repairable-minor, 24.8% repairable-uncertain, and 44.9% not reusable; 62 unpaired shoes were reclassified as not reusable. Odour was detected in 67.9% of pairs and, while considered treatable and excluded from reusability criteria, poses a significant operational challenge for automated systems reliant on visual data alone. Findings align with the urgent need for efficient, standardized sorting ahead of forthcoming Extended Producer Responsibility schemes in the EU and provide actionable design inputs: integrate odour handling, route repairable-uncertain cases for expert review, and leverage shoe-type-specific thresholds to improve classification performance.

Sole Searching - Material-Driven Sorting for Footwear Circularity

Kseniia Grai[1], Shirin Askari[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

Post-consumer footwear has become a rapidly growing waste stream, with an estimated 23.9 billion pairs produced and roughly 22.5–23 billion pairs discarded in 2025, underscoring both scale and the urgent need for dedicated end-of-life solutions. Unlike mono-material packaging, shoes combine foams, rubbers, textiles, leather-like components, coatings, metals, and robust adhesive systems, creating processing-incompatible mixtures that challenge traditional recycling approaches. This study presents the manual sorting and visual disassembly phase of a material-driven sorting framework, designed to document material variety, bonded interfaces, and contamination as a foundation for subsequent NIR- and RGB-based AI classification and routing to suitable recycling pathways. A dataset of 951 pairs was characterized, revealing two sharply contrasting recyclability cases: mono-material clogs composed of a single EVA/Croslite foam fraction versus complex sneakers integrating polyurethane outsoles, synthetic leather uppers, metal elements, elastic laces, and hook-and-loop closures. The complex pairs produce fragmented, overlapping surface signals where soil, metals, and multi-layer polymer assemblies can obscure the recyclability-relevant bulk composition, limiting the reliability of optical classification that relies solely on exterior features. Findings reinforce that adhesives, finishes, and polymer incompatibilities are primary barriers to high-purity streams, and that closed-loop ambitions hinge on minimizing cross-contamination at source sorting. Within the SCARPA doctoral network, the ultimate objective is a systematic, automated, multi-step sorting methodology that elevates purity for high-quality mechanical and chemical recycling by prioritizing material-based over shoe-type classification. These results delineate the operational limits of optical sensors on heterogeneous, soiled footwear and provide concrete requirements for sensor fusion and AI model training in real-world sorting environments.

The Behavior of Paper Composites under Pressure Loads and their Failure Modes

Sandra Schmidt[1] & Andreas Büter[1]
[1)] University of Applied Sciences, Fachbereich für Maschinenbau und Kunststofftechnik, Darmstadt, Germany

A current research project at Darmstadt University of Applied Sciences is investigating whether paper laminate made from recycled waste paper is a sustainable lightweight material. Paper fibers for paper production can be obtained from annual plants, thinning wood and sawmill waste as well as from recycled waste paper. Unlike paper, which can be recycled up to seven times and has a recycling rate of up to 100%, recycled wood is rarely used in the production of wood-based fiberboards (such as chipboard or MDF). In addition, the bonding of wood fibers with resin makes material recycling more difficult. In direct comparison with wood-based fiberboards, these advantages of paper are offset by additional energy and water requirements for production.

The thick-walled paper laminate examined here consists of up to 16 bonded paper layers and exhibits slight anisotropy in relation to the direction of manufacture due to fiber reinforcement. Construction materials are generally required to be predictable. Under compressive loads, this material exhibits complex failure in the form of symmetrical or asymmetrical layer buckling due to its layered structure. This instability results in a local reduction in stiffness. This is offset by an increase in stiffness with increasing specimen length.

In order to understand the failure behavior, compression tests in the form of end-loading tests with defined strain rates were carried out on thick-walled specimens of varying lengths stored in a climate-controlled environment. At the same time, attempts were made to simulate the material behavior using FEM and to describe it using a simple spring approach. This paper presents the latest test results and compares and discusses the fracture patterns. The aim is to generate an initial material model for compressive loads that considers the special characteristics of paper composites in failure.

State-of-the-Art Assessment of Mobile Processing Machines for Construction and Demolition Waste in Austria: AI-Based Analysis of EDM Data

Dominik Blasenbauer[1], Mariella Laure[1], Michael Scsepka[2] & Tobias Walk[2]
[1)] Technische Universität Wien (TU Wien), Institute of Chemical, Environmental and Bioscience Engineering, Vienna, Austria
[2)] Fraunhofer Austria Research GmbH, Vienna, Austria

This paper presents initial results from a state-of-the-art assessment of mobile processing of mineral construction and demolition waste in Austria. Construction and demolition waste represents the second-largest waste stream in Austria, with a significant share treated by mobile and stationary processing plants. Mobile processing machines, such as crushers and screens mounted on wheeled or tracked frames, play a crucial role due to their flexibility and technical similarity to stationary plants.

Despite their relevance, systematic information on machine types, capacities, energy consumption, and market structures has been lacking. To address this, data from the Austrian Electronic Data Management system (EDM) were analyzed. However, these data are largely unstructured, inconsistently recorded, and prone to errors. An initial automated evaluation using a large language model (LLM) demonstrated promising results in identifying manufacturers and machine models but also revealed limitations, including long processing times and unreliable technical parameters due to model hallucinations.

To overcome these challenges, a Retrieval-Augmented Generation (RAG) approach is currently being developed that combines LLMs with verified external data sources. Preliminary results indicate that manufacturers and machine types can be identified in over 90% of cases, enabling first insights into Austria's market structure. The study concludes that reliable outcomes require close integration between curated data and artificial intelligence, laying the foundation for automated, recurring analyses.

AVAW_CV-Waste: An Offline Computer Vision Annotation Tool for Waste Management Research

Bojan Lorber[1], Gerald Koinig[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

The creation of high-quality annotated image datasets remains a major bottleneck in the development of computer vision systems for waste management and recycling applications. AVAW_CV-Waste is a free and open-source offline desktop application designed to create, review, and correct bounding-box annotations for object detection models. The software provides an accessible graphical user interface that enables users to draw, move, resize, copy, and manage bounding boxes and exports annotations in the YOLO-compatible TXT format.

Existing object detection models can be integrated to support semi-automatic annotation. The application can generate predictions for complete images or suggest a bounding box after the user selects an individual object. These model-assisted workflows reduce the manual effort required for dataset preparation while retaining full control over the quality of the resulting annotations.
Because AVAW_CV-Waste operates entirely offline, sensitive image, model, and annotation data remain on the local system. The software is therefore particularly suitable for industrial research collaborations, field applications, and facilities with limited internet access. It also supports project-specific annotation classes and custom models trained on highly specialised waste streams. AVAW_CV-Waste has been tested and continuously improved in several research projects involving textiles, lightweight packaging waste, and post-shredder scrap. The software provides a practical and adaptable solution for accelerating dataset creation and supports the development of robust object detection models for automated waste classification, contaminant detection, and sensor-based sorting.

To store, or not to store? A qualitative recyclability assessment

Romana Kopecká[1], Marlies Hrad[1] & Marion Huber-Humer[1]
1) BOKU University, Department of Water, Atmosphere and Environment, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

Society needs to strive for circularity to ensure that natural resources are used efficiently and that the maximum feasible share of extracted materials remains in material loops as long as practicable. Despite numerous European Union initiatives, circularity rates remain low, indicating a linear economy. This study extends the authors' previous work on Temporary Material Hubs (TMHs) by addressing practical questions, i.e., how to assess the suitability of materials and waste streams for TMHs. The research begins with a systematic literature review and uses the European Commission's criticality methodology as well as publicly available data about waste streams and resources, e.g., phosphate rock and phosphorus. The study is ongoing, therefore, complete results and the finalized framework for recyclability assessment will be presented at a later stage. These outcomes will further contribute to efforts to enhance circularity and support a sustainable future.

Lithium Recovery from Highly Mineralized Calcium Chloride Brines of the Udachnaya Kimberlite Deposit as an Alternative Source of Critical Raw Materials

Olga Ulanova
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

The growing demand for lithium driven by the global energy transition and rapid expansion of lithium-ion battery production has intensified the search for alternative lithium resources beyond conventional pegmatite deposits and continental salars. In this context, highly mineralized calcium chloride brines associated with deep geological formations have emerged as a promising unconventional hydromineral resource. Nevertheless, their complex ionic composition and extremely high salinity present significant challenges for the selective recovery of lithium.

This study investigates highly mineralized calcium chloride brines from the Udachnaya kimberlite deposit (Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation) as an alternative hydromineral source of lithium and other critical raw materials. Two types of natural brines were examined, including deep borehole brines and mine drainage brines generated during kimberlite mining operations. Their chemical composition was determined by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES), atomic absorption spectrometry (AAS), and flame photometry (FP).

Experimental investigations comprised static and dynamic ion-exchange tests employing the strongly acidic cation exchanger KU-2×8 and the weakly acidic cation exchanger KB-4P-2. Sorption kinetics, dynamic exchange capacity, selectivity coefficients, and distribution coefficients were determined to evaluate lithium recovery from highly mineralized multicomponent brine systems. Particular attention was devoted to lithium desorption using hydrochloric acid eluents in order to establish optimum elution conditions and maximize lithium recovery while minimizing co-elution of competing alkaline-earth cations.

The investigated brines belong to the calcium chloride hydrochemical type and exhibit total dissolved solids ranging from 283.5 to 378 g L^{-1}. Lithium concentrations vary between 125 and 250 mg L^{-1}, accompanied by elevated concentrations of strontium, rubidium, bromine and iodine, indicating considerable potential for integrated recovery of critical elements from a single hydromineral resource.

The experimental results demonstrate that lithium recovery is strongly controlled by both resin characteristics and brine chemistry. The highest dynamic sorption performance was achieved using the strongly acidic cation exchanger KU-2×8. Optimized desorption conditions yielded lithium recovery efficiencies of approximately 88–95%, enabling effective separation of lithium from calcium-rich brines despite the exceptionally high mineralization.

A preliminary resource assessment indicates that annual processing of approximately 900,000 m^3 of brine with an average lithium concentration of 0.225 g L^{-1} would contain approximately 200 t of lithium, corresponding to a theoretical production potential of about 1,250 t LiCl per year. Based on the experimentally achieved recovery efficiencies, the expected annual LiCl production is estimated at 1,050–1,175 t.

Unlike geothermal lithium projects, where dedicated production wells and brine extraction infrastructure are required, the highly mineralized brines at the Udachnaya kimberlite deposit are generated as a by-product of open-pit dewatering operations. Consequently, lithium recovery may be integrated into the existing mine water management system without establishing an independent hydromineral extraction operation. The obtained results demonstrate that these brines represent a technically feasible and economically promising alternative source of lithium, capable of contributing to the diversification of future critical raw material supply.

Is it worth closing the plastic loop in WEEE? Environmental and economic assessment of plastic separation and recycling versus incineration

Eduard Wagner[1], Theresa Aigner[1], Frederieke Aschenbrenner[2], Christian Aschenbrenner[2] & Ralf Ehrlich[2]
[1)] Fraunhofer IZM, Berlin, Germany
[2)] PA GmbH, Isen, Germany

Plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE) are often routed to thermal treatment after shredding, although selected polymer fractions can technically be recovered before mixed-scrap treatment. This paper assesses whether selective dismantling of polypropylene and acrylonitrile butadiene styrene from end-of-life washing machines can reduce climate impacts and become economically viable under practical treatment conditions. The functional unit is the treatment of 1 tonne of end-of-life washing machines. A baseline scenario, in which the complete plastic fraction is incinerated with energy recovery, is compared with a recycling scenario in which removable plastics are dismantled, mechanically recycled and credited for substituting virgin polymers. Climate impacts are taken from an accompanying life-cycle assessment, while the economic assessment is based on case-study labour data, avoided incineration costs and revenues from recycled plastics. The baseline results in 448.98 kg CO_2-eq/t, while the recycling scenario reduces impacts to 416.88 kg CO_2-eq/t. However, the direct economic balance remains negative under observed operating conditions because additional labour costs exceed material revenues and avoided disposal costs. Sensitivity analysis shows that economic feasibility depends less on plastic revenues alone than on the combined effect of higher recovery rates, improved throughput and value-sharing mechanisms across the WEEE value chain.

Recyclability of Mattress Covers: A Market and Material Analysis

Natalie Marzinek[1], Hannah Weber[1], Gerald Koinig[1] & Alexia Tischberger-Aldrian[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

The European Union generates approximately 30 million used mattresses including covers each year, with replacement often occurring after about five years for hygienic reasons; most of these items are landfilled or used for energy recovery, while material recycling remains rare. Mattress covers (as home textiles) receive less attention than apparel in textile recycling, yet their multi-layered, complex constructions pose distinct challenges for sorting and material recovery.

This contribution assesses the recyclability of mattress covers through a combined market study and experimental material characterization. The market analysis examined products from five manufacturers and systematically recorded key attributes including price, cover and filling materials, filling grammage, quilting type, zipper configuration, and constructive features. Experimentally, 315 corner samples (30 × 30 cm) were collected from three Austrian collection centers; for each, the number and build-up of visually distinguishable layers, quilting distances and patterns, functional elements (e.g., zippers, edge bands), and design features were documented, and every layer was analyzed via FTIR.

Results reveal a broad range of fibers in both post-consumer covers and current market offerings: besides polyester and cotton, viscose, polypropylene, polyurethane, elastane, and a notable increase in the synthetic cellulose fiber Tencel are used; polyester dominates as the principal fiber at a 65% mass share. Mono-material covers occur primarily in lower-priced products (100% PES) and in ecologically positioned products (100% CO), whereas higher-priced segments favor functionality-driven material combinations. Functional elements such as zippers are standard; removable, washable designs support hygiene and product longevity but add material variety. At the same time, manufacturer information is inconsistent and sometimes obscured by marketing terms, while decisive details on layer counts and intra-layer composition are largely missing and unevenly accessible across websites. Market tendencies indicate greater functional differentiation and increased use of recycled fibers at the premium end, while fiber-type combinations in the low-price segment have changed little in recent years. The expected price–material quality correlation is not consistently observed across segments.

Based on these insights, we propose eco-design requirements to facilitate high-quality recycling: limit fiber complexity; use easily separable connections; avoid non-functional design elements; minimize additives; promote repairability; and introduce minimum recycled content quotas. High-quality recycling depends on reliable information about material composition and structure; regulatory adjustments to textile labeling and harmonized labels are recommended to improve transparency. Manufacturer-based or material-specific sorting would only be practicable if product information is digitally stored and retrievable—for example via a digital product passport.

Too much of a good thing? - A quantitative analysis of decorated plastic packaging in the Austrian light packaging stream

Alexia Tischberger-Aldrian[1], Nikolai Kuhn[1], Andreas Klöckl[1], Namrata Mhaddolkar[1], Dieter Schuch[2], Jörg Fischer[3], Viktoria Helene Gabriel[4], Vasiliki-Maria Archodoulaki[5] & Gerald Koinig[1]

[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria
[2)] Altstoff Recycling Austria AG, Vienna, Austria
[3)] Johannes Kepler University Linz, Institute for Polymeric Materials and Testing / LIT Factory, Linz, Austria
[4)] University of Applied Sciences, Department of Packaging and Resource Management, Vienna, Austria
[5)] TU Wien, Institute of Materials Science and Technology, Vienna, Austria

Decorative elements on rigid plastic packaging, particularly full body sleeves, can strongly influence sensor-based sorting and downstream recyclability, yet representative, object-level data on their prevalence in Austria's lightweight packaging stream have been scarce. This study provides a nationwide, material- and application-specific quantification of decoration types and coverage grades on rigid packaging collected via the Austrian "Gelber Sack," and links these findings to design-for-recycling implications and consumer detachment behavior. The work draws on the circPLAST-mr characterization campaign and the ongoing SLEEVE project. The circPLAST-mr sampling followed CEN/TR 15310 across urban, intermediate, and rural sites in Styria (January–November 2023), with transferability assessed through validation samples from additional federal states and comprehensive laboratory object characterization by material, form, and use category. In parallel, SLEEVE targets design guidelines for sleeved rigid packaging, including a market survey of fully sleeved items, additional manual sorting/characterization to observe real-world sleeve removal by consumers, and the development of communication elements to improve detachment at disposal.

Across HDPE, PET, PP, and PS rigid fractions, higher decoration coverage grades are common, and fully covered items (100%) are present in all materials, totaling 513.8 t/a (HDPE), 3,228.8 t/a (PET), 918.2 t/a (PP), and 256.9 t/a (PS) in Austria. For fully covered packages, bottles and cups dominate; bottles are predominantly decorated with plastic full body sleeves, while cups also show substantial paper decorations for PP and PS. Decoration types are highly material- and coverage-dependent: paper labels dominate PS across coverage grades; in-mould labels are frequent for PP at intermediate coverage; and plastic decorations (notably sleeves) are used across all materials, with fully sleeved quantities estimated at 478.9 t/a (PP), 513.0 t/a (HDPE), 71.8 t/a (PS), and 3,206.3 t/a (PET). Application analysis shows that fully sleeved PP, PET, and PS are mainly used for dairy products, whereas HDPE is primarily used for household cleaning products before dairy. Reflecting current industry perceptions, fully sleeved items face a negative reputation due to impaired optical detection and mis-sorting risks in sensor-based systems, which may reduce recyclate yield.

It seems that removable, fully sleeved designs can deliver high-quality, unprinted main bodies when consumers detach sleeves, while offering large surfaces for mandatory and marketing information.

The combined findings provide quantitative evidence to refine design-for-recycling guidelines, inform consumer communication to increase sleeve detachment, and support the optimization of sensor-based sorting strategies for decorated rigid packaging in Austria.

CirMat – A Recyclable Mattress and Waste Collection System

Thomas Senfter[1], Birgit Christandl[1], Manuel Berger[1], David Hackl[1], Maximilian Larch[1], Jakob Germann[1], Roman Eberharter[2], Matthias Zitterbart[3] & Martin Pillei[1]
[1)] MCI – The Entrepreneurial School, Innsbruck, Austria
[2)] Betten Eberharter GmbH, Ramsau/Zillertal, Austria
[3)] DAKA Entsorgungsunternehmen GmbH & Co. KG., Schwaz, Austria

Conventional post-consumer mattresses represent a severe ecological challenge in global waste management. Due to their irreversibly glued multi-material layers, comprising of polyurethane foams, latex, and textiles, high-quality material recycling is both technically and economically unfeasible. Consequently, the vast majority of end-of-life mattresses end up in waste-to-energy plants (incineration) or landfills, causing a permanent loss of valuable secondary raw materials and directly contradicting the goals of the EU Green Deal. To bridge this circularity gap, the collaborative project CirMat re-engineers the entire mattress life cycle. The consortium, consisting of the Management Center Innsbruck (MCI), Betten Eberharter GmbH, and DAKA Entsorgungsunternehmen GmbH & Co KG, addresses the issue through a three-pillared approach: technological product innovation, empirical user validation, and regional reverse logistics.

The technological core of the project involves a complete departure from chemical bonding agents. The MCI is developing a potentially patentable, adhesive-free interlocking technology for polymer foam layers. Utilizing numerical Finite Element Method (FEM) simulations, the mechanical interlocking geometries are optimized to ensure structural stability and slip resistance during usage, while fully preserving ergonomic comfort. At the end of the product life cycle, these mechanical connections allow for a fast and un-contaminated separation into single-material streams.

To validate market readiness and customer acceptance, Betten Eberharter GmbH has established a dedicated, scientifically monitored sleep laboratory. Moving away from superficial in-store testing, selected test subjects evaluate prototype configurations during standardized overnight stays. Subjective feedback regarding sleep quality and tactile comfort is systematically cross-referenced with numerical FEM simulation data, resulting in a iterative optimization loop between research and craftsmanship.

Finally, the material loop is closed by DAKA through a specialized reverse logistics framework deployed in a Tyrolean pilot region. The critical logistical objective is the dry, weather-protected collection of discarded mattresses to prevent mold and contamination, which would otherwise degrade the polymer foams. Combined with the adhesive-free design, clean collected mattresses are disassembled at the recycling facility and re-introduced into new production cycles as high-value secondary resources. In conclusion, CirMat demonstrates a model that combines circular economy demands with commercial viability and consumer comfort.

Cooperative collaboration between project proponent and authority – a contribution to accelerating permitting procedures

Ulrich Stock
[1)] formerly the Brandenburg State Office for the Environment, Germany

This article addresses the acceleration of permitting processes, using landfill approval procedures as a case study. First, the duration of these procedures is determined by analyzing data from the EIA (Environmental Impact Assessment) portal. The analysis reveals significant variations in duration between procedures, with no apparent reason for these differences discernible from the portal's data.

In the author's view, the duration of permitting processes for infrastructure and industrial facilities is determined by both "hard" (objective) and "soft" (subjective) factors. The author identifies regulatory requirements and specific technical standards as "hard" factors and describes their role in landfill permitting; personnel and material resources constitute another hard factor.

Conflicts arise between the permitting authority and the project investor during the process due to differing interpretations regarding the scope for discretion and design flexibility inherent in these hard factors. Various strategies exist for resolving such conflicts. The timeframe for resolution depends on "soft" factors: the ability of the authority and the investor to cooperate, communicate, and coexist. The author describes these factors, noting that these abilities depend heavily on the motivation of the staff involved in handling the permitting process on both sides. The article also illustrates the impact of this motivation on the potential for conflict resolution.

The article concludes by describing practical forms of collaboration between the permitting authority and the project investor.

Conflict resolution in the permitting process – can it succeed?

Ulrich Stock
[1)] formerly the Brandenburg State Office for the Environment, Germany

The implementation of large-scale infrastructure and industrial projects inevitably leads to conflicts between project investors and affected parties. This article examines the possibility of resolving these conflicts within the framework of the permitting process.

The causes of the conflicts are described. Based on legal requirements, the author outlines the conflict resolution potential of planning approval procedures and permitting procedures under the Federal Immission Control Act. The author then compares the intentions of the Aarhus Convention, which establishes the foundations for public participation in the permitting process, with the actual course of a permitting procedure.

He concludes that permitting procedures, due to their fundamental legal structure and standardized process, cannot provide comprehensive conflict resolution. Based on the roles of the parties involved in the process, the author draws conclusions for an alternative organization of conflict management.

Detection of textile finishing using NIR spectroscopy

Felix Scheidl[1]
[1)] Technical University of Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

The diversity and complexity of contemporary textiles is increasing, driven not only by a broader mix of fiber types but also by a wide range of chemical and physical finishes. While such finishes enable key functional properties—water repellency, flame retardancy, and antimicrobial performance—they can hinder recycling from both technical and economic perspectives. Reliable detection of finishes is therefore crucial for sensor-based sorting. A master's thesis investigated the suitability of near-infrared spectroscopy (NIR) to detect textile finishes by systematically recording and comparing spectral signatures of defined fiber types and their finishes.

Multiple batches were assembled to cover varied fibers and treatments, keeping fiber type constant within each batch while varying finishes across samples. Measurements were taken with a handheld NIR device between 1615 and 2330 nm. Each sample was scanned five times on both sides to account for potential one-sided coatings; spectra were then preprocessed using Standard Normal Variate normalization and Savitzky–Golay smoothing. Control spectra of untreated fibers were also collected. Although additional tests were conducted on an experimental sensor-based sorting system (991–1677 nm), this summary reports only the handheld results.

Initial findings indicate that dyes generally do not produce observable deviations from untreated textiles in this wavelength range. Likewise, flame-retardant and antimicrobial treatments showed no significant spectral differences. In contrast, polymer coatings—particularly polyurethane (PU)—produced clear deviations, with a notable absorption increase around 2000 nm, consistent with the N–H combination band and indicative of a PU layer. Overall, the results suggest that, within the 1615–2330 nm range, NIR spectroscopy has limited capability to detect many finishes, with polymer coatings being a key exception. Further work should explore broader wavelength ranges, enhanced chemometric methods, and complementary sensors to improve finish detection in sorting applications.

Screening Compost – Clean Up Fines

Hanns-Thomas Teubel
Ing. Teubel Umwelttechnik e.U., Handel & Handelsagentur, Gmunden, Austria

The article addresses the question of whether small plastic particles still contained in the fine fraction of compost can simply be separated during screening, and what technical effort this would entail.

Plastic contamination has been a significant problem for composting plants for decades. Improperly disposed plastic in green waste and organic waste accumulates as microplastics in the finished compost. Despite existing standards and regulations, practice shows that finished, screened compost still contains plastic particles, which are then applied to fields or sold to end customers as bagged compost mixes. It is scientifically proven that humans ingest microplastic particles through air, water and food. The accumulation patterns and health consequences of plastic ingestion are currently the subject of numerous studies. In compost production, required quality guidelines are typically met through fine screening (< 10 mm). Nevertheless, lightweight plastic contaminants remain in the finished product. This raises the fundamental question: Is it worthwhile to apply suction to the fine fraction to remove contaminants during the screening of materials like compost and excavated soil?

To investigate this, we conducted tests on various materials. We placed a suction head on the respective fine-grain belt of a drum screen and used a TUKWIND fan to separate the light contaminants of plastic films and blow them into a special bigbag net. We tested two different materials: the first was screened material from a bio-compost facility, and the second was an excavated soil from a recycling plant. Both materials were screened using a drum screen with 15 and 20 mm square holes. The suction head was applied at the fine-fraction discharge belt. For the bio-compost, the big bag net (510 liters) was full of separated plastic after only one hour. In case of the material from the recycling plant (very small input quantity: 7 m^3) a total of 2.6 liters of plastic parts were nevertheless separated, of which approximately 0.6 liters originated from the fine fraction.

This example demonstrates that a well-adjusted fan system can remove lightweight plastic contaminants with extreme efficiency. They low operating costs of such a system, combined with an investment of only 5-10% of that for a standard drum screen, make it a very attractive option. Separating plastic particles from the fine fraction is always sensible, as it can help reduce the amount of microplastics in our environment.

Centrifugal Melt Separation of Co-Extruded Multi-Material Polymer Products for Recycling Applications

Katarina Marković[1,2], Jutta Geier[1,2], Weiyu Zhao[2], Michael Feuchter[2], Márton Bredács[1] & 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

Co-extruded multi-material polymer products represents a significant challenge for plastics recycling, as these materials consist of different thermoplastics permanently bonded within a single structure. Conventional recycling routes such as shredding then re-melting and re-extrusion are unable to separate the individual components, resulting in recyclates with poor and unpredictable properties. When such materials are processed without prior separation, residual fractions of one material within the other can act as defects, leading to phase incompatibility, weak interfacial adhesion, stress concentrations, and ultimately and consequently deteriorated mechanical performance and reduced material stability during end-use applications. Consequently, these materials are often excluded from closed-loop recycling and downgraded to low-value applications or disposed of entirely.

To address this limitation, this work investigates a centrifugal melt separation process as a novel physical separation method for co-extruded polymer specimens. The approach is based on the controlled melting of the material under rotational motion, where centrifugal forces combined with thermal softening promote phase migration driven by differences in density and melting temperature range. Thermogravimetric analysis performed prior to testing ensures thermal stability within the applied temperature range. The shredded specimens containing two different thermoplastic materials are placed inside a steel tube, heated above their melting range, and subjected to defined rotational speeds for a controlled duration. During this process, the molten phases redistribute radially, forming distinct layers along the cylinder cross-section. Following controlled cooling, the solidified material is removed and evaluated with respect to layer formation, separation sharpness, and positional distribution within the cylinder. The method enables direct observation of the separation behaviour under discontinuous operation and provides qualitative insight into the influence of temperature and rotational speed on phase migration, while offering clear potential for continuous implementation through direct integration of the centrifuge setup with an extrusion process. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) was employed to support the interpretation of the separation results.

The presented centrifugal melting approach demonstrates the potential to separate multi-material polymer systems that are otherwise incompatible with conventional mechanical recycling. By enabling material-specific recovery, this method contributes to improving recyclate purity and performance, therefore supporting higher-value reuse of complex plastic waste streams. The findings highlight centrifugal melt separation as a promising tool for advancing recycling strategies for co-extruded and multi-material polymer products.

Quantifying What We Avoid: LCA for Evaluating Waste Prevention and Reuse

Silvia Schütz[1] & Gudrun Obersteiner[1]
[1)] BOKU University, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

Waste prevention is the best waste management policy option, according to the waste hierarchy, the EU's main rule for the environmental ranking of waste management policies. However, policymakers, industry, and consumers often overlook its potential and favour recycling because it generates more visible economic activity, rather than prioritizing prevention. To support the EU's goal of a climate-neutral economy by 2050, we need to communicate the significant advantages of preventing waste at the source and promoting reuse as part of broader prevention actions. Industries with predominantly linear systems—such as textiles—can particularly benefit from establishing circular systems including reuse and prevention.

The highest-pressure categories for primary raw materials and water use, as well as for greenhouse gas emissions, are food, housing, transport, and textiles. Waste prevention at source is recognized as having high potential for cutting emissions, but it still lacks robust quantification. Despite existing guidelines for the assessment of waste prevention and reduction (e.g., the Circular Footprint Formula, the Avoided Burden/Substitution approach), methodological uncertainties remain—for example, when a product previously destined for waste is reused due to innovation. Previous waste products thus become multi-outputs and therefore inputs for new production processes. Resulting allocation across upstream and downstream processes is therefore critical.

This conference paper shows case studies conducted at the Institute of Waste Management and Circularity of BOKU University Vienna, that quantified environmental impacts of prevention or reuse actions. The different approaches that were applied in those studies are discussed. The conclusion underscores the central importance of transparent allocation and substitution decisions. Overall, prevention-oriented measures generally deliver greater environmental benefits than downstream treatment options; recycling remains important but is secondary once prevention and reuse have been exhausted. The study derives from this methodological needs and action impulses for policy, business, and consumption.

Raising Awareness in Schools: The Impact of the “GewissensBISS” Traveling Exhibition

Gudrun Obersteiner[1] & Sandra Luck[1]
[1)] BOKU University, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

Food waste is a significant social and environmental problem that arises primarily in private households—which account for over 50% of the total amount of avoidable food waste in Austria. Against this backdrop, the Institute for Waste and Circular Economy at BOKU Vienna, in collaboration with Tafel Austria, has created the traveling exhibition “GewissensBISS – harvested. bought. thrown away.” The goal is to educate visitors about the causes, consequences, and prevention strategies, as well as to raise awareness of resource-conserving food practices through 10 largely interactive stations. The exhibition is primarily aimed at students aged 10 and older, as children and adolescents play a central role in raising awareness and passing on knowledge to their families and social circles.

The accompanying evaluation covers two target groups: students (pre- and post-surveys) and educators. In total, there were more than 1,000 fully completed pre- and post-survey questionnaires from students, as well as more than 50 online responses from educators. Since 2023, the exhibition has been viewed by more than 15,000 students in Austria.

Teachers’ overall assessment of the exhibition is very positive (mean school grades, 1 = “very good” to 5 = “unsatisfactory”): clarity of content (M = 1.5), usefulness of the provided materials (M = 1.8), and age-appropriate presentation (M = 1.7). At the student level, significant learning gains were observed in all surveyed topic areas related to food waste, land use, storage, and climate impact. With regard to motivational content, emotional approaches dominated (shocking images: 30%), followed by information on animal husbandry (25%), expiration dates (23%), and facts and figures (21%).

Overall, the evaluation paints a positive picture: The exhibition is perceived as engaging, understandable, and informative; it leads to increased knowledge and greater motivation to adopt food-conscious behaviors. More than half of the students indicate that they want to be more mindful about food in the future (e.g., throwing away less, using up leftovers, or conducting sensory checks on products nearing their best-by dates). Approximately two-thirds of the students surveyed want to talk to their parents about their visit to the exhibition. The results underscore the potential of interactive educational formats to raise awareness among young people and to have an impact through family-based ripple effects.

Batteries in waste streams: Still an underestimated risk

Nina Nowak[1], Elena Dvorak[1], Roland Pomberger[1] & Thomas Nigl[1]
[1)] Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Technical University of Leoben, Leoben, Austria

Austria's municipal waste system faces a structural collection gap for lithium-ion batteries (LiBs) amplifying fire and environmental risks. While the overall collection target for portable batteries has generally been met, waste-sorting analyses in 2026 identified approximately eight LiBs per tonne of residual waste - four times the 2016 level - creating a growing number of ignition sources in mixed waste streams. The article outlines the EU's revised battery categories under Regulation (EU) 2023/1542 including the new category for light means of transport (LMT) batteries such as e-bike battery packs. The regulatory shift from three to five battery categories in 2026 exposed an interim mismatch in collection infrastructure: large, high-energy LMT batteries were co-collected with smaller portable batteries until the transition in April 2026, increasing on-site hazards. LiB ignition in waste management is primarily driven by thermal runaway triggered by mechanical, electrical or thermal stress. Mechanical and thermal stressors may persist after use during transport, handling, storage and processing. The article further explains how these mechanisms translate into elevated fire risks in waste operations. Focusing on LiBs, the article analyses the difference between the amount of portable batteries placed on the market and the amount of end-of-life (EoL) portable batteries collected. By comparing these quantities and calculating collection rates for the years 2018 - 2024, the analysis highlights the discrepancy between the collection rate for all portable batteries and the collection rate for LiBs. The final chapter examines two comparatively under-discussed risks associated with LiB fires: hazardous emissions and insufficient incident data. LiB thermal events can generate harmful emissions, including carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO_2), fluoride-containing gases and contaminated firefighting wastewater. In addition, battery-induced incidents are likely undercounted because of uncertainty in determining causes, inconsistent internal reporting, reputational and insurance disincentives and the lack of standardised coding in public fire statistics. The article concludes by calling for improved and standardised fire-incident coding, mandatory anonymised reporting of fires including near-miss events and enhanced data analysis to support sensor-based early detection.

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

Autorenverzeichnis

A
Adam Josef ... 103
Aigner Theresa ... 209
Amort Katrin ... 81
Archodoulaki Vasiliki-Maria ... 219
Aschenbrenner Christian ... 209
Aschenbrenner Frederieke ... 209
Askari Shirin ... 173, 179
Autischer Michael ... 135

B
Bardenheuer Peter ... 71
Baumann Nils ... 115
Berger Manuel ... 225
Bermadinger Jasmin ... 45
Berschl Martin ... 167
Bilek Felix ... 57
Binder Martin ... 57
Blasenbauer Dominik ... 189
Brandes Clara ... 57
Bräutigam Bernd ... 57
Bredács Márton ... 249
Brüning Ralf ... 41
Büter Andreas ... 183

C
Christandl Birgit ... 225

D
da Silva Félix Joel ... 97
Dielacher Markus ... 87
Dost Philipp ... 57
Dvorak Elena ... 263

E
Eberharter Roman ... 225
Ehrlich Ralf ... 209
Eibinger Klaus ... 131
Ellersdorfer Markus ... 131

F
Feuchter Michael ... 249
Fischer Jörg ... 159, 167, 219
Flamme Sabine ... 115

G
Gabriel Viktoria Helene ... 219
Geier Jutta ... 249

Germann Jakob 225
Gerstner Evgenij 81
Grab Thomas 57
Grai Kseniia 173, 179
Greiff Kathrin 71
Grube Elisabeth 57

H
Hackl David 225
Haderer Philipp 65
Händel Falk 57
Hänel Andreas 57
Hans Ann-Kathrin 93
Hassan Amr HM 135
Hasterok Anna-Maria 57
Haubrich Frank 51
Hess Lisa-Marie 51
Heß Thomas 51
Hofbauer Hannah 127
Hrad Marlies 199
Huber-Humer Marion 199
Hummel Roman 81

J
Jölli Silvia 109
Juhart Joachim 135

K
Kalwa Fritz 57
Kiem Felix 143
Klöckl Andreas 131, 219
Koinig Gerald 147, 153, 193, 215, 219, 241
Kopecká Romana 199
Kramer Georg 57
Krause Thomas 41
Kruschitz Werner 87
Kuhn Nikolai 219

L
Lang Clemens 123
Larch Maximilian 225
Laure Mariella 189
Lederer Jakob 77
Leiblein Janina 51
Leitner Johannes 131
Lorber Bojan 193
Luck Sandra 259
Luckeneder Angelika 119

M
Mager Moritz 167
Maier Sarah 163
Maierhofer Thomas 103
Marković Katarina 249

Martinelli Walter 147
Marzinek Natalie 215
Meissner Markus 45
Meitner Daniela 119
Mhaddolkar Namrata 219
Mika Simon 77
Morgenstern Tanja 57
Mühl Julia 77

N
Neumann Andreas 93
Nigl Thomas 263
Nowak Nina 263

O
Obersteiner Gudrun 253, 259
Oreski Gernot 249

P
Pillei Martin 143, 225
Pinka Jana 51
Pladerer Christian 65
Pomberger Roland 103, 263
Pumpa Martin 57

Q
Quicker Peter 97

R
Radmann Yves 147
Ragossnig Arne M. 81, 87
Rath Maike 57
Romm Thomas 45
Roßkogler Susanne 61
Rudolph Sascha 57

S
Schaller Maria-Barbara 57
Scheidl Felix 241
Scheytt Traugott 57
Schlicke Dirk 135
Schmid Verena 103, 109
Schmidt Sandra 183
Schnöll Stefan 103
Schuch Dieter 219
Schütz Silvia 253
Schwarz Romy 159
Scsepka Michael 189
Senfter Thomas 143, 225
Spies Alena Maria 71
Stock Ulrich 229, 235
Strach Michael 131

T
Teubel Hanns-Thomas 245
Tischberger-Aldrian Alexia 109, 131, 147, 153, 163, 173, 179, 193, 215, 219, 241

U
Ulanova Olga 203

V
Vollprecht Daniel 51

W
Wagner Eduard 209
Wagner Maximilian 127
Walk Tobias 189
Weber Hannah 215
Wehrspohn Ralf 93
Wernik Roland 103
Witt Florian 41
Wohter Daniel 97
Wunderlich Timm 57

Z
Zhao Weiyu 249
Zitterbart Matthias 143, 225
Zumpfe Sonja 45

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

Sachregister

A
Abfallende ... 87
Abfallsammlung ... 103
Abfallvermeidung ... 45, 253
Abfallwirtschaft ... 193
Absaugung ... 245
Abscheidung ... 97
Abwasser ... 51
Additives ... 71
Altstoffsammlung ... 103
Ausrüstungen ... 241
Ausstellung ... 259

B
Batterien im Restmüll ... 163
Baurestmassenaufbereitung ... 189
Behörden ... 229
Beschichtung ... 241
Bettaschen ... 77
Boden- und Grundwasserschutz ... 81
Bottom-up ... 81
Brand ... 263

C
$CaCO_3$ ... 93
Centrifugal melt separation ... 249
Chemikalienrückgewinnung ... 131
Chemisches Recycling ... 87
Circular Economy ... 199
Co-extruded polymers ... 249
Composite-Rezyklate ... 159
Compoundierung ... 159
Computer Vision ... 193
Condition assessment ... 173
Copper slag ... 93
Criticality ... 199

D
Demontage ... 115
Deponien ... 229
Digitaler Produktpass ... 215
Druckbelastung ... 183
DSP ... 115
Dunkelziffer ... 263
Durchbruchskurven ... 97

E
EDM ... 189
End-of-Life ... 115
Energieversorgung ... 57
Evaluierung ... 259

F
Fasertyp ... 215
Faserverstärkte Kunststoffe ... 159
$FeCO_3$ ... 93
Fehlwürfe ... 163
Feinfraktion ... 245
Footwear recycling ... 179
Footwear reuse ... 173
Footwear sorting ... 173
Friedhofsabfälle ... 163
FTIR ... 249
FTIR-Spektroskopie ... 123
Full Body Sleeves ... 219
Füllstoffe ... 159

G
Genehmigung ... 229
Genehmigungsdauer ... 229
Genehmigungsrecht ... 235
Genehmigungsverfahren ... 235
Grundwasser ... 57
GWP ... 135

H
Hochmineralisierte calciumchloridische Solen ... 203

I
Indicators ... 199
Industriell hergestellte Gesteinskörnung ... 77
Industrielle Anlagen ... 235
Industry 5.0 ... 61
Inline process monitoring ... 71
Ionenaustausch ... 203

K
KI ... 115, 147
Klärschlamm ... 123
Klebstofffreie Verbindungstechnologie ... 225
Kompostqualität ... 245
Konflikte ... 235
Kreislaufwirtschaft im Bauwesen ... 45
Kreislaufwirtschaft ... 65, 77, 127, 131, 143, 167, 225
Kreislaufwirtschaftsgrundsätze ... 109
Kunststoffaufbereitung ... 119
Kunststoff-Recycling ... 87
Kunststoffverpackungen ... 219
Kupfer ... 147

L
Labormaßstab ... 119
Laminate ... 183
Landwirtschaftliche Böden ... 123
Large Language Models ... 189
Lebensmittelabfall ... 127
Lebensmittelabfallvermeidung ... 259
Lebenszyklusanalyse ... 253
Leichtverpackung ... 219
Lithiumdesorption ... 203
Lithiumgewinnung ... 203
Lithiumsorption ... 203

M
Machine Learning ... 147, 153
Manufacturing Industry ... 61
Maßnahmen ... 259
Material- und Objektcharakterisierung ... 219
Materialcharakterisierung ... 131
Materialvielfalt ... 215
Matratzenrecycling ... 215
Mechanische Aufbereitung ... 143
Mehrweg-Flasche ... 65
Mikrokunststoffe ... 123
Mindestrecyclatquoten ... 87
Mineralization ... 93
Mobile Aufbereitungstechnik ... 189
Modifizierung ... 167
Modulares Design ... 41
Multi-material composition ... 179
Multi-material recycling ... 249

N
Nachhaltige Matratzenentwicklung ... 225
Nachhaltigkeit ... 65
Naturfaserverstärkte Materialien ... 183
Nudging ... 103
Nutzerzentrierte Produktentwicklung ... 225

O
Oberflächenwasser ... 57
Objekterkennung ... 193
Öffentlichkeit ... 235
Ökobilanz ... 253

P
Performancebasierter Betonentwurf ... 135
Photovoltaik-Module ... 143
Physical separation ... 249
Plastic recycling ... 71, 209
Polyester ... 215
Polymercharakterisierung ... 123
Polymere ... 241
Polypropylen ... 167

Post Consumer Lightweight Packaging 153
Post-consumer Abfall 167
Post-consumer footwear waste 179
Post-consumer footwear 173
Post-Consumer-Recycling 225
Prozesswasser 51
Pyrolyse 119
Pyrolyseöl 87
Python 193

Q
Qualität 147
Quality control 71

R
Rauchgasreinigung 97
Recycling 119, 127, 143, 189, 193, 199
Recyclinghof 103
Refurbishment 41
Reinigungsstufen 119
Remanufacturing 41
Reparatur 41
Resource Loss 61
Ressourceneffizienz 159
Ressourcenpark 103
Ressourcenschonung 127
Reusability classification 173
Re-Use 65
R-Grundsätze 109
Rissbildung 135
Rohstoffe 143
Rostaschen 77
Rückgewinnung 51

S
Sauergase 97
Sammelquoten 263
Schließungsbericht 81
Schredderschrott 147
Schutzmaßnahmen 81
Sekundärrohstoffe 51
Selective dismantling 209
Selektiver Rückbau 45
Seltene Erden 51
Sensor Based Sorting 153
Short-wave infrared spectroscopy 71
Siedlungsabfälle 163
Smartphones 41
Sortierung 241
Soziale Integration 45
Sprachmodell 115
Steel slag 93
Stoffinventar 81
Stoffliche Verwertung 131

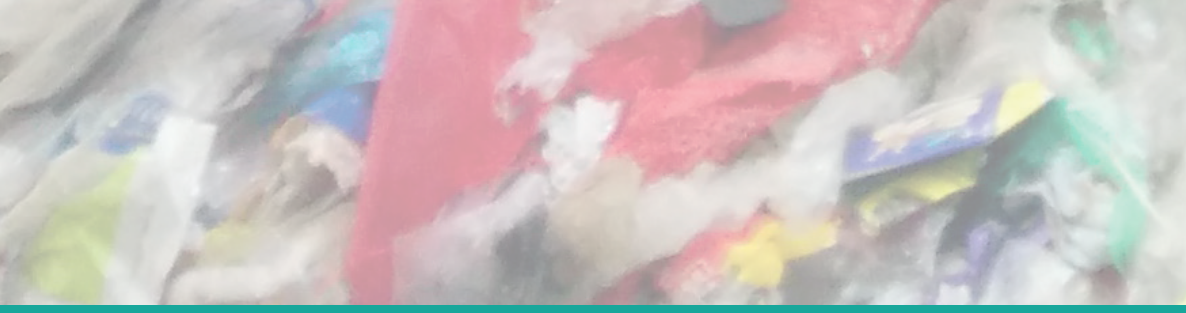
Störstoffe 163

T
Techno-economic assessment 209
Temporary Material Hubs 199
Textilabfall 109
Textilien 241
Textilindustrie 109
Textilrecycling 109
Thermal Runaway 263
Tourismus 127
Tunnelbau 135

V
Verfahren 229

W
Wärmespeicher 57
Washing machines 209
Wasserspeicher 57
WEEE 209
Weinbranche 65
Wiederverwendung von Bauteilen 45
Wirbelschichtreaktor 97

Z
Zellstoffproduktion 131
Zusammensetzung 219
Zwangsspannungen 135



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 **P O S T E R** inklusive englischem Abstract zusammengefasst.

ISBN: 978-3-9506289-1-3