

POSTER-Konferenzband
zur 16. Recy & DepoTech-Konferenz

9. - 11. November 2022
Montanuniversität Leoben, Österreich

Herausgeber: Roland Pomberger, Josef Adam, Michael Altendorfer, Therese Bouvier-Schwarz, Peter Haslauer, Lisa Kandlbauer, Karim Khodier, Gerald Koinig, Nikolai Kuhn, Tatjana Lasch, Namrata Mhaddolkar, Thomas Nigl, Bettina Rutrecht, Renato Sarc, Theresa Sattler, Sabine Schlögl, Hana Stipanovic, Alexia Tischberger-Aldrian und Sandra Viczek.

POSTER-Konferenzband
zur 16. Recy & DepoTech-Konferenz

9. - 11. November 2022
Montanuniversität Leoben, Österreich



Herausgeber

Roland Pomberger, Josef Adam, Michael Altendorfer, Therese Bouvier-Schwarz, Peter Haslauer, Lisa Kandlbauer, Karim Khodier, Gerald Koinig, Nikolai Kuhn, Tatjana Lasch, Namrata Mhaddolkar, Thomas Nigl, Bettina Rutrecht, Renato Sarc, Theresa Sattler, Sabine Schlögl, Hana Stipanovic, Alexia Tischberger-Aldrian und Sandra Viczek



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 2022

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW)
Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, Österreich
Telefon: +43 (0) 3842 / 402-5101, Telefax: +43 (0) 3842 / 402-5102
E-Mail: avaw@unileoben.ac.at, Internet: <https://www.avaw-unileoben.at/>



Gedruckt in Österreich

DGS - Druck u. Graphikservice GmbH
Hardegasse 69, 1220 Wien, Österreich
Oktober 2022



ISBN: 978-3-200-08687-6

Inhalt

Vorwort Bundesministerin Leonore Gewessler	5
Vorwort Landeshauptmann Christopher Drexler.....	6
Vorwort Landesrat Johann Seitingner.....	7
Vorwort Sektionschef Christian Holzer	8
Vorwort Bürgermeister Kurt Wallner	9
Vorwort Rektor Wilfried Eichlseder	10
Vorwort Ingrid Winter	11
Vorwort ÖWAV-Geschäftsführer Daniel Resch.....	12
Vorwort VOEB-Präsidentin Gabriele Jüly	13
Vorwort Green Tech Cluster-Geschäftsführer Bernhard Puttinger.....	14
Editorial Roland Pomberger.....	15
Organisation, Redaktion und 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	377
Autorenverzeichnis	449
Sachregister.....	457



inSPire
SUSTAINABLE PERFORMANCE

VISIT US AT
OUR BOOTH:
RECY & DEPOTECH
9-11 NOV 2022

INSPIRE THE CLOSING OF MATERIAL LOOPS

inSPire sustainable performance

Establishing closed material loops internally and with our customers is essential. That's how we ensure a sustainable supply security with key raw materials and improve our carbon footprint. Considering this, we have set ourselves the ambitious target of achieving a share of more than 90% scrap and secondary raw material in production by 2030.

For further information please contact Franz Eder,
Lead of Circular Economy, franz.f.eder@voestalpine.com.

High Performance Metals Division
www.voestalpine.com/inspire

voestalpine

ONE STEP AHEAD.



Vorwort

FBM Leonore Gewessler
BMK

Das Konferenzprogramm der RecyDepoTech setzt auch anlässlich der 16. Auflage wieder neue Maßstäbe in den Bereichen der nachhaltigen Abfallwirtschaft, der Kreislaufwirtschaft und des Recyclings. Mit den ins Auge gefassten Schwerpunkten Sensor Based Sorting & Control, innovative Sortierverfahren und Recyclingtechnologien sowie dem verstärkten Einsatz digitaler Methoden in der Abfallwirtschaft bis hin zu neuartigen Businessmodellen bestätigt sich erneut das breite Spektrum dieser Veranstaltung und zieht eine stetig größer werdende Schar von Stakeholdern an die Montanuniversität nach Leoben.

Neben etablierten Fachbereichen die seit der Frühzeit der DepoTech zum Standard-repertoire gehören wie Deponietechnik und die Altlastensanierung kommen auch brennende Themen wie Lithium-Ionen-Batterien oder Lebensmittelabfälle zum Zug.

Das Kreislaufwirtschaftspaket zielt darauf ab Produkte, Stoffe und Ressourcen möglichst lange in der Wirtschaft zu halten und folgend die Entstehung von Abfällen hintanzuhalten. Dieses Ziel kann jedoch nur erreicht werden, wenn in allen entscheidenden Phasen die Produktlebenszyklen durch aktive und nachhaltige Maßnahmen weiter ausgebaut werden. Einem intelligenten Produktdesign gepaart mit der Abkehr von Obsoleszenz, einer sinnvollen Steigerung des Recyclings bis hin zur Wiederverwertung kommt dabei ein wesentlicher Stellenwert zur Schließung der Stoffkreisläufe zu.

Die österreichische Abfallwirtschaft leistet seit vielen Jahren einen oftmals unterschätzten Beitrag zum Wohlergehen unserer Gesellschaft. Neben der rein stofflichen Kreislaufführung trägt die Abfallwirtschaft nicht unwesentlich zur Sicherung der Energieversorgung bei, der in der Zukunft noch ergänzt werden soll. Mit der Heranziehung von abgeschlossenen Deponien zur Sonnenstromproduktion sollen künftig brachliegende Flächen sinnvoll genutzt und damit der Flächenverbrauch reduziert werden.

Die Wichtigkeit der Erhaltung fruchtbarer Böden und Grundwasserkörper rückt mit jeder Naturkapriole stärker ins Bewusstsein der Gesellschaft. Die österreichische Abfallwirtschaft hat sich den Schutz dieser Lebensgrundlagen seit jeher auf die Fahnen geschrieben und dabei innovative Ideen mit Verve umgesetzt. Die RecyDepoTech war und ist dabei die erste Anlaufstelle, Wegbegleiter und Impulsgeber zugleich und hat damit einen ordentlich zu würdigenden Anteil am gemeinsamen Fortschritt.

Die Verlängerung der Erfolgsstory RecyDepoTech steht wieder auf dem Programm – dazu die besten Wünsche und ein kräftiges Glück auf!



Vorwort

Landeshauptmann Christopher Drexler

Steiermärkische Landesregierung

Sehr geehrte Tagungsteilnehmerinnen und -teilnehmer!

Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit sind zentrale Themen für die Zukunft. Diesem umfassenden Bereich mit den Schwerpunktthemen Recycling, Abfallverwertung und -wirtschaft, sowie dem Ressourcenmanagement und der Deponietechnik, widmet sich die Abfallwirtschaftstagung Recy & DepoTech. Drei Tage lang wird Leoben, wird die Steiermark, zum Zentrum von Fortschritt und Innovation in der Abfallwirtschaft und Recyclingtechnik.

Diese Tagung ist nicht nur die größte abfallwissenschaftliche Konferenz im deutschsprachigen Raum, sondern sie hat sich auch international einen hervorragenden Ruf erarbeitet. Damit unterstreicht die Recy & Depo Tech auch in diesem Jahr, dass die Steiermark ein starkes Forschungsland und ein hervorragender Nährboden für Innovation ist. Mit zahlreichen Vorträgen wird die Recy & DepoTech 2022 wieder innovative Lösungen auf dem Gebiet der Abfallwirtschaft vorstellen und als Plattform von Wissens- und Erfahrungsaustausch zwischen Wissenschaft und Wirtschaft fungieren.

Mein Dank gilt allen, die zum Gelingen der Veranstaltung beitragen, von den Referentinnen und Referenten über die Kooperationspartner bis zum Organisationskomitee mit Roland Pomberger an der Spitze. Es freut mich ganz besonders als Landeshauptmann der Steiermark, einem Land der Forschung und des Fortschritts, sie hier begrüßen zu dürfen und wünsche Ihnen als Taktgeber und Ideenbringer in der Abfallwirtschaft drei produktive, spannende und schöne Tage in der Steiermark.

Ein steirisches „Glück auf!“

Ihr Landeshauptmann

A handwritten signature in dark ink, consisting of a long horizontal stroke followed by a stylized, cursive 'D' and 'R'.



Vorwort

Landesrat Johann Seitinger

Steiermärkische Landesregierung

Sehr geehrte Damen und Herren, liebe Expertinnen und Experten der Ressourcenwirtschaft!

Auf diesem Weg darf ich Ihnen als Teilnehmerinnen und Teilnehmer der „Recy & Depo Tech 2022“ in Leoben meine besten Grüße übermitteln. Es freut mich, dass diese bereits traditionsreiche Konferenz dank der umsichtigen Organisation seitens der Montanuniversität auch in diesem Jahr stattfinden kann.

Wir alle waren es gewohnt, alle materiellen Wünsche jederzeit „auf Knopfdruck“ erfüllen zu können. Knappheit war für die letzten beiden Generationen etwas nahezu Unbekanntes. Die aktuelle politische und wirtschaftliche Lage in Europa zeigt uns aber, wie verletzlich Nationalstaaten sein können, wenn Rohstoffe, Lebensmittel oder auch medizinische Produkte nicht in ausreichender Menge vorhanden sind und wie wichtig ein verantwortungsvoller Umgang mit unseren Ressourcen ist.

Neben den ganz praktischen Fragestellungen der Abfall-Logistik stehen wir vor neuen Herausforderungen sowohl im Umweltschutz als auch bei den technischen und hygienischen Anforderungen im Rahmen der Entsorgung. Hinzu kommt das steigende Bewusstsein für Nachhaltigkeit und Klimaschutz. Diesen Herausforderungen können und müssen wir uns in den nächsten Jahren stellen. In unserem Land wird mit großem Innovationsgeist an Antworten auf diese Fragen gearbeitet und insbesondere die Montanuniversität ist ein wissenschaftlicher Brennpunkt für neue Lösungen – vom Thema Ressourceneffizienz, „Future Waste“ bis hin zur Umweltanalytik.

Ich bin überzeugt davon, dass die „Recy & Depo Tech 2022“ über die wissenschaftliche Vernetzung hinaus zu einem Ausgangspunkt vieler neuer Überlegungen und Projekte werden kann und wünsche Ihnen weiterhin viel Erfolg in Forschung, Lehre und Praxis!

Ihr

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Johann Seitinger'.



Vorwort

Sektionschef Dipl.-Ing. Christian Holzer

Bundesministerium für Klimaschutz

Die Neuauflage der RecyDepoTech verspricht wieder einmal zum abfallwirtschaftlichen “Gassenfeger“ zu werden und zieht Experten aus Wissenschaft, Praxis und Verwaltung in ihren Bann bzw. an die Montanuniversität in Leoben. Die Themenlandschaft der gebotenen Vorträge verbreitert sich ständig und widerspiegelt damit eindrucksvoll die vielschichtigen Herausforderungen einer sich rasch verändernden Welt.

Durch die fortschreitende Globalisierung der Märkte haben sich in den letzten Jahrzehnten mannigfaltige Chancen aufgetan mit Wechselwirkungen auf den verschiedensten Ebenen, aber gleichzeitig haben sich auch neue Schwachstellen gezeigt, die es – insbesondere mit Hilfe der Abfallwirtschaft - zu bewältigen gilt. Die RecyDepoTech fungiert hier seit Jahrzehnten als verlässlicher Partner aller Stakeholder.

Pandemie und kriegерische Auseinandersetzungen verdeutlichten die Beschränktheit der Rohstoffe, die Fragilität der bestehenden Lieferketten, die Verwundbarkeit der Produktionsstätten bis hin zur Erkenntnis, dass der Mensch durch die stetige ungefilterte Informationsflut nur schwer zu einem bestimmten Handeln bewegt werden kann. Der zielgerichteten Verbreitung von wissenschaftlich gesicherten Erkenntnissen kommt in Zeiten der allgemeinen Verbreitung von unreflektierten Standpunkten ein wichtiger Stellenwert zu.

Die weltweiten Veränderungen im Ressourcenhaushalt und der Mobilität erfordern ein rasches Umdenken und ausbalanciertes Handeln von allen Entscheidungsträgern. Ein gewichtiger Teil der Lösung besteht in der engagierten Transformation der Abfall- zur Kreislaufwirtschaft – dieser Paradigmenwechsel ist ein Gebot der Stunde, aus dem Blickwinkel der Klimapolitik betrachtet sogar ein Muss mit höchster Dringlichkeit. Die RecyDepoTech wird diesen thematischen Ansprüchen auch heuer wieder vollauf gerecht und fungiert damit als Taktgeber der künftigen Entwicklung der Kreislaufwirtschaft.

In diesem Sinne wünsche ich der Veranstaltung wiederum einen durchschlagenden Erfolg.

Ein kräftiges Glück Auf



Vorwort

Kurt Wallner

Bürgermeister der Stadt Leoben

Sehr geehrte Damen und Herren,
geschätzte Tagungsteilnehmer:innen!

Noch vor einigen Jahren fanden viele der Themen, die im Rahmen der *Recy & Depo Tech* behandelt werden, kaum Beachtung. Heute jedoch dreht sich alles um nachhaltiges, wirtschaftliches Handeln und Abfälle werden als wertvolle Rohstoffe gehandelt. Vorausgesetzt, sie werden effizient und richtig gesammelt, aufbereitet und wiederverwertet. Die 16. Auflage der *Recy & Depo Tech* setzt sich mit komplexen Fragestellungen aus den Bereichen Abfallwirtschaft, Ressourcenmanagement, Recycling und Deponietechnik auseinander und leistet somit einen wertvollen Beitrag zur Verwirklichung abfallwirtschaftlicher Ziele.

Es freut mich besonders, dass die Tagung nach einer Corona bedingten Pause heuer wieder live über die Bühne gehen kann und Leoben Gastgeber für mehr als 500 Kongressteilnehmer:innen sein darf. Die große Anzahl an internationalen Fachleuten zeigt nicht nur den hohen Stellenwert der Veranstaltung, sondern ist auch der Vorreiterrolle der Montanuniversität auf den Gebieten Umweltschutz, Abfallverwertungstechnik und Recycling geschuldet. Die enormen Herausforderungen, insbesondere im Bereich Klima- und Umweltschutz sowie Ressourcensicherheit, erfordern innovative Lösungen. Das Institut für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft unter der Leitung von Professor Roland Pomberger leistet hier hervorragende Arbeit. Dank der neuen Ausrichtung in Richtung Nachhaltigkeit und Digitalisierung werden die Studierenden an der Montanuniversität künftig noch besser im Hinblick auf aktuelle gesellschaftliche und globale Herausforderungen geschult, um smarte Lösungen für ein besseres Morgen zu erarbeiten.

Auch die österreichische Abfallwirtschaft steht vor großen Herausforderungen, die natürlich auch Städte und Gemeinden betreffen. Die Stadt Leoben ist sich ihrer Verantwortung bewusst und setzt zahlreiche Schwerpunkte, um ihrer Rolle als Informant und Bewusstseinsbildner, beispielsweise durch entsprechende Berichterstattung im Stadtmagazin, in den sozialen Medien oder auch durch Informationsveranstaltungen, gerecht zu werden.

Wir sind sehr stolz auf die vielfältige Forschungstätigkeit der Montanuniversität und das Engagement der Wissenschaftler:innen, die Leoben als innovatives, grünes Zentrum im Herzen der Steiermark positionieren. In diesem Sinne wünsche ich der *Recy & DepoTech 2022* einen erfolgreichen Verlauf und spannende Diskussionen.

Ein Leobener Glück auf!



Vorwort

Univ.-Prof. DI Dr. Dr.h.c. Wilfried Eichlseder

Montanuniversität Leoben

Einen wesentlichen Bereich seit Gründung der Montanuniversität vor über 180 Jahren nahmen Ressourcen ein, ob Rohstoffe oder Energie. Waren es in der Gründungszeit mineralische Rohstoffe, so wurden diese etwa 100 Jahre später durch fossile Rohstoffe ergänzt. In den 90-Jahren des 20. Jahrhunderts erkannte man die Notwendigkeit, den Bereich Umweltschutz zu stärken und führte die Studienrichtung Industrieller Umweltschutz ein. Damit wurde auch der Grundstein für die Forschungsgebiete der Deponie- und Recyclingtechnik gelegt, in deren Umfeld die Tagung Recy- und DepoTech geschaffen wurde, die heuer bereits zum 16. Mal abgehalten wird und Spezialisten aus Wissenschaft und Wirtschaft zusammenbringt. Sie hat sich in den vergangenen Jahren zur größten Abfallwirtschaftstagung im deutschsprachigen Raum entwickelt und liefert einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung von Themenstellungen im Bereich der Nachhaltigkeit. Nachhaltigkeit war auch eines der zentralen Themen in der jüngsten strategischen Neuausrichtung der Montanuniversität. Das Wesen der gesamten Universität ist auf fünf Kernwerte ausgerichtet, die das gesamte Handeln bestimmen: Energieeffizienz, Klimaneutralität, Nachhaltigkeit, Zero Waste und Kreislaufdesign. Damit soll auf die großen Herausforderungen unserer heutigen Gesellschaft reagiert werden. Diese Kernwerte spiegeln sich nun in allen Bachelor- und Masterstudien wider und sind die Grundlage für die neu geschaffenen Kompetenzbereiche Advanced Resources, Smart Materials und Sustainable Processing. Die Studienpläne wurden dahingehend ausgerichtet, was im letzten Studienjahr großen Einsatz und viel Energie erforderte.

Energie erforderte auch die Organisation der Recy-/Depotech. Ich möchte Herrn Prof. Roland Pomberger und seinem Team dafür danken und wünsche den Teilnehmern interessante Fachvorträge, erbauliche Diskussionen und einen angenehmen Aufenthalt in Leoben.

Glück auf!

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'W. Eichlseder', with a long horizontal stroke extending to the right.



Vorwort

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

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

Eine der großen Herausforderungen der nächsten Jahre ist die Umsetzung des EU-Kreislaufwirtschaftspaketes. Ziel dieses Paketes ist, „den Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen innerhalb der Wirtschaft so lange wie möglich zu erhalten und möglichst wenig Abfall zu erzeugen.“ Das Erreichen der formulierten Zielvorgaben gestaltet sich in einigen Bereichen nicht einfach. Was es zu einem echten Wandel zur Kreislaufwirtschaft braucht, ist jedenfalls ein systemischer Ansatz zum vernetzten und konsequenten Handeln über die gesamte Wertschöpfungskette.

Die europäische Kommission wendet sich in ihren strategischen Dokumenten mit Maßnahmenempfehlungen häufig auch an die öffentliche Hand. Die aktuellen Entwicklungen und aufkommenden Technologien der Abfall- und Kreislaufwirtschaft sind daher auch für eine zukunftsorientierte Verwaltung von größtem Interesse. Das, was es dafür an Überblick und Austausch der vielfältigen fachlichen, wissenschaftlichen und rechtlichen Aspekte und Lernen voneinander braucht, bietet die Recy & DepoTech seit vielen Jahren.

Sie macht nicht nur bewusst, wie spannend und vielfältig die Abfallwirtschaft ist, sondern motiviert auch zu neuen Ansätzen und kreativen Ideen am Weg zur optimierten Ressourcennutzung.

Es bleibt dem Organisationsteam für sein großartiges Engagement herzlich zu danken und allen Teilnehmenden zu wünschen, dass die Recy & DepoTech heuer, wie geplant, wieder als Plattform für den direkten persönlichen Fachaustausch genutzt werden kann.



Vorwort

Geschäftsführer DI Dr. Daniel Resch

Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
(ÖWAV)

Auch nach der Veröffentlichung des EU-Kreislaufwirtschaftspakets im Jahr 2015 vertiefen die EU und die Mitgliedsstaaten den kreislaforientierten Gedanken. Der Green Deal der Europäischen Kommission sowie die Umsetzung in Österreich ist dabei einer der wesentlichen Taktgeber für die Wirtschaftsteilnehmer:innen und Bürger:innen, um einerseits bis 2050 klimaneutral zu sein und andererseits den Übergang zur Kreislaufwirtschaft zu beschleunigen. Auch die damit verbundenen Maßnahmen zur Erreichung der nachhaltigen Ziele der Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft auf nationaler Ebene sind von großem Interesse und der ÖWAV als neutrale und unabhängige Informations- und Netzwerkplattform nimmt sich dieser Themen an.

Eine wichtige und zentrale Funktion des Verbandes ist dabei die frühzeitige Information seiner Mitglieder über aktuelle Entwicklungen in der Branche und die Diskussion und Behandlung aktueller Fragestellungen des Umweltschutzes in der Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft im Rahmen seiner Gremien. Insbesondere versucht der ÖWAV seine Aufgabe als Informations- und Netzwerkplattform zum Interessensausgleich zwischen den Stakeholdern wahrzunehmen. In dieser Funktion ist der ÖWAV im Sinne der Ziele des Umweltschutzes ein wichtiger Partner des Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), der Bundesländer, Kommunen und Verbände aber auch der Universitäten, Planungsbüros und der Wirtschaft.

Mit seinen Aktivitäten deckt der ÖWAV ein ungewöhnlich breites Spektrum ab und möchte so einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Etablierung der Kreislaufwirtschaft leisten. Der ÖWAV wünscht der Recy & DepoTech viel Erfolg und freut sich auf eine spannende Veranstaltung.



Vorwort

Präsidentin Gabriele Jüly

VOEB – Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe

Unsere Abfall- und Ressourcenbranche hat sich in den letzten Jahrzehnten von der Entsorgungswirtschaft hin zur Ressourcenwirtschaft gewandelt. Wo früher der Fokus auf der reinen Beseitigung von Abfällen lag, erzeugen heute die Unternehmen der Ressourcenwirtschaft aus Abfällen wertvolle Sekundärrohstoffe, mit denen wiederum die Industrie beliefert wird. Damit leisten wir nicht nur einen wichtigen Beitrag im Dienste der Allgemeinheit – Ressourcenschonung führt zu mehr Umwelt- und Klimaschutz und erhöht dadurch die Lebensqualität der Bürger:innen, sondern tragen auch wesentlich zu einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft bei.

Im internationalen Vergleich ist Österreich Spitzenreiter bei der Sammlung und Verwertung von Abfällen und erreicht bereits heute die bis 2025 geltenden EU-Ziele beim Recycling von Papier, Metallen, Glas und Verpackungen. Nichtsdestotrotz stellen vor allem die geforderten Kunststoff-Recyclingziele des EU-Kreislaufwirtschaftspaketes auch die österreichische Ressourcenwirtschaft vor neue Herausforderungen, die nur gemeinsam durch eine kreislaufgeführte Wirtschaftsweise zu bewältigen sind.

Nicht nur der Übergang von einer linearen hin zu einer zirkulären Wirtschaft beschäftigt uns, sondern auch die Menschen, die diese Transformation erst ermöglichen. Seit ein paar Jahren werden die Hilferufe nach künftigem Fachpersonal seitens der Unternehmen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft immer lauter. Hier ist es wichtiger denn je, Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten anzubieten und zu fördern, um dem Fachkräftemangel frühzeitig entgegenzuwirken. Gemeinsam mit maßgeblichen Stakeholdern wurde mit dem Lehrberuf Entsorgungs- und Recyclingfachkraft bereits ein solcher Grundstein gelegt. Ebenso hat der VOEB mit seinem ins Leben gerufenen Circular Economy Traineeprogramm eine weitere Möglichkeit geschaffen, Menschen für die Abfall- und Ressourcenbranche zu begeistern. Über dies hinaus konnte mit der diesjährigen VOEB Umweltwoche, in der Mitgliedsunternehmen ihre Türen für Schulklassen öffneten, den Jugendlichen Kreislaufwirtschaft nähergebracht werden. Wichtig ist hierbei, die Bewusstseinsbildung bereits in frühen Jahren zu garantieren und zu fördern. Ein enger Schulterschluss aller Akteure ist dabei unabdingbar – nur so steht Österreich einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft nichts mehr im Wege, ohne die die Klimaziele nicht erreichbar sind.

A stylized, handwritten signature in dark ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end.



Vorwort

Geschäftsführer Bernhard Puttinger

Green Tech Cluster Styria GmbH

Die Welt hat sich gedreht. Die aktuellen Geschehnisse und die dadurch äußerst angespannte Rohstoffsituation zeigen einmal mehr, wie wichtig der Übergang zu einer kreislaforientierten Wirtschaft ist. Die Klimakrise und Rohstoffkrise müssen jetzt diese Transformation massiv beschleunigen.

280 Unternehmen und Forschungseinrichtungen im Green Tech Valley, dem Süden Österreichs gestalten mit Ihren innovativen Lösungen die Kreisläufe und den Klimaschutz der Zukunft. Sei es in den Bereichen der Sammellogistik, Sortier- und Aufbereitungstechnologien, Herstellung von Recycling-Rohstoffen für die Wirtschaft – sowohl im biologischen als auch im technischen Bereich.

Mehrere internationale Innovations- & Marktführer im Green Tech Valley nutzen dabei auch immer stärker die Chancen von Digitalisierung und künstlicher Intelligenz. Damit können Recycling-Rohstoffe in den Kreislauf zurückgeführt wird.

Eine tragende Säule bildet hier die Forschung. Aktuell arbeiten über alleine in der Steiermark und Kärnten über 2.300 Wissenschaftler:innen an den grünen Lösungen der Zukunft. Sämtliche COMET-Kompetenzzentren Österreichs im Bereich Energie und Umwelt sind hier gebündelt. Die Montanuniversität Leoben entwickelt sich immer mehr zur „Circular University Leoben“, CUL!

Die Recy & DepoTech versammelt die innovativen Forschungspartner:innen und führenden Technologieunternehmer:innen bei Österreichs größter Branchen-Konferenz. Dies ist durch die engagierte Arbeit des ganzen Teams rund um Roland Pomberger möglich.

Nutzen wir dieses Treffen, um gemeinsam neue Ideen zu schmieden. In dieser Krisensituation müssen wir dabei vor allem noch mehr die Transformationsgeschwindigkeit in den Fokus stellen, um auch in Zukunft eine Vorreiterrolle im Bereich der Umwelttechnik inne zu haben und der nächsten Generation eine lebenswerte Zukunft zu ermöglichen.

Viel Erfolg & Glück auf!

A stylized, handwritten signature in black ink, appearing to read 'de Puttinger'.



Editorial

Professor Roland Pomberger

Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
der Montanuniversität Leoben

Ein herzliches Leobener Glückauf zur Recy & DepoTech 2022!

Zum sechszehnten Mal trifft sich im November 2022 die abfallwirtschaftliche Community - endlich wieder persönlich - in Leoben. Die Recy & DepoTech ist einer der Fixpunkte im Reigen der wissenschaftlichen Konferenzen zu den Themen der Abfallwirtschaft.

Ein kurzer Rückblick:

Vor 2 Jahren war alles ANDERS. Das CORONA Virus hatte uns ALLE fest im Griff und es war unmöglich unsere Recy & DepoTech physisch abzuhalten. Wir passten uns an die Möglichkeiten an und hatten das BESTE daraus gemacht. Eine rein virtuelle Konferenz mit einer virtuellen Konferenzumgebung. Wie in einem Videospiel konnten sich die TeilnehmerInnen in der VIRTUELLEN Konferenzwelt bewegen. Die Recy & DepoTech 2020 war jedenfalls ALLES AUSSER GEWÖHNLICH.

Ausblick:

Dieses Mal endlich wieder in Präsenz. Natürlich ist die Bedrohung durch das Corona Virus noch nicht gebannt, aber mit Vorsicht, Rücksicht und auch Sicherheitsmaßnahmen sind wir überzeugt, dass wir die Konferenz abhalten können.

140 Vorträge und 75 Poster werden präsentiert. Firmen werden sich wieder an Messeständen präsentieren. Unser RE-USE-KAFFEEHAUS kann wieder physisch genutzt werden. Und wir wissen aus vielen Gesprächen: Der persönliche Kontakt und Austausch der TeilnehmerInnen wird nun wieder besonders geschätzt.

Zum Inhalt:

Es scheint so zu sein, dass alle 10 Jahre Umbrüche in der Abfallwirtschaft erfolgen. So sind wir bereits mitten in der Umsetzung von europäischen Rahmenbedingungen auf nationaler Ebene. Neue gesetzliche Vorgaben in der Kreislaufwirtschaft führen zu neuen Entwicklungen und geschäftlichen Chancen.

Diese an sich schon dynamische Situation wird nun durch Krisen weiter angefeuert. Politische Krisen, die zu Rohstoff und Energieverknappungen führen, beeinflussen zusätzlich die Abfallwirtschaft. Energie und Rohstoffe im Abfall entwickeln eine neue Attraktivität und führen zu neuen Projekten und Geschäftsmodellen.

Unser Programm:

Unsere vortragenden ExpertInnen decken das breite Feld der Abfalltechnik, der Abfallwirtschaft und der Kreislaufwirtschaft ab. Dabei setzen wir natürlich wieder Schwerpunkte einerseits bei stoffstrom-spezifischen Lösungen und andererseits bei technologischen Entwicklungen.

Der Bereich der Digitalisierung wird durch mehrere Sessions abgedeckt. Sensor-based Sorting & Control sowie Deep Learning Ansätze in der Sortiertechnik seien hier Beispiele.

Auf der Stoffstrom-Ebene beschäftigen sich spezielle Sessions mit dem Dauerthemen Kunststoffe und Batterien, aber auch mit speziellen industriellen Reststoffen.

Dem chemischen Recycling widmen sich nicht nur mehrere internationale Vorträge, wir werden dieses Thema auch im „Leobener Abfall-Disput“ kontroversiell diskutieren.

Auch in den Bereichen Deponietechnik und Altlastensanierung gibt es positive Entwicklungen und Fallbeispiele zu berichten.

Sie sehen eine Vielzahl von Themen, neuen Ansätzen und Methoden, Fallbeispielen und Lösungsansätzen werden auf dieser Recy & DepoTech vorgestellt.

Ihr Beitrag:

Die Recy & DepoTech wird von den aktiven KonferenzteilnehmerInnen gestaltet. Der Erfolg wird getragen von ProgrammgestalterInnen, ReferentInnen, Chairperson, DiskutantInnen und TeilnehmerInnen. Die wichtigsten Aktivitäten der Recy & DepoTech sind vortragen, zuhören, diskutieren, austauschen und vernetzen. Die Recy & DepoTech bietet dafür die Plattform und steht auch dieses Mal wieder für wertschätzenden Austausch auf hohem fachlichem Niveau.

Ich danke Ihnen für Ihre Teilnahme als ExpertIn aus Forschung, Wirtschaft und Verwaltung. Gerade jetzt und trotz CORONA. Ich wünsche Ihnen und uns eine erfolgreiche Recy & DepoTech 2022.

Mit herzlichem Glückauf!

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Rainer Pöchl', is written in a cursive style.

Ingenieurdienstleistungen für Umweltschutz mit Mehrwert

www.umweltkonsulenten.at



**Die
Umwelt
Konsulenten**



Zur Verbesserung der Abdichtung der Deponie Hettegger ersetzte man die bestehende Abdeckung durch einen alternativen nach DVO zugelassenen Aufbau. Bei einer Reduzierung der Schichtstärke von 2,40 m auf ca. 1,30 m wurde die rechnerische Durchlässigkeit von 1×10^{-9} m/s auf 7×10^{-11} verringert.



Böschungsabdeckung

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, Fax: +43 (0) 3842 / 402-5102
E-Mail: rdt@unileoben.ac.at

Roland Pomberger
Tanja Trieb

Redaktion

Tanja Trieb

Kooperationspartner

DETAIL Business Information GmbH (Recycling magazin)
Green Tech Cluster Styria GmbH
ia GmbH - Wissensmanagement und Ingenieurleistungen (ASK)
Kunststoff-Cluster
Lehrstuhl für Energieverbundtechnik der Montanuniversität Leoben
Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes der Montan-
universität Leoben
Montanuniversität Leoben
MSV Mediaservice & Verlag GmbH (EU-Recycling Magazin)
Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV)
Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH
Umwelttechnik-Cluster Oberösterreich
Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe (VOEB)
Verein zur Verleihung des Zertifikates eines Entsorgungsfachbetriebes (V.EFB)

Wissenschaftliches Komitee

A

Martina Ableidinger, ISWA Austria, Österreich
Helmut Antrekowitsch, Montanuniversität Leoben, Österreich
Manfred Assmann, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Österreich

B

Rupert Baumgartner, Karl-Franzens-Universität Graz, Österreich
Alberto Bezama, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung-UFZ, Deutschland
Anke Bockreis, Universität Innsbruck, Österreich

D

Christina Dornack, Technische Universität Dresden, Deutschland

E

Martin Eisenberger, Eisenberger & Offenbeck Rechtsanwälts GmbH, Österreich
Ertugrul Erdin, Dokuz Eylül University, Türkei

F

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

G

Stefan Gäth, Universität Giessen, Deutschland
Daniel Goldmann, IFAD TU Clausthal, Deutschland
Kathrin Greiff, RWTH Aachen University, Deutschland

H

Stefan Herzer, Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe, Österreich
Peter Hodecek, Scholz Austria GmbH, Österreich
Christian Holzer, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Österreich
Clemens Holzer, Montanuniversität Leoben, Österreich
Marion Huber-Humer, Universität für Bodenkultur Wien, Österreich

K

Thomas Kienberger, Montanuniversität Leoben, Österreich
Martin Kranert, Universität Stuttgart, Deutschland
Gernot Kreindl, Stadtgemeinde Leoben, Österreich
Daisy Kroker, Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe, 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, Uni Rostock sowie DBFZ Leipzig, Deutschland

P

Thomas Pretz, Ingenieurgesellschaft pbo, Deutschland

Q

Peter Quicker, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Deutschland

R

Arne Ragossnig, RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Österreich

Harald Raupenstrauch, Montanuniversität Leoben, Österreich

Helmut Rechberger, Technische Universität Wien, Österreich

Thomas Reichenauer, AIT Austrian Institute of Technology, Österreich

Karl Reiselhuber, Magistrat der Stadt Wien, Österreich

Gerhard Rettenberger, Hochschule Trier, Deutschland

Marco Ritzkowski, Technische Universität Hamburg-Harburg, Deutschland

Vera Susanne Rotter, Technische Universität Berlin, Deutschland

S

Christoph Scharff, Altstoff Recycling Austria AG, Österreich

Liselotte Schebek, Technische Universität Darmstadt, Deutschland

Helmut Stadler, International Solid Waste Association sowie Verein zur Verleihung des Zertifikates eines Entsorgungsfachbetriebes, Österreich

T

Stephanie Thiel, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Deutschland

U

Olga Ulanova, IRNTU, Russland

W

Ingrid Winter, Steiermärkische Landesregierung, Österreich

Klaus Wruss, ESW Consulting Wruss ZT GmbH, Österreich

Werner Wruss, ESW Consulting Wruss ZT GmbH, Österreich

Z

Michael Zorzi, BALSA Bundesaltlastensanierungsges.m.b.H., 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:

Dipl.-Ing. Manfred Assmann, wurde 1964 in Wien geboren und studierte "Kulturtechnik und Wasserwirtschaft" an der Universität für Bodenkultur. Nach einigen Stationen in der Entsorgungswirtschaft und beim VOEB wurde er Geschäftsführer des Verbandes der Beton- und Fertigteilwerke (VÖB). Seit 2002 ist er Geschäftsführer des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV) und der GWAU GmbH. In seiner langjährigen Funktion konnte er den ÖWAV als die führende fachliche Plattform für Wasserversorgung, Wasserentsorgung, Wasserkraft und Abfallwirtschaft entwickeln. Der ÖWAV ist der bedeutendste Anbieter von Kongressen, Seminaren und Weiterbildungen in der Abfallwirtschaft geworden. Nach 20 Jahren als erfolgreicher Geschäftsführer wird er Ende des Jahres den ÖWAV verlassen und neue Herausforderungen suchen. Viele weitere Funktionen in fachlichen Gremien und Interessensvertretungen wurden und werden von ihm kompetent abgedeckt wie z.B. Vorstandsfunktionen bei ISWA Austria, V.EFB und BOKU Absolventen und Alumni Verband. Die Recy & DepoTech und die Montanuniversität möchten sich mit dieser Ehrung für die immer wertschätzende und freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken.

Prof. Dr. Thomas Pretz, schied am 31. Januar 2020 offiziell aus seiner Position als Leiter des Institutes für Aufbereitung an der RWTH Aachen aus. In seinen 22 Jahren als Professor des I.A.R. hatte Prof. Pretz viele Aufgaben inne, er war Dekan der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik, Fachgruppensprecher der FRE, hat eine Vielzahl nationaler und internationaler Forschungs- und Dienstleistungsprojekte abgewickelt und war Sachverständiger und Gutachter zu abfalltechnischen und aufbereitungstechnischen Fragestellungen. Auch als Planer war und ist er erfolgreich tätig zuerst als Gründer von htp und heute als Gesellschafter der Ingenieurgesellschaft pbo. Er gilt als der Experte für Sensorgestützte Sortiertechnik und konnte dieses Fachgebiet durch Projekte, Planungen, Publikationen und Kongresse entscheidend entwickeln. Seit langer Zeit besteht eine fruchtbare Zusammenarbeit zwischen dem AVAW und dem I.A.R. in Form von gemeinsamen Projekten und Publikationen aber auch Austausch von Studenten.

Prof. Dr. Gerhard Rettenberger, ist DER Experte für Deponiegas und das Rettenberger-Tabassaran Modell zur Deponiegasprognose zählt noch immer zu einer Standardmethode in der Deponietechnik. Nach Stationen an der Universität Stuttgart und der Technischen Hochschule Eßlingen wurde er 1987 Ordinarius für Abfall- und Abwasserbehandlung an der Technischen Hochschule Trier. Es folgten viele nationale und internationale Lehraufträge. Er veröffentlichte über 500 Fachartikel und mehrere Fachbücher als Autor und Herausgeber. Seine Interessenschwerpunkte sind Deponietechnik, Deponiegas, Altdeponiesanierung, Landfill Mining, anaerobe Vergärung, Biogas, Anlagensicherheit und Explosionsschutz. Als Vizepräsident der DGAW und als Vorsitzender des wissenschaftlichen Beirates der Deutschen Privaten und Öffentlichen Entsorgungswirtschaft konnte er vielfache Beiträge zur Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft leisten. Seine unternehmerische Tätigkeit begann 1989 mit der Gründung der Ingenieurgruppe RUK GmbH. Noch immer ist er als Senior Consultant in Deutschland und in mehreren Ländern aktiv. Als Vortragender und Mitglied des wissenschaftlichen Beirates ist er seit vielen Jahren mit der Recy & DepoTech verbunden.

Ehrenschutz

Leonore GEWESSLER

Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Christopher DREXLER

Landeshauptmann der Steiermark

Johann SEITINGER

Landesrat für Land- und Forstwirtschaft, Wohnbau, Wasser- und Ressourcenmanagement

Christian HOLZER

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

Kurt WALLNER

Bürgermeister der Stadt Leoben

Wilfried EICHLSEDER

Rektor 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 Cluster Styria GmbH

Förderungen & Firmenpartnerschaften

Förderstellen

Amt der Steiermärkischen Landesregierung - Landesamtsdirektion - Referat Protokoll und Auszeichnungen

Amt der Steiermärkischen Landesregierung - Abteilung 14 - Referat Abfall- und Ressourcenvirtschaft

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
Stadtgemeinde Leoben

Gold-Firmenpartner

Altstoff Recycling Austria AG

Bernegger GmbH

GWU Geologie-Wasser-Umwelt GmbH

HUESKER Synthetic GmbH

M-U-T Maschinen-Umwelttechnik-Transportanlagen GmbH

RM Umweltkonsulenten ZT GmbH

voestalpine High Performance Metals GmbH und voestalpine BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG

Mittagsbuffet-Firmenpartner

KIAS Recycling GmbH

Silber-Firmenpartner

Geocycle

Greiner AG

KEYCYCLE GmbH

Norske Skog Bruck

Saubermacher Dienstleistungs AG

Zöchling Abfallwirtschaft GmbH

Bronze-Firmenpartner

ABEZ GmbH
BALSA Bundesaltlastensanierung GmbH
Brantner Österreich GmbH
ESW Consulting Wruss ZT GmbH
IUT Ingeniurgemeinschaft GmbH
Komptech GmbH
OMV Downstream GmbH
PORR Umwelttechnik GmbH
STADLER Anlagenbau GmbH
TYROLIT
w&p Zement GmbH *und* Wietersdorfer Alpacem GmbH
Zementwerk Hatschek GmbH

Messestände

ANDRITZ AG
Evonik Industries AG
Experts4Recycling GmbH
Keller Grundbau Ges.mmbH
Lhotzky + Partner Ingenieurgesellschaft mbH
Lindner-Recyclingtech GmbH
LINETECHNOLOGY GmbH
UTC Umwelttechnik Ziviltechniker GmbH
Vecoplan AG

(Stand 29. September 2022)

Kompetenz in ...



Geologie

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



Wasser

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



Umwelt

Abfall- und Aushubbeurteilung,
Schad- und Störstofferkundung,
Umwelttechnische
Bauüberwachung,
Verdachtsflächenerkundung,
Altlastensanierung,
Grundstücksbewertung,
Deponieplanung und -aufsicht,
Ausgangszustandsbericht gem.
Industrieemissionsrichtlinie,
Umweltverträglichkeitserklärung
(UVE), ...



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

Inhaltsverzeichnis Poster

Aufbereitungstechnische Rohgutcharakterisierung an Bergematerial einer Kaolinaufbereitung <i>V. Spieß, J. Theiss & H. Flachberger</i>	41
PFC-Verbindungen bei der Deponiesickerwasserbehandlung – Ergebnisse von Untersuchungen zur PFC-Elimination <i>M. Weissroth, L. Hauschel & F. Natau</i>	43
Erste Erfahrungen mit Methanoxidationsfenstern zur Stilllegung der aktiven Deponiegaserfassung <i>M. Hrad, V. Wechselberger & M. Huber-Humer</i>	51
InnoBLA II: Neues Konzept eines Planungswerkzeuge für die Beheizung von Böden mit elektrisch beheizten Wärmequellen <i>A. Schönberg, C. Spijker & H. Raupenstrauch</i>	55
InnoBLA III: Auswirkungen der thermischen Bodenbehandlung auf die Mobilität von Schwermetallen und die Korrosion von Heizlanzen <i>D. Vollprecht, J. Kern, I. Berrer, J. Riedl, G. Mori & T. Sattler</i>	63
Bestandsnutzung und Brachflächenrecycling vs. Grüne Wiese - Vorteile und Risikominimierungsoptionen <i>C. Kienreich, D. Vorraber, A. Ragossnig & J. Maier</i>	67
In-situ Bodenwäsche mit Pflanzenöl/Wasser-Emulsionen zur Kohlenwasserstoff-Entfrachtung <i>M. Lackner, K. Putz, M. Plank & A. Loibner</i>	73
Thermische Behandlung und Konditionierung von Hüttenreststoffen zur stofflichen Verwertung <i>K. Doschek-Held, A. Krammer, F.R. Steindl, P. Eisner & D. Wohlmuth</i>	79
Alternative Bettmaterialien für Wirbelschichtöfen mit Potenzial zur Wiederverwendung als Zementzuschlagstoff <i>P. Dörfler, U. Eggenberger & M. Wolffers</i>	85
Untersuchungen zum thermochemischen Recycling teerhaltigen Straßenaufbruchs <i>J. Hee & P. Quicker</i>	89
Ausgangszustandsberichte für IPPC-Anlagen – Erfahrungen aus der Praxis <i>R. Hummel, K. Amort & A.M. Ragoßnig</i>	95
Sensorbasierte Sortierung mineralischer Abfälle und Rohstoffe <i>S. Müller, A. Müller & S. Liebezeit</i>	101
Smartes Recycling mit dem digitalen Produktpass – Welche Informationen braucht es und welche Herausforderungen gilt es zu meistern in der Abfallbehandlung von Elektro- und Elektronikgeräten? <i>E. Wagner, E. Poppe, M. Malzacher, D. Baumgärtel, I. Budde & M. Jaeger-Erben</i>	105

FAQs zum Re-Use von Gebäudekomponenten <i>M. Meissner, T. Romm, I. Schanda & R. Borszki</i>	111
Re-Use Aktivitäten des Landes Steiermark als Motor für die Kreislaufwirtschaft <i>U. Kabosch, U. Gungl & I. Winter</i>	115
The AHOY-Project: Waste Wood Sorting with X-ray Technology <i>R. Wagner, C. Bauer & J. Leisner</i>	121
Closed-loop recycling of packaging waste at the food manufacturer Freiberger <i>K. Plevová, M. Feuchter, M. Wellacher, A. Jamnik, N. Wild, H. Pichorner & K. Resch-Fauster</i>	127
Der Einsatz digitaler Werkzeuge zur Vermeidung von Lebensmittel-abfällen - ein Umweltvergleich <i>S. Scherhauser, S. Gollnow, M. Eriksson, D. Orth, K. Abeliotis & G. Obersteiner</i>	133
Ist die europäische Abfallwirtschaft bereit für Biokunststoffabfälle? <i>N. Mhaddolkar & A. Tischberger-Aldrian</i>	139
Lebensmitteldrehscheibe: Weitergabe von Speisen aus der Außer-Haus-Verpflegung an soziale Einrichtungen <i>C. Pladerer & D. Orth</i>	143
Papier oder Bioplastik? Gegenüberstellung zweier Vorsammelhilfen für biogene Abfälle <i>P.P.J. Demschar & J. Adam</i>	147
Wieviel Recycling steckt in einer Tonne Zement? <i>M.J. Enengel, S.A. Viczek & R. Sarc</i>	151
Entwicklung einer Bewertungsmethode zur eindeutigen Validierung der Maschinenleistung <i>T. Lasch, K. Khodier, C. Feyerer, C. Ragginger & R. Sarc</i>	157
Fundamental drying experiments with processed residual municipal solid waste materials <i>J. Faitli, Z.N. Abdulfattah & N. Yanar</i>	161
Bio Paper Recycling (BiPaRe) Project: Strategic development tool for a recycling-friendly design of bio-based paper coatings <i>V. Wortmann, L. Hamann, A. Eisenschmidt, S. Genest, M. Jesdinszki, K. Noller & K. Bauer</i>	167
Recyclingfähigkeit von Verpackungen: Ziele, Bewertung & Grenzen <i>T. Pitschke & W. Rommel</i>	173
Green Deal im Wackersdorfer Revier – wie vor 40 Jahren der Kohleausstieg gelang <i>M. Mocker, W.P. Bauer & T. Knoll</i>	177
Zusammensetzung getrennt gesammelter Leichtverpackungen in städtischen Gebieten – Vergleich Bring- und Holsystem <i>M. Merstallinger, L. Gritsch, J. Lederer, T. Jesacher, D. Schuch, I. Binder, V. Kloud, M. Ottersböck & U. Volk</i>	183
Refine the Circular Economy By Rethinking It - A Holistic Approach For The Advanced Circular Economy <i>M. Nippraschk, P. Wallat, S. Lawrenz, D. Goldmann, C. Minke & A.Lohrengel</i>	187

Durch Konsument:innen beeinflusste Qualitäten von Mehrkomponenten-Leichtverpackungen im Siedlungsabfall <i>L. Gritsch, M. Merstallinger, D. Schuch & J. Lederer</i>	193
Ressourcenschutz durch Abfallvermeidung, Wiederverwendung und stoffliche Verwertung <i>H.-J. Dornbusch</i>	199
A novel approach to environmental cleanup of inland water courses <i>N. Rubini, S. Carniello & C. Di Noi</i>	203
Vergleich und Bewertung unterschiedlicher Probenahme-Methoden zur Untersuchung von Mikroplastik in Flüssen <i>G. Obersteiner, S. Lenz & J. Mayerhofer</i>	209
Das Unverpackt-Regal und die Sicht der Kund*innen auf die Vermeidung von Verpackungen im Supermarkt <i>U. Gelbmann, J. Edlinger & Ch. Holzer</i>	211
Ressourceneffizienz der Rückgewinnung von Indium mittels chlorhaltiger Abfälle auf der "Chlor-Plattform" <i>M. Peer, M. Bär, B. Berninger, M. Mocker & W. Kunz</i>	217
Rechtliche Umsetzung der Abfallhierarchie <i>T. Katalan & M.S. Reitinger</i>	221
Kreislaufschließung von Polyolefin-Verpackungen <i>N. Krempf & T. Lucyshyn</i>	225
Charakterisierungen von wertstoffhaltigen Materialströmen aus einer Abfallsortieranlage in Österreich <i>A.-M. Lipp, D. Blasenbauer & J. Lederer</i>	227
Bestimmung von Mikroplastik in der Donau <i>S. Lenz, J. Mayerhofer & G. Obersteiner</i>	231
On the road to 2050: The path to achieving a circular economy for mobility and renewable energy <i>M.T. Kügerl, J. Betz & S. Degreif</i>	233
Experimental Methods to Assess the Thermal Stability of Reactive Chemical Waste stored in Large Waste Tanks <i>R. Obermüller, G. Schoppel & M. Prochaska</i>	239
Mögliches Verfahrenskonzept und Versuch einer Kostenabschätzung zur mechanischen Auftrennung von Photovoltaikmodulverbunden <i>H.M. Menapace, B. Schmuck, G. Schneeberger, A. Brugger & P. Seppel</i>	245
Stop Littering - Situationsanalyse der Litteringabfälle im Fördergebiet INTERREG V-A Österreich-Tschechische Republik und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Reduzierung von Litteringabfällen als wichtiger Beitrag zur Kreislaufwirtschaft <i>P. Hietler & C. Pladerer</i>	251
Konzepte zur Kreislaufwirtschaft in Europäischen Städten <i>M. Samhaber & W. Hauer</i>	257

Von der linearen Abfallwirtschaft zur Circular Economy in Brasilien <i>C. Buchenberger, K. Schmidt & T.S. Spengler</i>	261
Roadmap zur CO ₂ -Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050 <i>C. Bauer, C. Dankl, R. Friedle, F. Papsch & S. Spaun</i>	267
Performance of European biogas plants towards methane emissions <i>V. Wechselberger, R. Ottner, M. Hrad & M. Huber-Humer</i>	273
Mechanical short-term and long-term properties of PP recycle blends <i>J. Hinczica, J. Geier, U. Kirschnick, C. Holzer, A. Frank & G. Pinter</i>	275
Zn Entfernung aus metallurgischen Stäuben mit schwefeloxidierenden Bakterien <i>S. Thallner, A. Sasiain Conde, S.A. Haneschläger, L. Birklbauer, S. Spiess & M. Haberbauer</i>	277
Estimation of Recycling Potential of Multilayer Films in Austria <i>B. Rutrecht & G. Koinig</i>	281
Bewertung der Recyclingfähigkeit von Elektroaltgeräten: Ein praxisbezogenes Modell <i>E. Kodon, T. Mayer & T. Nigl</i>	287
Unfälle und Brände mit Elektrofahrzeugen – Versuch einer statistischen Betrachtung <i>T. Nigl & M. Altendorfer</i>	293
Analysis of different polypropylene waste bales – evaluation of the source material for polypropylene recycling <i>J. Geier, M. Bredács, A. Witschnigg, D. Vollprecht & G. Oreski</i>	297
Neue VDI Richtlinie 4095 stellt den Stand der Technik beim Kunststoffrecycling dar <i>R. Brüning, J. Wolf & R. Maletz</i>	301
Erfolgsnachweis einer Jet-Grouting Sanierung über Konzentrationsmessungen <i>P. Freitag, K. Kljajic & T.G. Reichenauer</i>	305
Bestimmung des elementaren Kohlenstoffs in Feststoffproben zur Beurteilung laut Deponieverordnung – ein Lösungsvorschlag <i>O. Mann, S. Coskuner, T. Klinger, F. Maringer, L. Sappl, M. Sappl, M. Gazetovici, K. Wruss, W. Wruss & G. Sigmund</i>	307
Ölbindende Vliese zur Entfernung von Mineral- und Pflanzenöl aus Wasser <i>M. Lackner, K. Putz, M. Plank & A. Loibner</i>	313
Recycling potential of recycled carbon fibers used in textile concrete from a technical and environmental point of view <i>B. Bayram, V. Overhage, K. Raulf, K. Greiff & T. Gries</i>	317
Quantitative Brandrisikobeurteilung von Abfallschüttungen anhand eines modellbasierten Tools <i>M. Hohenberger, M. Grimm & R. Raupenstrauch</i>	323
Metrology for the recycling of Technology Critical Elements to support Europe's circular economy <i>S.T. Lancaster, A. Walch, M. Eberhard, A. Rachetti, T. Prohaska & J. Irrgeher</i>	329

Aufbereitung von Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung zu biogenem Restbrennstoff <i>V. Scheff, G. Dürl & D. Laner</i>	331
Integration of regional socio-economic LCA and environmental LCA for the assessment of industrial bioeconomy networks <i>A. Bezama, W. Zeug, J. Hildebrandt & D. Thrän</i>	335
Lebensmittelabfallaufkommen österreichischer Haushalte <i>G. Obersteiner, S. Luck, L. Ortega Menjivar, M. Pamperl & E. Schmied</i>	341
Comparative analysis of the industrial dust efficiency use as a filler in building composite materials <i>E.V. Zelinskaia, O.V. Ulanova, V.V.Barakhtenko & A.E. Burdonov</i>	343
Deep Learning basiertes Sortieren von Aluminiumschrott auf Grundlage von Röntgen- transmissionsdaten <i>S. Rüger, J. Goschenhofer, A. Nath, M. Firsching, A. Ennen & B. Bischl</i>	349
Destillation als Recyclingmethode für metallische Rohstoffe <i>D. Böhm, D. Weißbach, S. Gottlieb, G. Ruprecht, A. Huke & K. Czerski</i>	355
Sorting Based on Bits – The Technical Background of Digital Markers in the Context of High-Quality Recyclate Generation <i>N. Kuhn</i>	361
AVV-Novelle: Evaluierung der Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen und Ersatz- brennstoffprodukten <i>A. Tischberger-Aldrian & R. Sarc</i>	365
Herstellung von leichten Gesteinskörnungen aus gipshaltigem Mauerwerkbruch im Pilotmaßstab <i>A. Müller & S. Liebezeit</i>	371

Recycling für
PIONIERE.



Bernegger

WIR BEWEGEN NACHHALTIG.

TBS

TECHNISCHE BEHANDLUNGSSYSTEME GMBH

Index English abstracts of posters

Characterization of historic tailings from kaolin production <i>V. Spieß, J. Theiss & H. Flachberger</i>	379
PFC-Compounds in landfill leachate treatment – Results of research on PFC-Elimination <i>M. Weissroth, L. Hauschel & F. Natau</i>	380
First experiences with biowindows after removal of the active gas extraction system <i>M. Hrad, V. Wechselberger & M. Huber-Humer</i>	381
InnoBLA II: New design of a planning tool for heating soils using electrically heated heat sources <i>A. Schönberg, C. Spijker & H. Raupenstrauch</i>	382
InnoBLA III: Effects of thermal soil treatment on heavy metal mobility and corrosion of heating wells <i>D. Vollprecht, J. Kern, I. Berrer, J. Riedl, G. Mori & T. Sattler</i>	383
Use of existing areas and brownfield recycling vs. greenfield property development – benefits and risk minimisation <i>C. Kienreich, D. Vorraber, A. Ragossnig & J. Maier</i>	384
In-situ soil washing with vegetable oil/water emulsions to remove hydrocarbons <i>M. Lackner, K. Putz, M. Plank & A. Loibner</i>	385
Thermal treatment and modification of metallurgical residues for recycling <i>K. Doschek-Held, A. Krammer, F.R. Steindl, P. Eisner & D. Wohlmuth</i>	386
Alternative bed material testing for fluidised bed incineration with reuse potential as cement additive <i>P. Dörfler, U. Eggenberger & M. Wolffers</i>	387
Investigations of the thermochemical recycling of tar-containing road debris <i>J. Hee & P. Quicker</i>	388
Baseline report for IPPC-installations – Experiences from practice <i>R. Hummel, K. Amort & A.M. Ragoßnig</i>	389
Sensor-based sorting of mineral waste and raw materials <i>S. Müller, A. Müller & S. Liebezeit</i>	390
Increasing supply chain transparency and product circularity by the digital product passport - current challenges, necessary information and interfaces within recycling <i>E. Wagner, E. Poppe, M. Jaeger-Erben, C. Kitazume & T. Ebert</i>	391
FAQs: re-use of building components <i>M. Meissner, T. Romm, I. Schanda & R. Borszki</i>	392
Re-Use Aktivitäten des Landes Steiermark als Motor für die Kreislaufwirtschaft <i>U. Kabosch, U. Gungl & I. Winter</i>	393

The AHOY-Project: Waste Wood Recycling with X-ray Technology <i>C. Bauer, R. Wagner & J. Leisner</i>	394
Closed-loop recycling of packaging waste at the food manufacturer Freiburger <i>K. Plevová, M. Feuchter, M. Wellacher, A. Jamnik, N. Wild, H. Pichorner & K. Resch-Fauster</i>	395
The use of digital tools for food waste prevention – an environmental comparison <i>S. Scherhauser, S. Gollnow, M. Eriksson, D. Orth, K. Abeliotis & G. Obersteiner</i>	396
Is the European waste management industry ready for bioplastic waste? <i>N. Mhaddolkar & A. Tischberger-Aldrian</i>	397
Social Food Transfer from Caterings and other Kinds of Provisioning <i>C. Pladerer & D. Orth</i>	398
Paper or Plastics? Comparison of two pre-collection systems for biogenic waste <i>P.P.J. Demschar & J. Adam</i>	399
How much recycling is in one ton of cement? <i>M.J. Enengel, S.A. Viczek & R. Sarc</i>	400
Development of a method for the unambiguous validation of machine performance <i>T. Lasch, K. Khodier, C. Feyerer, C. Ragginger & R. Sarc</i>	401
Fundamental drying experiments with processed residual municipal solid waste materials <i>J. Faitli, Z.N. Abdulfattah & N. Yanar</i>	402
Bio Paper Recycling (BiPaRe) Project: Strategic development tool for a recycling-friendly design of bio-based paper coatings <i>V. Wortmann, L. Hamann, A. Eisenschmidt, S. Genest, M. Jesdinszki, K. Noller & K. Bauer</i>	403
Packaging recyclability: Goals, Assessment & Limits <i>T. Pitschke & W. Rommel</i>	404
Green Deal in the Wackersdorf coalfield – how the coal phase-out succeeded 40 years ago <i>M. Mocker, W.P. Bauer & T. Knoll</i>	405
Composition of separately collected lightweight packaging in densely populated urban areas – comparison of door-to-door collection and collection points <i>M. Merstallinger, L. Gritsch, J. Lederer, T. Jesacher, D. Schuch, I. Binder, V. Kloud, M. Ottersböck & U. Volk</i>	406
Refine the Circular Economy By Rethinking It - A Holistic Approach For The Advanced Circular Economy <i>M. Nippraschk, P. Wallat, S. Lawrenz, D. Goldmann, C. Minke & A.Lohrengel</i>	407
Consumer influenced qualities of multi-component lightweight packagings in municipal solid waste <i>L. Gritsch, M. Merstallinger, D. Schuch & J. Lederer</i>	408
Resource conservation through waste avoidance, reuse and material recycling <i>H.-J. Dornbusch</i>	409

A novel approach to environmental cleanup of inland water courses <i>N. Rubini, S. Carniello & C. Di Noi</i>	410
Comparison and evaluation of different sampling methods for the investigation of micro-plastics in rivers <i>G. Obersteiner, S. Lenz & J. Mayerhofer</i>	411
The Loose Product Shelf and the Customers' View of Avoiding Packaging Waste in Supermarkets <i>U. Gelbmann, J. Edlingerl & Ch. Holzer</i>	412
Resource efficiency of the recovery of indium with chlorine-containing waste on the project "chlorine platform" <i>M. Peer, M. Bär, B. Berninger, M. Mocker & W. Kunz</i>	413
Legal implementation of the waste hierarchy <i>T. Katalan & M.S. Reitingner</i>	414
Pack2theLoop – Closing the circle of polyolefin and polystyrene packaging <i>N. Krempel & T. Lucyshyn</i>	415
Characterisations of Material Streams Containing Valuables from a Waste Sorting Plant in Austria <i>A.-M. Lipp, D. Blasenbauer & J. Lederer</i>	416
Determination of microplastics in the Danube River <i>S. Lenz, J. Mayerhofer & G. Obersteiner</i>	417
On the road to 2050: The path to achieving a circular economy for mobility and renewable energy <i>M.T. Kügerl, J. Betz & S. Degreif</i>	418
Experimental Methods to Assess the Thermal Stability of Reactive Chemical Waste stored in Large Waste Tanks <i>R. Obermüller, G. Schoppel & M. Prochaska</i>	419
Treatment concept and cost estimation for the mechanical separation of photovoltaic modules <i>H.M. Menapace, B. Schmuck, G. Schneeberger, A. Brugger & P. Seppeler</i>	420
Stop Littering - Situation analysis of littering waste in the INTERREG V-A Austria-Czech Republic assisted area and development of recommendations for action to reduce littering waste as an important contribution to circular economy <i>P. Hietler & C. Pladerer</i>	421
Circular Economy Concepts in European Cities <i>M. Samhaber & W. Hauer</i>	422
From Linear Waste Management to the Circular Economy in Brazil <i>C. Buchenberger, K. Schmidt & T.S. Spengler</i>	423
Reaching CO2 neutrality in the Austrian cement industry by 2050 <i>C. Bauer, C. Dankl, R. Friedle, F. Papsch & S. Spaun</i>	424
Performance of European biogas plants towards methane emissions <i>V. Wechselberger, R. Ottner, M. Hrad & M. Huber-Humer</i>	425

The mechanical short-term and long-term properties of PP recycle blends <i>J. Hinczica, J. Geier, U. Kirschnick, C. Holzer, A. Frank & G. Pinter</i>	426
Zn Removal from Metallurgical Dusts with sulfur-oxidizing Bacteria <i>S. Thallner, A. Sasiain Conde, S.A. Haneschläger, L. Birklbauer, S. Spiess & M. Haberbauer</i>	427
Estimation of Recycling Potential of Multilayer Films in Austria <i>B. Rutrecht & G. Koinig</i>	428
Assessment of the recyclability of WEEE: A practice related Model <i>E. Kodon, T. Mayer & T. Nigl</i>	429
Accidents and Fires with Electric Vehicles - A Statistical <i>T. Nigl & M. Altendorfer</i>	430
Analysis of different polypropylene waste bales – evaluation of the source material for polypropylene recycling <i>J. Geier, M. Bredács, A. Witschnigg, D. Vollprecht & G. Oreski</i>	431
The new VDI Standard No. 4095 represents state-of-the-art in plastic recycling technology <i>R. Brüning, J. Wolf & R. Maletz</i>	432
Concentration measurements for quality assurance of jet grouting remediations <i>P. Freitag, K. Kljajic & T.G. Reichenauer</i>	433
Determination of elemental carbon in solid samples for assessment according to the Landfill Directive - a proposed solution <i>O. Mann, S. Coskuner, T. Klinger, F. Maringer, L. Sappl, M. Sappl, M. Gazetovici, K. Wruss, W. Wruss & G. Sigmund</i>	434
Oil-binding non-wovens for removing mineral and vegetable oil from water <i>M. Lackner, K. Putz, M. Plank & A. Loibner</i>	435
Recycling potential of recycled carbon fibers used in textile concrete from a technical and environmental point of view <i>B. Bayram, V. Overhage, K. Raulf, K. Greiff & T. Gries</i>	436
Model-based Tool for the Quantitative Risk Assessment of Waste Storage Fires <i>M. Hohenberger, M. Grimm & R. Raupenstrauch</i>	437
Metrology for the recycling of Technology Critical Elements to support Europe's circular economy <i>S.T. Lancaster, A. Walch, M. Eberhard, A. Rachetti, T. Prohaska & J. Irrgeher</i>	438
Processing of compost oversize fraction from biowaste treatment into residual biofuels <i>V. Scheff, G. Dürfl & D. Laner</i>	439
Integration of regional socio-economic LCA and environmental LCA for the assessment of industrial bioeconomy networks <i>A. Bezama, W. Zeug, J. Hildebrandt & D. Thrän</i>	440
Food waste generated by Austrian households <i>G. Obersteiner, S. Luck, L. Ortega Menjivar, M. Pamperl & E. Schmied</i>	441

Comparative analysis of the use of dust in composites efficiency use as a filler in building composite materials <i>E.V. Zelinskaia, O.V. Ulanova, V.V.Barakhtenko & A.E. Burdonov</i>	442
Aluminum Scrap Sorting Based on Dual Energy X-Ray Images Using Deep Learning Methods <i>S. Rüger, J. Goschenhofer, A. Nath, M. Firsching, A. Ennen & B. Bischl</i>	443
Distillation as a recycling method for metallic raw materials <i>D. Böhm, D. Weißbach, S. Gottlieb, G. Ruprecht, A. Huke & K. Czerski</i>	444
Sorting Based on Bits – The Technical Background of Digital Markers in the Context of High-Quality Recyclate Generation <i>N. Kuhn</i>	445
Amendment of the AVV: Evaluation of the quality assurance of refuse derived fuels and refuse derived fuel products <i>A. Tischberger-Aldrian & R. Sarc</i>	446
Pilot-scale production of lightweight aggregates from gypsum-containing masonry rubble <i>A. Müller & S. Liebezeit</i>	447

WIR WOLLEN DEINE ~~VERPACKUNGEN~~ ZURÜCK. ROHSTOFFE



**WIR ALLE SIND TEIL DES KREISLAUFS.
DANKE FÜR DEINEN BEITRAG.**



Poster

Aufbereitungstechnische Rohgutcharakterisierung an Bergematerial einer Kaolinaufbereitung

V. Spieß¹, J. Theiss² & H. Flachberger¹

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Leoben, Österreich

²⁾ KAMIG Österreichische Kaolin- und Montanindustrie Aktiengesellschaft Nfg. KG., Aisthofen, Österreich

KURZFASSUNG: Um die in Form von Schlickerteichen und Bergehalden zwischengelagerten Aufbereitungsabgänge einer Kaolinaufbereitung als Rohstoffquelle zu nutzen, arbeiten der Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung mit der Firma KAMIG KG an der Verfahrensentwicklung, um aus diesem Bergematerial innovative Mineralprodukte zu erzeugen. An einer Probe aus den Bergehalden am Standort Kriechbaum wurde eine aufbereitungstechnische Rohgutcharakterisierung nach dem Schema der Merkmalsklassenanalyse (Dichte und magnetische Suszeptibilität) durchgeführt. Die so definierten Merkmalsklassen wurden mittels REM-basierter Methoden hinsichtlich des Mineralbestands und Aufschlussgrades evaluiert. Die anteilmäßig dominierenden Leichtgutfraktionen bestehen aus Quarz, Kalifeldspat und vereinzelt Kaolinitagglomeraten sowie organischen Verunreinigungen wie Wurzeln, die durch den pflanzlichen Bewuchs der Bergehalden bedingt sind. Die Quarzinhalte sind weitestgehend aufgeschlossen und inklusionsfrei und in ihrer mineralspezifischen Korngrößenverteilung deutlich gröber als jene der Schwermineralfraktion.

1 EINLEITUNG

Im Rahmen der seit mehr als 200 Jahren dokumentierten Bergbautätigkeit an der Kaolinlagerstätte Kriechbaum im Bezirk Perg in Oberösterreich fielen erhebliche Mengen an Aufbereitungsabgängen an, die in Form von Schlickerteichen und Bergehalden zwischengelagert wurden. Die Unternehmensleitung der KAMIG Österreichische Kaolin- und Montanindustrie Aktiengesellschaft Nfg. KG (nachfolgend als KAMIG abgekürzt) setzte sich das Ziel, diese Rohstoffquelle sekundären Ursprungs nutzbar zu machen. Dem Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung wurde dabei die Aufgabe übertragen, ein Aufbereitungsverfahren zu entwickeln, welches KAMIG in die Lage versetzen soll, sowohl die unterschiedlich zusammengesetzten Rohgüter dieser anthropogenen Lagerstätten als auch den Rohkaolin der bestehenden Lagerstätte Kriechbaum aufzubereiten und – ganz im Sinne des Zero-Waste-Gedankens – möglichst alle enthaltenen Mineralphasen zu hochwertigen Mineralprodukten zu verarbeiten (Spieß et al. 2020).

Mineralogisch bestehen diese Aufbereitungsabgänge aus den Mineralphasen Quarz ($52 \pm 16 \%$), Kalifeldspat ($24 \pm 7 \%$) und Kaolinit ($15 \pm 6\%$), welche in ihrer Verteilung in den unterschiedlichen Lagerstättensegmenten stark schwanken. In geringerem Ausmaß sind Hellglimmer ($5 \pm 2 \%$) sowie akzessorisch Schwerminerale und Biotit vorhanden (Gasser 2019).

2 METHODIK

Der erste Schritt der Verfahrensentwicklung besteht aus einer systematischen aufbereitungstechnischen Charakterisierung der unterschiedlichen Rohgutarten. Hierbei wurde neben der Erhebung des vorliegenden Element- und Mineralphasenbestands mittels RFA bzw. RDA und Rietveld eine Charakterisierung hinsichtlich der trenntechnisch relevanten Eigenschaften nach dem Prinzip der Merkmalsklassenanalyse durchgeführt (siehe Abbildung 1).



Abb. 1: Schematische Vorgehensweise der Untersuchungen. KGV = Korngrößenverteilung

Konkret wurde Rohgut einer Drillbohrprobe (DB-S) aus den Bergehalden verjüngt und eine Teilprobe zunächst nass gesiebt. Derart erstellte Korngrößenklassen wurden nachfolgend einer Dichtefraktionierung mittels Schwimm-/Sink-Analyse unterzogen, wobei eine Leichtfraktion $< 2,72 \text{ g/cm}^3$, eine Mittelfraktion in der Dichteklasse $2,92/2,72 \text{ g/cm}^3$ sowie eine Schwermineralfraktion $> 2,92 \text{ g/cm}^3$ erzeugt wurden. Diese Dichteklassen $> 2,72 \text{ g/cm}^3$ wurden anschließend an einem Isodynamik-Magnetscheider der Bauart FRANTZ hinsichtlich der magnetischen Suszeptibilität analysiert. Die somit definierten Merkmalsklassen wurden in Form von kohlenstoffbedampften Anschliffpräparaten mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie am Rasterelektronenmikroskop hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrer Verwachsungsverhältnisse untersucht.

3 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

- Die anteilsmäßig dominierende Leichtgutfraktion besteht mineralogisch aus Quarz-, Kalifeldspatkörnern sowie Kaolinit-Agglomeraten und Organik. Diese Mineralphasen sind bereits weitestgehend aufgeschlossen vorliegend und die Quarzkörner weitestgehend frei von Inklusionen.
- Die Schwermineralfraktion besteht aus stark paramagnetischem Ilmenit sowie untergeordnet schwach- bis nichtmagnetischem Rutil, Zirkon und Monazit.
- Schwächer paramagnetische Mineralphasen liegen großteils in den Merkmalsklassen mittlerer Dichte ($2,92/2,72 \text{ g/cm}^3$) vor.

4 IMPLIKATIONEN AUF DIE VERFAHRESENTWICKLUNG

Die derart im Labormaßstab mineralspezifisch quantifizierten Merkmalsverteilungen definieren die einzustellenden Trennschnitte für nachfolgende Versuchstätigkeiten. Beispielsweise lässt eine solche Mineralvergesellschaftung im Bereich $> 63 \mu\text{m}$ eine Prozessführung mittels einer Kombination von Läuterung durch Attrition und Entschlammung sowie mehrstufiger Magnetscheidung, gefolgt von kationenaktiver Glimmer- und Feldspat-Flotation zur Erzeugung dieser Konzentrate sinnvoll erscheinen. Die so erzeugten Konzentrate besitzen aufgrund ihrer Reinheit und geringen Eisen- und Titangehalte großes Potential für hochwertige Mineralprodukte.

Während alle vorhandenen, stärker magnetischen Minerale Schwerminerale sind, sind nicht alle vorhandenen Schwerminerale magnetisch. Daher können im Mittel nur maximal 88% der Schwermineralkörner mittels Magnetscheidung bei moderaten Flusssichten abgetrennt werden. Eine Kombination aus Dichtesortierung mit anschließender Magnetscheidung erscheint demnach geeignet, ein magnetisches, an Ilmenit reiches Schwermineralprodukt bzw. ein an Zirkon und Monazit reiches unmagnetisches Produkt zu erzeugen.

5 DANKSAGUNG

Das Projekt „Erarbeitung neuer Verfahren zur Erzeugung innovativer Mineralprodukte aus aufbereitungsschwierigen Lagerstätten“ der KAMIG mit dem Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung der Montanuniversität Leoben mit der Projektnummer 877017 wird von der Österreichischen Forschungsfördergesellschaft mbH (FFG) im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) gefördert.

LITERATUR

- Gasser, W. (2019). Aufbereitungstechnische Untersuchungen an diversen kaolinhaltigen Rohgutproben primären und sekundären Ursprungs. Leoben.
- Spieß, V., Theiss, J., Flachberger, H. (2020). Erarbeitung eines neuen Verfahrenskonzeptes zur Erzeugung innovativer Mineralprodukte aus sekundären Rohstoffquellen. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte.

PFC-Verbindungen bei der Deponiesickerwasserbehandlung – Ergebnisse von Untersuchungen zur PFC-Elimination

M. Weissroth¹, L. Hauschel¹ & F. Natau¹

¹⁾ WEHRLE-WERK AG, Environmental Technology, Emmendingen, Germany

KURZFASSUNG: Der Verbleib von Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) bei der Deponiesickerwasseraufbereitung wurde in zwei Studien untersucht. Die erste Untersuchung war eine Vor-Ort-Pilotierung auf einer deutschen Deponie, und wurde über drei Monate mit einem Membranbioreaktor (MBR) und einer anschließenden Nanofiltration und Aktivkohlestufe durchgeführt. Der zweite Versuch war eine Laboruntersuchung, die mit einem Sickerwasser aus Australien mit Einsatz eines Labor-MBR für einen Zeitraum von 9 Wochen durchgeführt wurde. Das Permeat der Ultrafiltration wurde anschließend noch mit Membranen für Nanofiltration (NF) bzw. Umkehrosmose (UO) behandelt.

Die Sickerwasserbehandlung bezüglich des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) und Stickstoff durch den MBR war sehr gut, wobei die Nitrifikationsrate bei 99 % und die Denitrifikationsrate bei 90 % lag. Die PFAS-Konzentrationen in den Sickerwässern waren mit 21,8 µg/L und 24 µg/L relativ hoch. In dieser Studie wurde keine Verringerung der PFAS durch den MBR festgestellt, weder durch biologischen Abbau noch durch Adsorption an der Biomasse. Die UO zeigte eine hervorragende Eliminationsleistung und hielt bereits in der ersten Stufe 100 % der PFAS zurück. Die Leistung der NF hing hauptsächlich von der Art der NF-Membran ab und lag zwischen 25 % und 99 %. Frische granulierten Aktivkohle (GAK) war in der Lage 100 % der PFAS zu entfernen, doch bei steigenden Kohlebeladungen nahmen die PFAS-Entfernungsraten signifikant ab, und waren mit der Zeit bis auf 10 % abgesunken. Die maximale Beladungskapazität von GAK für PFAS, die in dieser Studie gefunden wurde, war 2.000 µg PFAS/kg GAK. Diese Studie zeigt, dass die verschiedenen Aufbereitungsverfahren unterschiedliche Auswirkungen auf PFAS haben, und sorgfältig kombiniert werden müssen.

Trotz der Tatsache, dass der MBR selbst keine PFAS entfernt hat, ist er immer noch ein wesentlicher Bestandteil des gesamten Prozesses, da die hervorragende biologische Behandlung durch den MBR den Betrieb der nachfolgenden Membranstufen verbessert, und hilft, die Betriebskosten zu senken.

1 EINLEITUNG

Der Begriff PFAS, kurz für Per- und Polyfluoralkylsubstanzen, umfasst eine große Gruppe von mehr als 4.700 künstlich hergestellten Substanzen (EPA 2021; BfR 2021). Sie wurden in den 1950er Jahren eingeführt und spielen aufgrund ihrer attraktiven Eigenschaften (wasser-, fett- und schmutzabweisend, UV- und hitzebeständig) seitdem eine wichtige Rolle bei der Herstellung unzähliger Produkte in den unterschiedlichsten Branchen. Sie sind persistent, daher sind sie mittlerweile weltweit in jedem Umweltkompartiment zu finden (UBA 2020). Weiterhin sind die meisten PFAS auch gut wasserlöslich (UBA 2020, Cheremisinoff 2017), und fanden so ihren Weg in viele Grund- und Oberflächengewässer auf der ganzen Welt. Über das Trinkwasser haben sich mittlerweile auch PFAS im menschlichen Körper angereichert, wo sie verschiedene nachteilige Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben (UBA 2020, Cheremisinoff 2017). Aus diesen Gründen haben viele Regierungen begonnen, PFAS im Trinkwasser ins Visier zu nehmen, unter anderem auch die Europäische Union mit ihrer überarbeiteten Trinkwasserrichtlinie (2020). Hierbei wurden in letzter Zeit auch Emissionen aus Deponien als eine sehr wichtige Quelle von PFAS für die Umwelt identifiziert: Die aus Abfällen stammenden Sickerwässer binden besonders hohe Konzentrationen von PFAS, die dann mit dem behandelten Sickerwasser in die Umwelt freigesetzt werden.

Da die Sickerwasserbehandlung oft mit hohen Anforderungen an die CSB- und N-Elimination verbunden ist, ist meist der Einsatz eines Membranbioreaktors (MBR) sinnvoll, da hiermit die höchsten Entfernungsraten aller biologischen Verfahren erzielt (ISWA 2019, SWANA 2014)

werden; außerdem ist das biologische Verfahren die wirtschaftlichste Form der N-Entfernung (Wiszniewski 2006). Falls auch die Entfernung von Salzen oder Spuren organischer Verunreinigungen - wie PFAS - erforderlich ist, ist die Kombination eines MBR mit anderen Membranverfahren wie Nanofiltration (NF) oder Umkehrosmose (UO) aufgrund der Vorbehandlung durch den MBR sehr effektiv, und verbessert die Leistung der NF/UO wesentlich durch Verringerung des Fouling- und Scaling-Potenzials (Wintgens et al. 2003).

Derzeit gibt es kaum Informationen darüber, ob MBRs auch PFAS eliminieren können. Bisher wurden granulierten Aktivkohle (GAK), Ionenaustauscherharze und UO-Anlagen als geeignete Verfahren zur PFAS-Entfernung identifiziert, mit der Einschränkung, dass die Kettenlänge einen Einfluss auf deren Leistung hat (He et al. 2014, Appleman et al. 2014, Cheremisinoff 2017).

Dieser Beitrag stellt die Erkenntnisse zum Verbleib von PFAS in der Sickerwasserbehandlung basierend auf dem MBR-Verfahren in Kombination mit anderen Technologien vor: Im Laborexperiment wurde der MBR durch eine UO-Anlage ergänzt. Während der Pilotversuche folgte auf den MBR eine NF-Anlage in einer sogenannten BIOMEMBRAT®-plus-Prozesskonfiguration, bei der das NF-Konzentrat mit GAK behandelt wird, bevor es in den MBR zurückgeführt wird. Mit dieser Prozessführung kann eine Ableitung bzw. eine externe Entsorgung der NF-Konzentrate vermieden werden.

2 UNTERSUCHUNGEN ZUR PFAS-ELIMINATION

Sowohl der Laborversuch als auch die Pilotversuche zielten auf die Beurteilung der Gesamtbehandelbarkeit der Sickerwässer ab, d. h. CSB, N, Salze und Schwermetalle und deren Entfernung standen im Vordergrund und bestimmten die Verfahrenswahl. Ergänzt wurden die Versuche dann durch die Untersuchung des Verbleibs von PFAS in den verschiedenen Prozessstufen. Die Versuche wurden mit Sickerwasser aus zwei verschiedenen geordneten Deponien durchgeführt. Die Labor Versuche wurden mit Sickerwasser einer australischen Deponie durchgeführt, während die Pilotversuche mit Sickerwasser einer deutschen Deponie durchgeführt wurden.

2.1 Pilotversuch (Sickerwasser einer deutschen Deponie)

Der Pilotversuch wurde auf der Deponie „Hintere Dollert“ in der Nähe der Stadt Gaggenau in Deutschland durchgeführt. Ziel des Pilotversuchs war es, zu beurteilen, ob das BIOMEMBRAT®-plus-Verfahren eine zukunftsfähige Alternative zur bestehenden Umkehrosmose sein kann. Das in der Pilotierung getestete BIOMEMBRAT®-plus-Verfahren ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Pilotversuch begann am 17.08.2020 und dauerte bis zum 11.12.2020. Für den Betrieb der Anlage relevante Betriebsdaten und Qualitätsparameter wie z.B. CSB, NH₄-N, TN, Cl wurden 3-5 Mal pro Woche überwacht. Ausgewählte Analyseparameter sind in Tabelle 1 unten dargestellt, sie zeigen die Durchschnittswerte und deren Standardabweichung (SA).

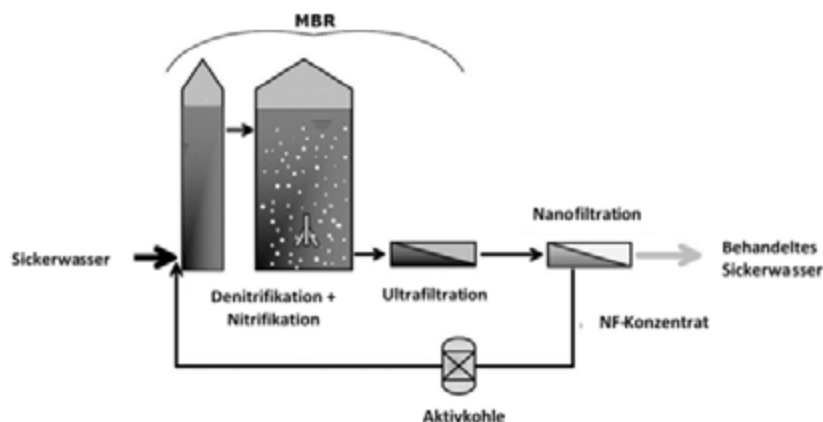


Abb. 1: Das für die Pilotierung verwendete BIOMEMBRAT®-plus-Verfahren: Sickerwasser wird mit einem MBR und einer NF behandelt. Das NF-Permeat wird abgeleitet, das NF-Konzentrat nach der GAK-Behandlung in die Bioreaktoren zurückgeführt, um die in die Biologie zurückgeführte CSB-Fracht zu reduzieren

Tab. 1: Mittelwerte und Standardabweichung (SA) der Hauptparameter an der Pilotanlage

	CSB [mg/L]	NH ₄ -N [mg/L]	NO ₃ -N [mg/L]	el. Cond [mS/cm]	Cl [mg/L]
Roh SiWa	3.775	2.386	nicht analysiert	29,9	2.669
SA	1.019	332		3,0	553
UF-permeate	1.623	8,7	32,9	17,9	2.590
SA	308	21,9	54,7	3,2	493
NF-permeate	155	2,0	19,4	9,8	nicht analysiert
SA	88	4,4	20,9	3,6	

Die in Tabelle 1 aufgeführten Daten zeigen, dass der MBR während der Pilotierung im erwarteten Bereich arbeitete. Sickerwasser enthält immer relativ viel sogenannten „harten“ CSB, der biologisch nicht abbaubar ist, daher bewegen sich die CSB-Konzentrationen im UF-Permeat eines MBR üblicherweise zwischen 1.000-2.500 mg/L. Eine CSB-Konzentration von etwa 1.600 mg/L nach dem MBR lag im üblichen Bereich. Die Nitrifikation lief immer vollständig ab, und lag zuverlässig bei 99 %. Die Denitrifikationsrate lag mit Hilfe einer externen Kohlenstoffquelle stabil bei mehr als 90 %. Die NF-Anlage hielt 90 % des CSB zurück, und zeigte somit eine gute Eliminationsleistung.

2.2 Laboruntersuchungen (Sickerwasser einer australischen Deponie)

Für das australische Sickerwasser wurde für die CSB- und N-Entfernung zunächst ein Labor-Membranbioreaktor (MBR) nach dem BIOMEMBRAT®-Verfahren eingesetzt. Das Abwasser aus dem MBR-Versuch (= UF-Permeat) wurde anschließend mit einer UO-Anlage im Labormaßstab behandelt, wobei eine zweistufige UO-Konfiguration simuliert wurde, um den niedrigen Ablaufgrenzwert für die elektrische Leitfähigkeit von 98 µS/cm erreichen zu können. Abb. 2 zeigt den simulierten Behandlungsprozess.

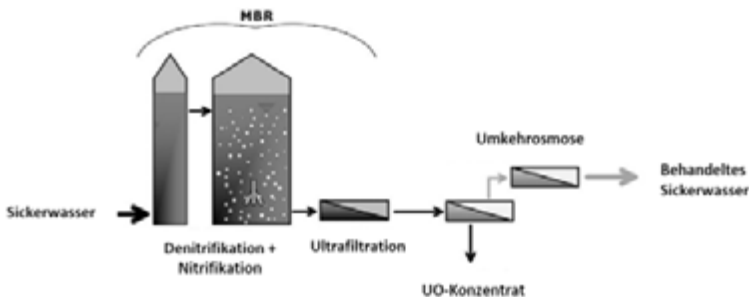


Abb. 2: Behandlungsprozess während der Laboruntersuchung: MBR + 2-stufige UO

Analysen

Es wurden Analysen für CSB, NH₄-N, NO₃-N, Chlorid und elektrischer Leitfähigkeit für das Rohsickerwasser durchgeführt. Tabelle 2 zeigt die gemittelten Ergebnisse für die Analyse der Basisparameter während der Laboruntersuchung.

Tab. 2: Mittelwerte für die Hauptparameter während der Laborsickerwasserbehandlung

	COD [mg/L]	NH ₄ -N [mg/L]	NO ₃ -N [mg/L]	el. LF [µS/cm]	Cl [mg/L]
Roh SiWa	1.720	840	nd	12.870	2.200
UF-Permeate	861	< 1	36-355	9.970	2.200
RO I Permeate @ 70% yield	< 5	< 1	6	80	13
RO I Permeate @ 80% yield	< 15	< 1	8	143	22
RO II Permeate @ 70% yield	< 5	< 1	< 0,23	5	< 2
RO II Permeate @ 80% yield	< 5	< 1	0,5	9	< 2
RO II Permeate @ 90% yield	< 5	< 1	0,5	11	< 2

Die Leistung des Labor-MBR war sehr gut: Die CSB-Entfernung war normal bei einer Konzentration von hartem CSB < 1.000 mg/L (Normalbereich von hartem CSB in behandeltem Sickerwasser: 1.000-2.500 mg/L); Die Nitrifikation war jederzeit vollständig und die Denitrifikationsrate lag zwischen 60 % und 90 %, je nachdem, ob Methanol dosiert wurde oder nicht.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 PFAS in Rohsickerwasser

Während der Pilotversuche wurden PFAS im Rohsickerwasser einmal pro Woche analysiert, nachdem sich die Biomasse an das Sickerwasser angepasst hatte. Im Versuchszeitraum wurden somit 10 Sickerwasserproben analysiert. Für den Laborversuch wurde die Zulauf-Charge in den MBR nur einmal analysiert. In beiden Sickerwässern dominierte eine eher kleine Anzahl von PFAS-Parametern die Zusammensetzung, aber es handelte sich nicht notwendigerweise um die gleichen PFAS (Abbildungen 3a und 3b).

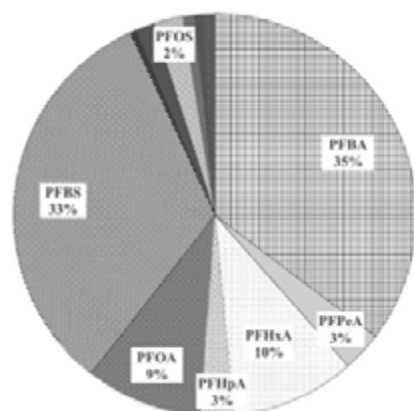


Abb. 3a: PFAS im Roh-SiWa während der Pilotierung (bedeutet für n = 10)

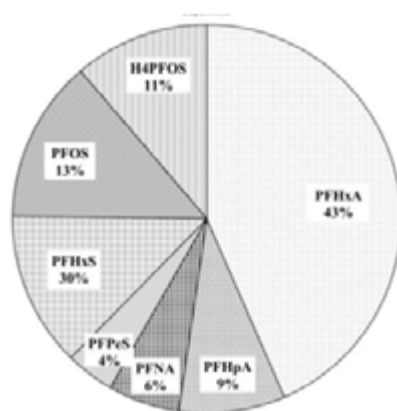


Abb. 3b: PFAS im Roh-SiWa für die Laboruntersuchung (n = 1)

Dieser Bericht konzentriert sich auf die dominantesten PFAS-Parameter in den Sickerwässern: Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorhexansäure (PFHxA) und Perfluoroctansäure (PFOA) für die Carbonsäuren und Perfluorbutan-sulfonsäure (PFBS), Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) und Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) für die Sulfonsäuren. Obwohl sich die Sickerwässer in ihrer Zusammensetzung unterscheiden, sind die Konzentrationen der dominantesten Parameter sowie die Summe für alle PFAS ziemlich ähnlich (Tabelle 4). Die Standardabweichung zeigt, dass die PFAS-Konzentrationen während der dreimonatigen Pilotphase nicht stark variierten. Die deutet darauf hin, dass die Emissionen aus der Deponie selbst unter wechselnden Wetterbedingungen ziemlich stabil sind.

Tab. 3: Durchschnittliche Konzentration ausgewählter PFAS-Parameter im Rohsickerwasser. Zum Vergleich: PFAS-Grenzwerte für 20 PFAS der EU-Trinkwasserrichtlinie (2020)

	PFBA PFBS		PFHxA	PFHxS	PFOA PFOS	Σ PFAS	
[µg/ L]							
Pilot-Test (n=10)	7,7	7,09	2,18	0,32	2,05	0,53	21,81
SA	0,52	0,67	0,35	0,03	0,42	0,28	0,95
Labor-Test (n=1)	bld	bld	10,5	3,11	bld	3,27	24,16
Grenzwert für die EU-Trinkwasserrichtlinie 2020 für Σ20 PFAS							0,1

Tabelle 3 oben zeigt, dass die PFAS-Konzentrationen in Sickerwässern im Vergleich zu den aktuellen Grenzwerten, die in der EU-Trinkwasserrichtlinie festgelegt sind, sehr unterschiedlich sind. Innerhalb der EU werden niedrigere Grenzwerte für Trinkwasser diskutiert, und eine Änderung ist in naher Zukunft zu erwarten. Dies wird sich sowohl auf die Abwasserbehandlung als auch auf die Sickerwasserbehandlung innerhalb der EU auswirken.

3.2 Verbleib von PFAS im MBR (Pilotversuch)

Wie die Abbildung 4 zeigt, werden die PFAS-Konzentrationen im Zulauf zum MBR merklich durch den Rückstrom aus der GAK beeinflusst. Es ist auch offensichtlich, dass die PFAS-Konzentrationen im UF-Permeat nahezu identisch mit denen im MBR-Zulauf sind. Somit wurde während des Pilotversuchs keine Wirkung der biologischen Behandlung in einem MBR auf die PFAS-Konzentrationen festgestellt.

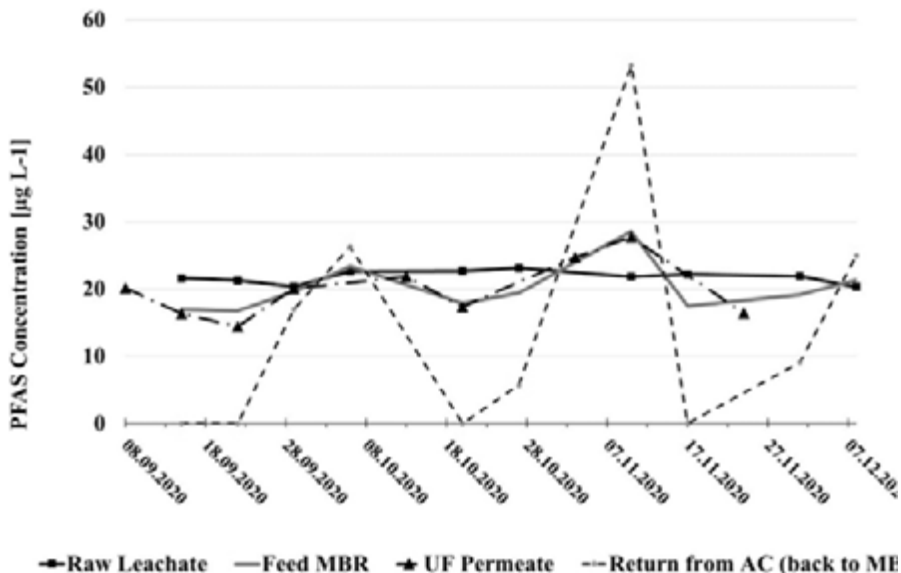


Abb. 4: PFAS-Konzentrationen im Rohsickerwasser, im Zulauf zum MBR, der das zurückgeführte NF-Konzentrat nach der Behandlung mit GAK enthält, und die PFAS-Konzentrationen im UF-Permeat

Dies gilt auch, wenn man die oben genannten sechs ausgewählten PFAS-Einzelparameter betrachtet: keiner der sechs Parameter wurde im MBR reduziert. Auch während der MBR-Laborstudie wurde keine Eliminationswirkung für diese Parameter festgestellt. Daraus lässt sich schließen, dass die biologische Behandlung in einem MBR keinen Einfluss auf PFAS hat, und diese weder biologisch abgebaut, noch in nennenswertem Umfang an den Belebtschlamm adsorbiert werden.

3.3 Rückhaltung von PFAS durch NF und UO

Das während der Pilotversuche verwendete BIOMEMBRAT®-plus-Verfahren beinhaltet eine NF-Anlage anstelle einer Umkehrosmose (Abb. 1). Während der Pilotierung wurden eine offene NF-Membran (NF1) und eine sehr dichte NF-Membran (NF2) getestet. Die Pilotierung begann mit der NF-Membran NF1. Als sich herausstellte, dass die NF1 nur etwa 40 % der PFAS zurückhielt (Abb. 5), wurde diese gegen die Membran NF2 ausgetauscht. Diese zeigte einen sehr guten PFAS-Rückhalt von 99 %. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass NF-Membranen PFAS zurückhalten, aber dass die Rückhaltung sehr stark von den individuellen Membraneigenschaften abhängt, wobei die Rückhaltung zwischen niedrig und sehr hoch liegt (30-40 % bei NF1 bis zu 99 % bei NF2).

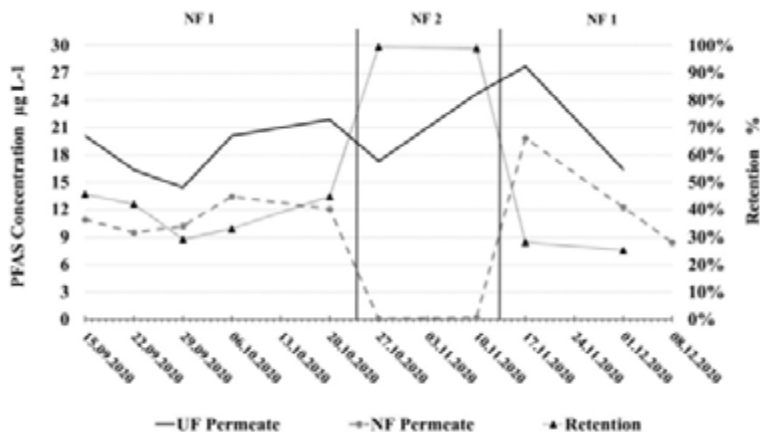


Abb. 5: PFAS-Konzentrationen im UF- und NF-Permeat und der jeweilige Rückhalt durch die NF-Membranen

Die in Abb. 6 gezeigten Daten bestätigen, dass die geringe Rückhaltung durch die NF1 auch bei Betrachtung der sechs ausgewählten PFAS ersichtlich ist, während sie alle durch die NF2 zu > 99 % zurückgehalten wurden. Es gibt keinen eindeutigen Hinweis darauf, dass die Rückhaltung von langkettigen PFAS höher ist als die von kurzkettigen PFAS. Da die Datenbasis jedoch klein ist (n=8 für NF1 und n=2 für NF2), können die Ergebnisse nicht genauer interpretiert werden.

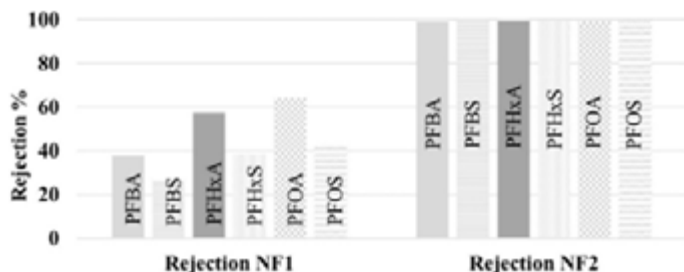


Abb. 6: Rückhalt von ausgewählten PFAS bei der offenen NF-Membran NF1 (n = 8) und bei der dichten NF-Membran NF2 (n = 2)

Die Ergebnisse aus der Laboruntersuchung bestätigten Literaturbefunde: Alle PFAS wurden vollständig von der UO-Membran zurückgehalten, im UO-Permeat wurden keine PFAS nachgewiesen (uNG: unterhalb der Nachweisgrenze) (Tab.4).

Tab. 4: PFAS-Konzentrationen im UF-Permeat und den UO-Permeaten während der Laboruntersuchung

PFAS Konzentration [µg/L]	UF Permeate		UO I Permeate			
	Phase A	Phase B	Phase A		Phase B	
ΣPFAS	33,9	32,6	70%	80%	70%	80%
PFBA	5,1	4,3	uNG	uNG	uNG	uNG
PFBS	4,7	5,9	uNG	uNG	uNG	uNG
PFHxA	8,3	8,5	uNG	uNG	uNG	uNG
PFHxS	2,1	3,9	uNG	uNG	uNG	uNG
PFOA	3,8	2,4	uNG	uNG	uNG	uNG
PFOS	uNG	uNG	uNG	uNG	uNG	uNG

3.4 Adsorption von PFAS an GAK

Wie in Abschnitt 2 beschrieben, wurde während des Pilotversuchs mit der BIOMEMBRAT®-plus-Anlage die GAK für die Behandlung des NF-Konzentrates zur Entnahme des harten CSB und PFAS verwendet. Die mittlere CSB-Konzentration im NF-Konzentrat lag bei 5.500 mg/L (min 1.874 mg/L, max. 10.900 mg/L). Die PFAS-Konzentrationen im NF-Konzentrat vor der GAK lagen zwischen 32 µg/L und 60 µg/L (Abb. 7). Im Ablauf der GAK lagen die PFAS-Konzentrationen zwischen 0 und 52 µg/L. Daraus ergaben sich Entnahmeraten zwischen 10 % - 100 %. Dies zeigt, dass frische GAK in der Lage war, PFAS vollständig aus dem Konzentrat zu entfernen, und dass die Fähigkeit von GAK PFAS zu adsorbieren merklich abnimmt, wenn die GAK-Beladung ansteigt. Somit hängt die mit dem NF-Konzentrat an den MBR zurückgeführte PFAS-Beladung vom Zustand der GAK und der Häufigkeit seiner Erneuerung bzw. des Austauschs ab. Dadurch beeinflussen PFAS im GAK-Ablauf, der in den MBR zurückgeführt wird, auch stark die PFAS im MBR und damit im gesamten BIOMEMBRAT®-plus-Prozess.

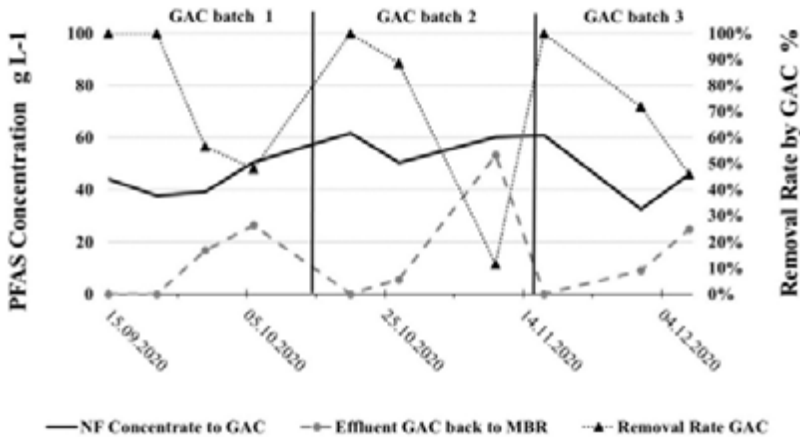


Abb. 7: PFAS-Konzentrationen im Zulauf zur GAK (=NF-Konzentrat) und nach der GAK (Rücklauf zum MBR); PFAS-Entnahmerate durch GAK

Während der wurden etwa 200-250 g CSB pro kg AK adsorbiert, ein Wert innerhalb eines normalen Bereichs für Sickerwässer, wo harter CSB oft schlecht an GAK adsorbiert wird. Für PFAS wurden maximal 2.000 µg pro kg GAK adsorbiert. Die recht geringe Stichprobenzahl (n=10) verhindert jedoch eine genauere Interpretation hinsichtlich der Beladungskapazität. Die in dieser Studie gefundene maximale Adsorption ist jedoch weitaus geringer als in der Literatur angegeben. Ochoa-Herrera & Sierra-Alvarez (2008) haben beispielsweise eine maximale Adsorption von 200 mg PFOS/g GAK und etwa 50 mg/g GAK für PFOA und PFBS gemessen. Im hier vorgestellten Fall wird angenommen, dass die im NF-Konzentrat angereicherten organischen Substanzen und Salze die PFAS-Adsorption an GAK nachteilig beeinflussen.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die in diesem Bericht vorgestellten Ergebnisse bestätigen einmal mehr, dass der MBR sehr gut zur Reduktion des CSB geeignet ist. Es wurde auch eine vollständige Nitrifikation und eine stabile Denitrifikation mit 90 % NO₃-N-Entfernung aus dem Sickerwasser erreicht. Die nachfolgenden Membranprozesse NF und UO haben 90 % des verbleibenden CSB (NF) zuverlässig zurückgehalten, und die Salze auf den sehr niedrigen Grenzwert von < 98 µS/cm (UO) reduziert.

In Bezug auf PFAS sind die Ergebnisse weniger eindeutig: Beide Sickerwässer enthielten PFAS in hohen Konzentrationen (24,8 bzw. 21 µg/L). Es gibt keine Hinweise darauf, dass der MBR PFAS reduziert, weder durch biologischen Abbau noch durch Adsorption an die Biomasse. UO-Membranen können PFAS vollständig zurückhalten (Rückhaltung 100 %), ein Befund, der mit der Literatur übereinstimmt, in der UO-Anlagen als eines der geeigneten Mittel zur PFAS-Entfernung beschrieben wird (Cheremisinoff 2017, Barlaz et al. 2019). Die Pilotierung hat gezeigt, dass die

Rückhalteraten der NF-Membranen sehr unterschiedlich sind, wobei die Rückhaltung für PFAS zwischen 25 % und 99 % liegen, abhängig von der Art der NF-Membran und der PFAS-Parameter. Neben den Membraneigenschaften scheinen die Molekülgröße und die Art der Säuregruppe einen Einfluss auf den Rückhalt zu haben. PFAS im NF-Konzentrat adsorbierten sehr gut an frischer GAK (PFAS-Entfernung: 100 %), aber die Adsorptionsraten nahmen schnell ab, und waren bis auf 10 % abgefallen. Die Beladungskapazität der GAK war mit maximal 2.000 µg/kg GAK eher gering. Dies weist darauf hin, dass bei Verwendung von GAK zur Entfernung von PFAS aus Sickerwasser die erforderliche GAK-Menge recht hoch sein kann.

Die in dieser Studie verwendeten Verfahren zur Behandlung von Sickerwässern zeigen, dass bei richtiger Anwendung eine vollständige Entfernung oder zumindest eine deutliche Reduzierung von PFAS in Sickerwässern möglich ist. Obwohl der MBR selbst keine PFAS entfernte, ist dieser dennoch eine unverzichtbare Prozessstufe, da die maximale biologische Reinigung des Rohsickerwassers einen stabilen und kostengünstigen Betrieb der nachfolgenden Membranstufen ermöglicht. Die vollständige Entfernung von dem biologisch abbaubaren CSB, die optimierte N-Entfernung und die Reduzierung der Alkalität zu < 20 mmol/L in der Biologie sorgen dafür, dass das behandelte Sickerwasser nur noch ein minimales Foulingpotential aufweist, und dass auch der Verbrauch von Chemikalien zur Einstellung des pH-Wertes und des Antiscalants minimiert wird. Dies ermöglicht wiederum, die Ausbeute an NF und UO zu maximieren. Daher ist der MBR für die Reduzierung der Betriebskosten und die Stabilität des gesamten Prozesses unerlässlich.

Inwieweit die Rückhaltung von PFAS durch NF-Membranen und die Adsorption an GAK durch andere Parameter wie harten CSB, pH-Wert oder Salze beeinflusst werden, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

LITERATUR

- Appleman, T., Higgins, C., Qunones, O., Vanderford, B., Kolstad, C. Zeigler-Holday, J., Dickenson, E. (2013) *Nanofiltration und körnige Aktivkohlebehandlung von Perfluoralkylsubstanzen*. Journal of Hazardous Materials 260 (2013): 740-746
- Barlaz, M., DeSilva, V. & Staley, B. (2019): PFAS 101: Auswirkungen auf die Abfallwirtschaft. Präsentation auf der WasteExpo 2019
- BfR-Bundesinstitut für Risikobewertung (2020) *Häufig gestellte Fragen zu Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS)*; FAQ erstellt vom BfR am 21.09.2020; https://www.bfr.bund.de/de/h%C3%A4ufig_gestellte_fragen_zu_per-und_polyfluoralkylsubstanzen_pfes_-_244188.html
- Cheremisinoff, N. P. (2017) *Perfluorierte Chemikalien (PFC) – besorgniserregende Schadstoffe*. Scrivener Publishing LLC, ISBN 978-1-119-36353-8
- EWK-Europäische Umweltagentur 2021: *Neu auftretende chemische Risiken in Europa – „PFAS“*; <https://www.eea.europa.eu/publications/emerging-chemical-risks-in-europe#:~:text=In%20some%20highly%20condensed%20areas%2C%20concentrations%20of%20perfluorooctanoic,of%20PFAS%20in%20the%20blood%20of%20European%20citizens>
- EPA-USA Environmental Protection Agency (2021) *Grundlegende Informationen zu PFAS | Per- und Polyfluoralkyl-Substanzen (PFAS)*. US EPA
- He, C. et al. (2014): *Entfernung perfluorierter Verbindungen durch Membranbioreaktor mit Pulveraktivkohle: Adsorption auf Schlamm und PAC*. Entsorgung 334 (2014): 23-28
- ISWA (2019) *Landfill Operational Guidelines - A Report from ISWA's Working Group on Landfill 2019*, 3rd Edition
- Ochoa-Herrera, V. & Sierra-Alvarez, R. (2008) *Entfernung perfluorierter Tenside durch Sorption an Aktivkohlegranulat, Zeolith und Schlamm*, Chemosphäre 72 (2008): 1588-1593
- Pinasseau, A., Zerger, B., Roth, J. Canova, M. Roudier, S. (2018) *Beste verfügbare Techniken (BVT) Referenzdokument für die Abfallbehandlung; Industrieemissionsrichtlinie 2010/75/EU (Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung)*; EUR 29362 EN
- SWANA – Solid Waste Association of North America (2014) *On-site Treatment of Landfill Leachate* SWANA Applied Research Foundation, Report 12/2014, 116 pps
- UBA-Umweltbundesamt (2020): *PFAS – Gekommen, um zu bleiben*. Magazin des Umweltbundesamt 1/2020
- Weissroth, M. (2020): *Membranverfahren zur Behandlung von Deponiesickerwasser*, Konferenzbeitrag auf der Water New Zealand 2020
- Wintgens, T., Gallenkemper, M., Melin, T. (2003) *Occurrence and removal of endocrine disrupters in landfill leachate treatment plants*, Water Science and Technology Vol. 48; No3: 127-134
- Wisniewski, J., Robert, D., Surmacz-Gorska, J., Miksch, K., Weber, J. (2006) *Landfill Leachate Treatment Methods: A Review*. Environ Chem Lett, 4: 51-61

Erste Erfahrungen mit Methanoxidationsfenstern zur Stilllegung der aktiven Deponiegaserfassung

M. Hrad¹, V. Wechselberger¹ & M. Huber-Humer¹

¹⁾ Universität für Bodenkultur Wien, Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Abfallwirtschaft, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Auf einer älteren Siedlungsabfalldeponie in Österreich wird die aktive Deponiegaserfassung auf eine passive Schwachgasbehandlung über sogenannte Methanoxidationsfenster umgestellt. Bisher wurden 4 von 15 geplante Oxidationsfenster installiert, wobei jedes aus einer 0,5 m mächtigen Gasverteilungsschicht und einer darüber liegenden 1,4 m hohen Methanoxidationsschicht aus reifem Bioabfallkompostmaterial besteht. Die Fläche an der Basis der Fenster variiert zwischen 36 - 49 m² (2 Pilotoxidationsfenster seit 2014) und 64 m² (2 Fenster seit 2021). Laufende Untersuchungen zeigen, dass beim technischen Aufbau der Oxidationsfenster vor allem die homogene Gasverteilung bzw. Deponiegasbeaufschlagung im Praxiseinsatz die größte Herausforderung darstellt. Bedingt durch die derzeit noch eingeschränkte oxidationsaktive Filterfläche, kommt es immer wieder zu punktuell begrenzten Methanaustritten aus den Fenstern. Es ist davon auszugehen, dass sich die spezifische Methanbelastung pro Quadratmeter bei einem weiteren Ausbau der geplanten Methanoxidationsfenster und einer entsprechenden (homogeneren) Aufteilung des passiven Gasflusses verringern wird.

1 EINLEITUNG

In der Stilllegungs- und Nachsorgephase von ehemaligen „Hausmülldeponien“ zeigt sich immer wieder, dass aktive Entgasungs- und Fackelsysteme aufgrund der schwankenden Gasqualitäten und rückläufigen Gasproduktion oft abschalten, und dann das Deponiegas nicht ausreichend behandelt werden kann. Eine mögliche Strategie um aktuelle Emissionen sowie das verbleibende Emissionspotential dieser Deponien zu reduzieren, ist die Umstellung auf eine passive Schwachgasbehandlung über sogenannte Methanoxidationsfenster nach Rückbau der Gasbrunnen. Die Methanoxidationsfenster bestehen aus einer adäquaten Gasverteilungs- und Oxidationsschicht mit hoher Oxidationskapazität und werden abschnittsweise in die bestehende, meist dichte Oberflächenabdeckung integriert. Da die Fenster eine bessere Gasdurchlässigkeit verglichen zur restlichen Deponieabdeckung (bzw. Dichtung) aufweisen, strömt das Deponiegas verstärkt durch diese Bereiche aus. Das Methan wird im Idealfall in den Fenstern durch methanoxidierende (methanotrophe) Bakterien zu Wasser und Kohlenstoffdioxid oxidiert.

Im Rahmen eines Pilotprojektes wurden im Frühjahr 2014 (vorerst) zwei ehemalige Gasbrunnen auf einer älteren Siedlungsabfalldeponie in Österreich zur Beendigung der aktiven Deponiegaserfassung rückgebaut und durch Methanoxidationsfenster ersetzt. Im Zeitraum 2021-2025 sollen 13 neue Oxidationsfenster entstehen, wobei bereits zwei davon im Herbst 2021 installiert wurden. Erste Erfahrungen mit Methanoxidationsfenstern zur Stilllegung der aktiven Deponiegaserfassung werden präsentiert.

2 MATERIAL UND METHODE

2.1 Deponie und Aufbau Methanoxidationsfenster

Die Siedlungsabfalldeponie wurde 1978 zur Ablagerung von Abfällen aus der mechanisch-biologischen Vorbehandlung mit einer Gesamtkapazität von ca. 540.000 m³ errichtet und weist eine Gesamtfläche von 10 ha auf. Die Deponie ist in vier Abschnitte gegliedert (ältere, stillgelegte Abschnitte I-III und ein noch in Betrieb befindlicher Abschnitt IV), die in den Jahren 1993-1999 an den Stand der Technik gemäß Deponieverordnung angepasst wurden. Zwischen 1994 und 2014 wurde das Deponiegas aktiv erfasst, wobei die Entgasungsanlage nachträglich in die bestehende

Müllschüttung der Abschnitte I-III eingebracht wurde. Insgesamt wurden 33 Gasbrunnen (Stahlrohr DN 800) vertikal in Kieskörpern installiert, mit horizontal geschlitzten Gassammelrohren (HDPE DN 63) in einem Kiesbett eingebunden und über 8 Gassammelstationen in zwei Hauptgassammelleitungen (optional eine Leitung für „Gutgas“ zur Hochtemperaturfackel bzw. eine Leitung für „Schlechtgas“ zum Biofilter) zusammengeführt. Mithilfe von zwei Verdichtern wurde das Deponiegas mit je einer Förderleistung von 300 Nm³/h abgesaugt. Die Deponieabschnitte I-III sind derzeit mit einem 1 m mächtigen Boden-Kompost-Gemisch abgedeckt, auf Abschnitt IV wird vorwiegend noch Straßenkehrschutt abgelagert.

Im Jahr 2014 wurden vorerst zwei Pilotmethanoxidationsfenster (Nr. 1 u. 2) auf dem Deponieabschnitt I – II errichtet. Im Zeitraum 2021-2025 sollen 13 neue Oxidationsfenster entstehen, wobei bereits zwei Fenster (Nr. 3 u. 4) im Herbst 2021 im gleichen Abschnitt installiert wurden. Die Fenster 1 und 2 umfassen jeweils eine Fläche von 6 x 6 m an der Basis, die zu einem späteren Zeitpunkt (April 2015) bei Fenster 1 auf 7 x 7 m vergrößert wurde. Die Fenster 3 und 4 sind an der Basis ca. 8 x 8 m groß. Jedes Oxidationsfenster besteht aus einer Gasverteilungsschicht (0,5 m Basaltkies mit einer Körnung zwischen 32 und 64 mm) und einer darüber liegenden 1,4 m hohen Methanoxidationsschicht aus reifem (regionalen) Bioabfallkompostmaterial. Um einen unerwünschten Deponiegasaustritt im Randbereich der Oxidationsfenster zu verhindern bzw. die oxidationsaktive Filterfläche zu vergrößern, wurde das Kompostmaterial mit einem Überhang von ca. 1 – 1,5 m an jeder Seite angebracht. Das Kompostmaterial der zwei ersten Pilotfenster (Nr. 1 u. 2) wurde vor dem Einbau zusätzlich mit Strukturmaterial in Form von Hackschnitzel (Volumenverhältnis 70:30) gemischt. Im Gegensatz dazu wurde der Siebschnitt des Kompostmaterials (fein abgesiebt) der beiden neuen Oxidationsfenster (Nr. 3 u. 4) auf die Durchlässigkeitsanforderungen der darunterliegenden GV-Schicht angepasst, damit der horizontale Strömungswiderstand innerhalb der GV-Schicht geringer ist als der vertikale über beide Schichten (Gesamtsystem). Gemäß Gebert (2013) sollte die Gasdurchlässigkeit in der GV-Schicht um mindestens zwei Zehnerpotenzen größer sein als jene der Oxidationsschicht. Zur besseren Gasverteilung wurde das Gasdrainagerohr (Altbestand) an der Basis bis in die Mitte der Fenster geführt und etwa 10 cm darüber eine perforierte HDPE-Folie (Fläche 2x2m) platziert. Zudem wurde eines der beiden neuen Fenster (Nr. 3) in Anlehnung an Cassini et al. (2017) bzw. nach Hinweisen auf eine verbesserte Gasverteilung bei viel Niederschlagswassereintrag bzw. Stauwasser mit einer gezackten GV-Schicht ausgestattet (Schichtdicke der GV-Schicht: 0,2-0,5 m). Der Aufbau der Methanoxidationsfenster ist in Abb. 1 dargestellt.

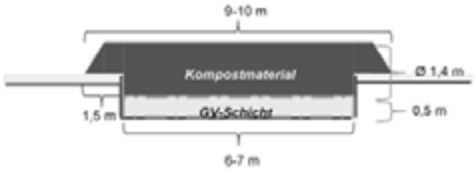
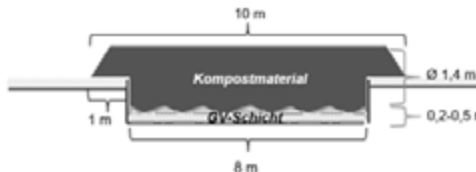
Pilotoxidationsfenster (Nr. 1 und 2)	Oxidationsfenster 2021 (Nr. 3)
	
Kompostmaterial mit Hackschnitzel (Volumenverhältnis 70:30)	Fein abgesiebtes Kompostmaterial

Abb. 1: Querschnitt der Pilotoxidationsfenster (links) bzw. der neuen Oxidationsfenster ab 2021 (rechts)

Die prinzipielle Eignung des Kompostmaterials als Trägersubstrat für die Methanoxidation (sowohl für die Pilotfenster als auch neueren Fenster ab 2021) konnte vorab in Säulenversuchen unter standardisierten Bedingungen bestätigt werden. In beiden Fällen wurde ein vollständiger Methanabbau bei einer Flächenbelastung von ca. 200 NI CH₄/m²d erreicht. Der ÖVA-Leitfaden (Huber-Humer et al. 2008) gibt einen Anhaltswert von ca. 100 l CH₄/m²d vor, welcher meist problemlos in geeigneten Materialien abgebaut werden kann.

2.2 Wissenschaftliches Begleitmonitoring

Das wissenschaftliche Begleitmonitoring zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Methanoxidationsfenster umfasst vierteljährliche Emissionsmessungen (FID-Rasterbegehungen und Strömungsmesstunnel- bzw. Haubenmessungen zur Quantifizierung des

Methanmassenstromes) sowie Gasprofil- und Temperaturmessungen (4 Messpunkte pro Fenster) in unterschiedlichen Tiefen (20, 50, 100 und 140 cm).

3 ERSTE ERGEBNISSE

In der Pilotphase zeigte sich eine sehr heterogene bzw. eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität der Deponiegasversorgung der Methanoxidationsfenster 1 und 2. Es kam vor allem im Randbereich des Fensters 1, wo das Gasdrainagerohr des ehemaligen Gasbrunnen eingeleitet wird, zu punktuell erhöhten Methanemissionen. Dieser Bereich ist auch anhand von Vegetationsausfällen erkennbar (siehe Abb. 2). In den ersten Monaten nach Fertigstellung der Fenster wurden daher diverse technische Anpassungen zur Optimierung der Gasverteilung umgesetzt (äußere Abdichtung des Gasdrainagerohrs im Einströmbereich der Fenster, Vergrößerung der Gasverteilungsschicht an der Basis um jeweils 1 m [nur bei Fenster 1] sowie des Kompostüberhangs auf jeweils 1,5 m), die allerdings nur kurzfristig zu einer Reduktion der Methanemissionen führten.



Abb. 2: Vegetationsschaden im Randbereich (Hotspot) des Fensters 1, wo das Gasdrainagerohr des ehemaligen Gasbrunnen eingeleitet wird

In der Pilotphase standen zwei Methanoxidationsfenster (bzw. seit 2021 insgesamt 4 Fenster) auf dem gesamten Deponiebereich für einen gesteuerten, passiven Gasaustritt zur Verfügung. Daher kommt es offensichtlich laufend zu einer (zumindest kurzfristigen) Überbelastung der Oxidationsfenster. Hier ist das auch in der internationalen Fachliteratur schon mehrfach beschriebene Phänomen ersichtlich, dass ein auftretender Hotspot (Bereich mit erhöhten Methanemissionen), durch veränderte Bodenparameter (wie z.B. weitergehende Austrocknung des Bereiches im Vergleich zur übrigen Fläche) noch verstärkt gasdurchlässig wird und zunehmend konvektiv getriebenen Gasströme über diesen eingeschränkten Bereich die Abdeckung verlässt. Diese hohen Gasflüsse können dann nicht mehr mikrobiell oxidiert werden.

In Abb. 3 ist beispielhaft das Gaskonzentrations- bzw. Temperaturprofil für einen Hotspot (links – Überbelastung mit Deponiegas) und einen „ungestörten“ Bereich (rechts – adäquate Deponiegasversorgung) des Fensters 1 dargestellt. Im „ungestörten“ Bereich konnte das von unten anströmende Methan bereits bei 50 cm (unter GOK) abgebaut werden. Die typischen Gaskurven deuten auf eine Methanoxidation hin (Verschiebung des Verhältnisses CH_4 zu CO_2 , Verbrauch von Sauerstoff, Methan im oberen Teil der Abdeckung nicht mehr nachweisbar). Gasprofiluntersuchungen beim Hotspot zeigten hingegen, dass der Randbereich des Fensters nicht in der Lage war, das Methan vollständig zu oxidieren. Über das gesamte Profil (20 – 140 cm) wurden Restmethankonzentration von ca. 7 – 12 vol.% festgestellt. Sauerstoff konnte nicht mehr ausreichend rasch eindringen, wurde in den oberen Schichten zu schnell durch Mikroorganismen aufgebraucht und über das gesamte Profil von 20 cm abwärts nicht mehr nachgewiesen. In den oberen 20 cm ist allerdings auch nur eine begrenzte Oxidationsaktivität zu erwarten.

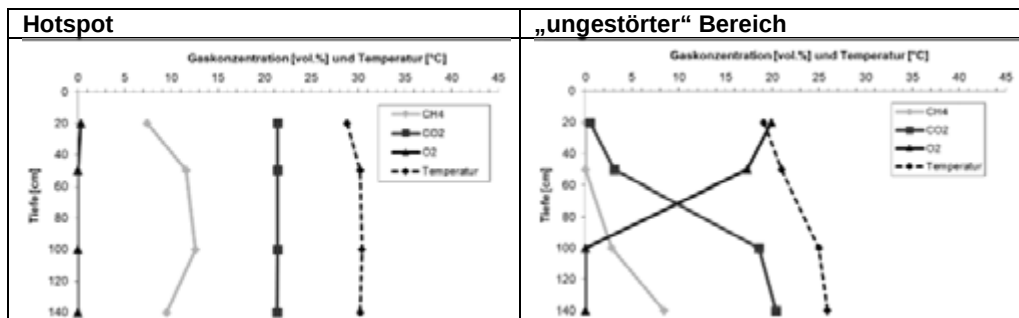


Abb. 3: Exemplarisches Profil der Gaskonzentration bzw. Temperatur eines Pilotmethanoxidationsfensters im Bereich eines sichtbaren Hotspots (links) und in einem „ungestörten“ Bereich (rechts)

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Die Leistungsfähigkeit eines technischen Systems zur Methanoxidation kann durch die Wahl eines geeigneten Abdeckmaterials sowie durch einen angepassten technischen Aufbau positiv beeinflusst werden. Bei der Umstellung einer aktiven Deponiegaserrfassung auf eine passive Schwachgasbehandlung über sogenannte Methanoxidationsfenster stellt jedoch die homogene Gasverteilung bzw. Beaufschlagung des meist unregelmäßig austretenden Deponiegases die größte Herausforderung dar – wie laufende Untersuchungen auf einer älteren, österreichischen Siedlungsabfalldeponie mit bereits stark abnehmender Gasentwicklung zeigen.

Aufgrund der derzeit noch eingeschränkten oxidationsaktiven Filterfläche (in der Pilotphase nur zwei bzw. seit 2021 vier Methanoxidationsfenster auf dem gesamten Deponiebereich) kommt es immer wieder zu kurzfristig überhöhten Methanbelastungen pro Quadratmeter Filterfläche und einer inhomogenen Gasverteilung. Es wurde von Anfang an erwartet, dass die Methanoxidaionsfläche von zwei bzw. vier Fenstern nicht ausreicht, um das gesamte noch produzierte Deponiegas zu oxidieren. Vor allem die Pilotphase lieferte weitere wichtige Hinweise zur Gasverteilung in den Fenstern bzw. zum Verhalten der Deponiegasströme innerhalb des noch bestehenden Gassammelleitungssystems. Die bisherigen Erkenntnisse aus der Pilotphase sowie neue internationale wissenschaftliche Empfehlungen (z.B. Abstimmung des Kompostmaterials auf die Durchlässigkeit der Gasverteilungsschicht bzw. Ausführung der Gasverteilung als ZickZack-Schicht) werden bei der Ausführung der zusätzlichen 11 Methanoxidationsfenster (geplanter Einbau 2022-2025) berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, dass sich die spezifische Methanbelastung pro Quadratmeter (Beaufschlagungsrate) bei einer Erweiterung der oxidationsaktiven Filterfläche, wie den nun in Planung befindlichen weiteren Methanoxidationsfenstern, und einer entsprechenden (homogeneren) Aufteilung des passiven Gasflusses verringern wird. Im Herbst 2022 sind zudem Untersuchungen geplant, um etwaige „Ermüdungserscheinungen“ des Oxidationssubstrates der Pilotfenster 8 Jahre nach Errichtung zu beurteilen und Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten.

LITERATUR

- Cassini, F., Scheutz, C., Skov, B.H., Mou, Z., Kjeldsen, P. (2017). Mitigation of methane emissions in a pilot-scale biocover system at the AV Miljø Landfill, Denmark: 1. System design and gas distribution. *Waste Management*, 63, 213-225.
- Gebert, J. (2013). Microbial oxidation of methane fluxes from landfills, *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten*, Band 66; ISSN: 0724-6382, Hamburg, 2013.
- Huber-Humer, M., Amann, A., Bogolte, T., Dos Santos, M., Hagenauer, I., Pauliny, W., Reichenauer, T., Watzinger, A., Wimmer, B. (2008). „Technischer Leitfaden Methanoxidationsschichten“ erstellt im Rahmen der ÖVA-Arbeitsgruppe, Wien.

InnoBLA II: Neues Konzept eines Planungswerkzeuge für die Beheizung von Böden mit elektrisch beheizten Wärmequellen

A. Schönberg¹, C. Spijker² & H. Raupenstrauch²

¹⁾ S-PEC e.U., Graz, Österreich

²⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Die Neuentwicklung eines schnellen und benutzerfreundlichen Planungstools ermöglicht die Auslegung und eine bessere Abschätzung der Betriebsdauer von Sanierungsvorhaben. Hierbei soll das Tool in kurzer Rechenzeit ausreichend genaue Ergebnisse zur Planung von thermischer Altlastensanierungen liefern. Um dies zu erreichen, werden für den Soff- und Wärmetransport simplifizierte Ansätze implementiert. Um diese Ansätze zu erarbeiten ist ein detailliertes Verständnis der physikalischen und chemischen Vorgänge im Detail notwendig. Um diese zu erörtern, wurde ein detailliertes Modell erstellt, welches über Laborversuche evaluiert wurde. Ein weiterer Schwerpunkt des Planungstools ist die Benutzerfreundlichkeit, weshalb eine online verfügbare grafische Benutzeroberfläche erstellt wurde. Das Projekt wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie gefördert.

1 EINLEITUNG

Das Planungstool wurde im Rahmen des Projektes Innovationen für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung (InnoBLA) entwickelt. Ziel ist die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Aufheizung von Böden durch Heizlanzen für die Bodenluftabsaugung. Hierbei ist die Positionierung der Lanzen auf der Altlast eine der entscheidendsten Parameter. Da sich die Rahmenbedingungen und Stoffwerte des Bodens für jeden Fall unterscheiden wurde ein Planungstool entwickelt. Im ersten Schritt wurde auf Basis von OpenFOAM 2.4.x (The OpenFOAM Foundation Ltd. 2015) ein detailliertes Simulationsmodell erstellt, welches den Boden über eine stationäre Feststoff Eulerphase und eine mobile gasförmige Eulerphase beschreibt. In diesem Modell lassen sich die physikalischen Vorgänge im Detail beschreiben, jedoch ist dieses rechenintensiv. Dieses Modell dient primär zur Erfassung der relevanten physikalischen Vorgänge, welche in das Planungstool übernommen werden. Zur Evaluierung beider Modelle wurde eine Laboranlage entwickelt, welche die Bodentemperaturen in definierten Abständen zur Heizlanze erfasst.

2 DETAILIERTES SIMULATIONSMODELL

Zur Modellierung des Versuchsaufbaus wurde das Modell als Mehrzonenmodell entwickelt. In den Zonen „solid“ welche die Feuerfestzustellung und den Stahlmantel erfasst, wird lediglich die transiente Fouriergeleichung gelöst. Die Zone „Boden“ beschreibt die Beschaffenheit des Bodens über zwei Eulerphasen. Hierbei ist die erste Eulerphase stationär und setzt sich aus den Komponenten Wasser, Organik und Inert zusammen. Die Zweite Eulerphase beschreibt die Bodenluft, welche durch die Komponenten N_2 , O_2 , $H_2O(g)$, CH_4 und CO_2 beschrieben wird. Die Kopplung der Zonen erfolgt nur thermisch über den Abgleich der Wärmestromdichten und Temperaturen.

2.1 Strömung

Zur Beschreibung der Strömung der Bodenluft wurde ein quasistationärer Ansatz gewählt, damit keine Limitierung durch die Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl vorliegt. Hierbei werden die Impulserhaltungsgleichung (Formel 1) und die Kontinuitätsgleichung (Formel 2) mit Hilfe des SIMPLE Algorithmus (Caretto et al. 1972) gelöst. Zur Beschreibung des Strömungswiderstands in der Impulserhaltungsgleichung (Formel 1) wurde der Widerstandsterm nach Darcy (Darcy 1856) implementiert. Aufgrund der heterogenen Reaktionen wird der Massenaustausch zwischen den Phasen in der Kontinuitätsgleichung (Formel 2) durch den Quellterm Q_{mass} berücksichtigt.

$$\text{div}(\varepsilon \rho \vec{u} \vec{u}) + \mu_{mix} F \vec{u} - \varepsilon \rho g = -\text{grad}(p) \varepsilon \quad (1)$$

$$\text{div}(\varepsilon \rho \vec{u}) = Q_{mass} \quad (2)$$

2.2 Energieerhaltung

Die Energieerhaltung wird für jede Eulerphase im Boden einzeln gelöst. Die Kopplung der Phasen erfolgt semiimplizit über den Wärmeübergang zwischen den Phasen, $\alpha_{g,D}$ welcher über den Ansatz von Gunn (Gunn 1978) beschrieben wird. Die transiente Erhaltungsgleichung der Enthalpie der Festphase (Formel 3) berücksichtigt neben der Wärmeleitung und dem Wärmeübergang zur Gasphase die Verdampfungsenthalpie H_{Verd} .

$$\frac{\partial(\rho_s T_s c p_s)}{\partial t} - \text{div} \left[\frac{\lambda_b}{\rho c p_g} \text{grad}(T_b) \right] = \alpha_{g,p} A_v (T_g - T_s) + r r_{H_2O} H_{Verd} \quad (3)$$

In der Gasphase (Formel 4) wird neben der Wärmeleitung und dem Wärmeübergang zur Festphase noch der konvektive Transport der Enthalpie berücksichtigt.

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_g T_g c p_g)}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon \rho \vec{u} T_g c p_g) - \text{div} \left[\varepsilon \frac{\lambda_{Eff}}{\rho c p_g} \text{grad}(T_g) \right] = +\alpha_{g,D} A_v (T_s - T_g) \quad (4)$$

2.3 Stofferhaltungsgleichung

Da die Festphase im Boden keine Kontinuitätsgleichung besitzt, muss für beide veränderlichen Konzentrationen, jene der Organik und die des Wassers einer Erhaltungsgleichung (Formel 5) gelöst werden, welche lediglich die Reaktionsrate $r r_i$ und die zeitliche Konzentrationsänderung beinhaltet.

$$\frac{\partial(X_i)}{\partial t} = -r r_i \quad (5)$$

In der Gasphase (Formel 6) wird zusätzlich der konvektive und diffusive Stofftransport berücksichtigt.

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_g Y_i)}{\partial t} = -\text{div}(\varepsilon \vec{u} \rho_g Y_i) + \text{div}[\varepsilon \rho_g D(T)^{Eff}_{mix,i} \text{grad}(Y_i)] + r r_i \quad (6)$$

Diese Gleichung wird für O_2 , $H_2O(g)$, CH_4 und CO_2 gelöst, die Konzentration an N_2 ergibt sich durch den Massenerhalt, welcher durch die Kontinuitätsgleichung (Formel 2) beschrieben ist.

2.4 Trocknung und Pyrolyse

Die Reaktionsrate der Trocknung (Formel 7) und Kondensation wird über die Abweichung vom Sättigungsdampfdruck p^* und den Stoffübergang β nach Obot (Obot 2010) beschrieben.

$$r r_{H_2O} = A_v \beta \left(\frac{p^*_{M_{H_2O}}}{RT} - Y_{H_2O} \rho_g \right) \quad (7)$$

Die Pyrolyse des Bodens wurde auf Basis von Messungen der Thermogravimetrischen Analyse mit simultaner Abgasanalyse untersucht. Die Beschreibung erfolgt über einen durch den Massenanteil der Organik X_{org} limitierten Arrhenius-Ansatz (Formel 8) beschrieben. Als Bezugstemperatur wird die Temperatur der Festphase T_s verwendet.

$$r r = A e^{-\frac{T_b}{T_s}} \left(\frac{X_{org}}{X_{org,start}} \right)^n \quad (8)$$

2.5 Ergebnisse

Wenn keine Absaugung der Bodenluft erfolgt, wird der konvektive Wärmetransport weitgehend behindert. Der Boden wird im Nahbereich der Heizlanze erwärmt, hierbei verdunstet das Wasser, welches in kühleren Bereichen kondensiert. In Abbildung 1 sind die Bereiche erhöhten Wassers nahe der Zustellung zu erkennen. Die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Bodens beträgt lediglich ein Drittel des Bodens der Anfangsfeuchte. Dadurch sinkt der Wärmestrom in den Boden mit zunehmender Stärke der trockenen Schicht. Erreicht der Boden lokal eine Temperatur von 550 K wird die Organik zersetzt und die Wärmeleitfähigkeit sinkt weiter. Bei einer mittleren Lanzentemperatur von 1005 K beträgt die Schichtstärke des getrockneten Bereichs nach 11 Stunden und 40 Minuten lediglich 135 mm (Abbildung 1) in der nicht von der Zustellung beeinflussten Zone.

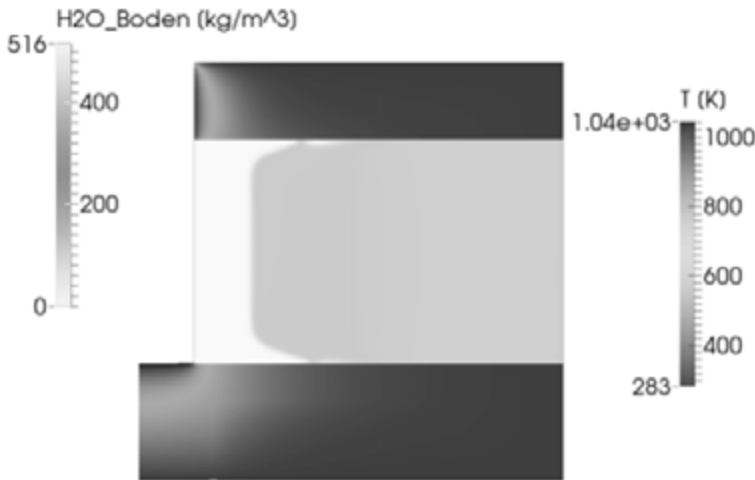


Abb. 1: Temperaturprofil der Zustellung und Wassergehalt des Bodens nach 11 Stunden und 40 Minuten bei einer mittleren Lanzentemperatur von 1005 K ohne gezielte Luftführung

Durch gezielte Luftführung, welche aus Injektionslanzen und Abauglanzen besteht, kann das Verhalten der Aufwärmung, Trocknung und Pyrolyse gezielt gesteuert werden. Hier dominiert die Konvektion den Wärmetransport und die geringe Wärmeleitfähigkeit des trockenen Bodens ist zweitrangig. In Abbildung 2 sind die deutlich größeren getrockneten Bereiche des Bodens nach 9 Stunden und 40 Minuten zu erkennen. Hier wurden durch die Rohre 18,75 NL/min an Luft im Nahbereich der Lanze indiziert und am Rand abgezogen.

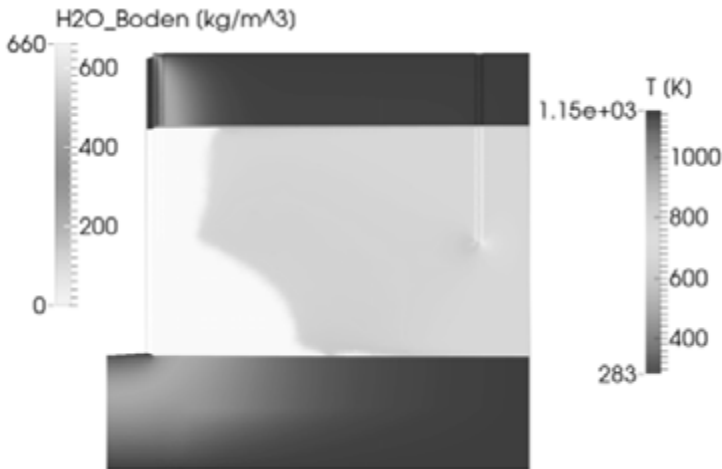


Abb. 2: Temperaturprofil der Zustellung und Wassergehalt des Bodens nach 9 Stunden und 40 Minuten bei einer mittleren Lanzentemperatur von 1150 K unter Verwendung gezielte Luftführung

3 VERSUCHSAUFBAU

Ziel des Versuchsaufbaus ist es, die wärmetechnischen Phänomene und ihr Verhalten in Bezug auf unterschiedliche Parameter für die Anwendung von THC experimentell zu untersuchen und damit die Simulationsmodelle zu evaluieren.

3.1 Aufbau

Ziel des Aufbaus ist es, eine Nachbildung des Bodenkörpers im Labormaßstab mit möglichst einfachen geometrischen Strukturen zu realisieren. Der Ansatz besteht in einem zylindrischen Aufbau, bei welchem die Möglichkeit besteht, den radialen Wärmetransport in den Vordergrund zu stellen. Im Zentrum des Aufbaus befindet sich die Heizlanze und der Außenmantel ist wasser-gekühlt. Um den axialen Wärmetransport zu unterbinden, befinden sich am Boden und im Deckel eine Feuerfestzustellung. In definierten Abständen zur Heizlanze, wurden radial Thermoelemente in 4 Ringen angeordnet und 150 mm in den Bodenkörper eingeführt. Für die Versuche mit der gezielten Luftkühlung wurden im äußeren Ring anstelle der Thermoelemente die Absauglanzen installiert.

3.2 Versuchsergebnisse und Vergleich zur Simulation

In der Simulation so wie in den Versuchen zeigt ich ein identes Verhalten. Der Boden wird zwischen 90 °C und 100 °C erwärmt, anschließend wird die Wärme zur Verdampfung des Verwendet. Die dadurch entstehende trockene Schicht wirkt als thermischer Widerstand. Die Temperatur der lanzennahen Messstellen steigt im trockenen Boden an. Abbildung 3 zeigt den Temperaturverlauf der Thermoelemente im Boden bei einer mittleren Lanzentemperatur von 918 °C bei 85 mm Lanzenabstand. Hier ist eine große Differenz der einzelnen Messstellen zu erkennen. Dies ist auf die Inhomogenität des Bodens zurückzuführen. Bei allen durchgeführten Versuchen befindet sich der temperaturverlauf des Modells innerhalb der Verläufe der Messstellen.

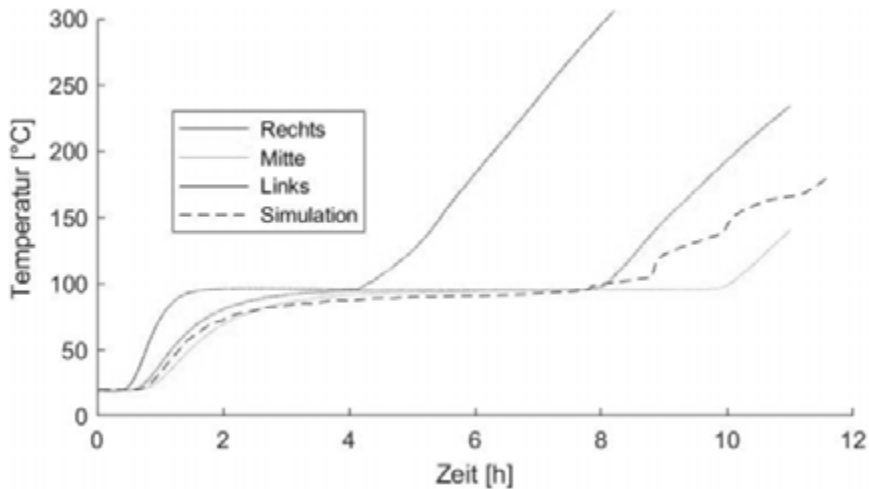
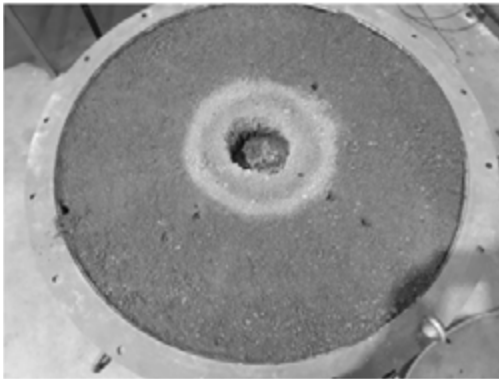


Abb. 3: Zeitlicher Temperaturverlauf der Thermoelemente bei einer mittleren Lanzentemperatur von 918 °C und einem Abstand von 85 mm zur Lanze

In Abbildung 4 ist die Oberfläche des Bodens bei ähnlichen Versuchsbedingungen mit und ohne gezielter Bodenluftführung dargestellt. Der getrocknete, so wie pyrolysierte Bereich wird, wie in der Simulation berechnet deutlich größer. Dieser tritt jedoch im Modell bodennah auf und in Versuch boden- und oberflächennah. Eine mögliche Ursache für dieses Verhalten ist ein Luftspalt zwischen Zustellung und Boden, welcher im Modell nicht abgebildet wurde.



a.) Oberfläche des Bodens nach 11 Stunden und 40 Minuten bei einer mittleren Lanzentemperatur von 1005 K ohne gezielte Luftführung



b.) Oberfläche des Bodens nach 9 Stunden und 40 Minuten bei einer mittleren Lanzentemperatur von 1150 K unter Verwendung gezielter Luftführung

Abb. 4: Oberfläche des Bodens, es ist der getrocknete und pyrolysierte Bereich zu erkennen

4 PLANUNGSTOOL

Das Modell für das Planungstool beinhaltet simplifizierte Ansätze und liefert trotzdem brauchbare Ergebnisse. Grundsätzlich dient das Tool zur Auslegung und besseren Abschätzung der Betriebsdauer von Sanierungsvorhaben.

4.1 Konzept und Aufbau des Tools

Über eine geleitete Eingabeprozedur können die Eckdaten der Sanierungsfläche eingegeben werden. Nach Eingabe der Hauptabmessungen können die Bodenschichten in unterschiedlichen Tiefen aus einer Datenbank gewählt werden und liefern somit ein dreidimensionales Abbild der Sanierungsfläche. Für jede Bodenart sind Parameter wie Dichte, Porosität und der Durchlässigkeitswert für Wasser in der Datenbank vorhanden. Die Daten für spezifische Wärmekapazität sowie die horizontale und vertikale Wärmeleitfähigkeit der jeweiligen Bodenart beinhalten Polynomparameter mit welchen die temperaturabhängigen Werte im Tool errechnet werden können. Die Eingabe der Kontaminationen erfolgt über ein Setzen von Koordinaten und Daten aus Erkundungsbohrungen mit welchen die Kontaminationen in den jeweiligen Tiefen beschrieben werden können. Für den auszuwählenden Schadstoff selbst werden die notwendigen Stoffparameter ebenfalls aus einer Datenbank ausgelesen. Die Bereiche zwischen den Erkundungsbohrungen werden automatisch mit einem Algorithmus auf Basis von Zufallszahlen interpoliert. Dadurch kann eine Abschätzung der Schadstoffverteilung im Sanierungsfeld als Ausgangsbasis angesetzt werden. Mit Hilfe dieser errechneten Daten werden für unterschiedliche Heizlanzenabstände in den kontaminierten Bereichen Heiz- und Absaugungslanzen automatisch verteilt. Für unterschiedliche Lanzenabstände können im Planungstool dadurch unterschiedliche Varianten durchgerechnet werden. Dadurch ist es möglich eine Abschätzung zur optimalen Lanzenanordnung zu errechnen, bei welcher der größte Sanierungserfolg mit entsprechend geringem Energieeinsatz möglich ist.

4.2 Eckdaten und Modelle des Tools

Im Modell zur Berechnung der Wärmeausbreitung findet der Wärmetransport zum Teil durch Wärmeleitung statt und wird durch den Wärmestrom des verdampfenden und kondensierenden Wasseranteils ergänzt. Zudem wird der Wärmetransport um einen „quasistationären“ Gasströmungsanteil erweitert, um die Luftinjektion und Luftabsaugung einzubinden. Somit kann der verdampfende und kondensierende Wasseranteil auch anteilmäßig auf oder von die umliegenden Bereiche aufgeteilt werden. Die Ergebnisse der Modellrechnung wurden mit den Ergebnissen aus den Versuchen verglichen. Für drei Messpunkte mit radial unterschiedlichen Abständen zeigt Abbildung 5 die Temperaturverläufe. Die durchgezogenen Linien sind die Werte aus den Messungen und die strichliert gezogenen Linien zeigen die Ergebnisse der vereinfachten Modellrechnung. Dabei sind die Messdaten aus den Mittelwerten von jeweils vier in Umfangsrichtung gelegenen Messstellen errechnet um den Einfluss der Inhomogenität des Bodens zu vermindern.

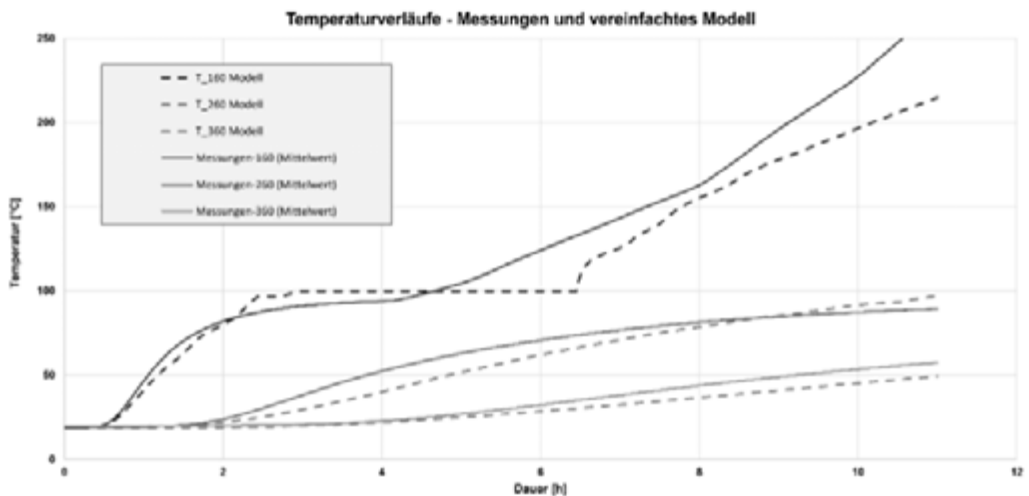


Abb. 5: Vergleich von Messungen und vereinfachtem Modell

Mit einem gekoppelten Schadstofftransportmodell werden auch die Schadstoffströme errechnet, welche über den Gasstrom zu den Absaugungslanzen transportiert und dort ausgetragen werden. Aufgrund unterschiedlicher Schadstoffeigenschaften ergeben sich für jeden Schadstoff eigene Austragsverhalten. Der Schadstoffübergang von der Schadstoffquelle in oder aus der Gasströmung erfolgt mittels einem Filmdiffusionsmodell. Der Schadstofftransport in der Gasphase folgt, wie auch der Wasserdampftransport über den Ansatz des „quasistationären“ Gasströmungsmodells.

In Abbildung 6 ist der zeitliche relative Sanierungserfolg zweier Schadstoffe für einen angesetzten Fall gegenübergestellt und sollte hier nur einen qualitativen Vergleich liefern. Das leichter flüchtige Dichlormethan kann bereits am Beginn bei geringeren Temperaturen sehr gut ausgetragen werden, wobei das Tetrachlorethen mit seinem höheren Siedepunkt erst zu einem späteren Zeitpunkt einen Sanierungserfolg aufweist. Bedingt durch die Temperatursausbreitung in Richtung der Absaugungslanze verzögert sich der Austrag von Tetrachlorethen somit gekoppelt mit dem Wärmetransport.

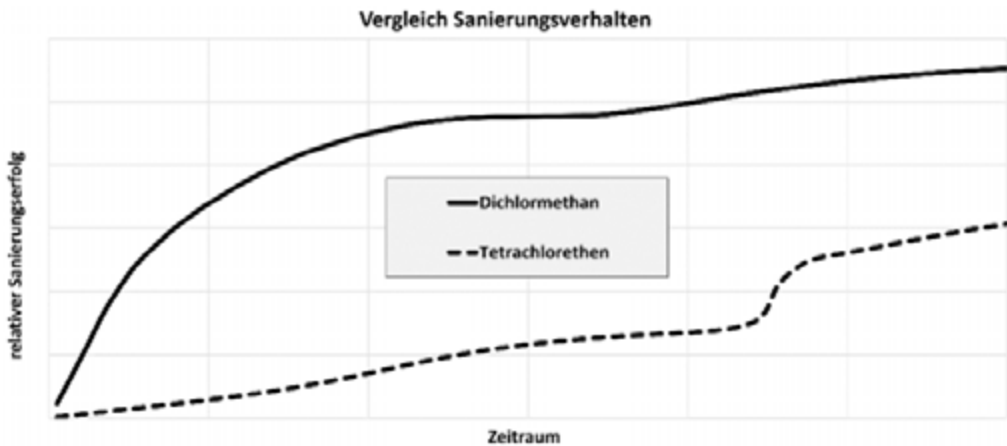


Abb. 6: Vergleich von Sanierungsverhalten

Für jeden bestimmten Lanzenabstand können im Planungstool der Sanierungserfolg und der Energieeinsatz für Heizung und Luftgebläse ausgewertet werden. Die Ausgabe des optimalen Lanzenabstandes für den effizientesten Sanierungserfolg stellt ein wesentliches Ergebnis dar. Für eine Auslegung kann eine Anordnung mit diesen optimalen Lanzenabständen gewählt werden. Die Ergebnisse von Heizleistung- und Temperaturverläufe sowie der Schadstoffausträge über den Zeitraum werden in einer Massen- und Energiebilanzierung für die optimale Lanzenanordnung verwendet. Dadurch kann eine genauere Kostenabschätzung des Sanierungsvorhabens erstellt werden.

5 SCHLUSSFOLGERUNG

Mit Hilfe des entwickelten Planungstools können die zu erwartenden Schadstoffausträge und Energieeinsätze sowie die Auslegungen von thermisch unterstützten Sanierungsvorhaben abgeschätzt werden. Dadurch ergeben sich wesentliche Vorteile in der Planung von Sanierungsanordnungen und Abschätzung von Kosten, Sanierungsdauer und Sanierungserfolg.

LITERATUR

- Caretto, L. S., Gosman, A. D., Patankar, S. V., & Spalding, D. B. (1972). Two Calculation Procedures for Steady, Three-Dimensional Flows With Recirculation. In *Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Fluid Mechanics* (S. 60-68). Springer.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris.
- Gunn, D. J. (1978). Transfer of heat or mass to particles in fixed and fluidised beds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 21(4), MusterBAND, S. 467-476.
- Obot, N. T. (2010). Toward a better understanding of friction and heat/mass transfer in microchannels – A literature review. In *Thermophysical Engineering* (S. 155-173).
- The OpenFOAM Foundation Ltd. (2015). Von <https://github.com/OpenFOAM/> OpenFOAM-2.4.x abgerufen

InnoBLA III: Auswirkungen der thermischen Bodenbehandlung auf die Mobilität von Schwermetallen und die Korrosion von Heizlanzen

D. Vollprecht^{1,2}, J. Kern^{1,3}, I. Berrer¹, J. Riedl⁴, G. Mori⁴ & T. Sattler¹

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

²⁾ Universität Augsburg, Lehrstuhl für Resource and Chemical Engineering, Augsburg, Deutschland

³⁾ VTU Engineering GmbH, Wien, Österreich

⁴⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Allgemeine und Analytische Chemie, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Im Projekt InnoBLA wurde die Auswirkung der thermischen Behandlung von Böden auf die Mobilität von Schwermetallen und die Korrosion der Heizlanzen untersucht. Dabei wurden fünf Bodenproben thermisch behandelt ($t = 7$ d, $T = 105$ °C, 300 °C, 500 °C) und danach pH-abhängigen Elutionsversuchen unterzogen. Zum anderen wurde ein Hüllrohr (Edelstahl 304) nach dem Einsatz im Feld mittels Licht- und Elektronenmikroskopie sowie Röntgenfluoreszenzanalyse charakterisiert. Zur Optimierung des Lanzenmaterials wurden Proben von 15 weiteren Legierungen zunächst unter Argon thermisch behandelt (24 h, 750 °C), dann in einer Elektrolytlösung ausgelagert (120 h, 236 mL H_2SO_4 , 25 g $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, 400 mL Wasser) und die Abtragsrate lichtmikroskopisch bestimmt. Die Elutionsversuche zeigen, dass die thermische Behandlung die Mobilität jener Schwermetalle, die Oxyanionen bilden können (z.B. Cr) tendenziell verringert, während bei kationisch auftretenden Schwermetallen (z.B. Pb und Zn) der umgekehrte Effekt eintritt, was darauf zurückgeführt werden kann, dass thermisch behandelte Böden stärker alkalisch reagieren. Diese Beobachtung ist im Einklang mit den Ergebnissen der Modellierungen, denen zufolge die Freisetzung der Schwermetalle überwiegend durch Adsorptionsprozesse kontrolliert wird. Die Korrosionsuntersuchungen zeigen, dass sich bei der Erhitzung der Proben Cr-reiche Carbide ausscheiden und es später durch den Elektrolyten zu einer interkristallinen Korrosion kommt. Die Legierungen X1NiCrMoCu31-27.4, X10CrAl25 und X18CrN28 zeigen dagegen eine Abtragsrate von <1 g/(m²a).

1 EINLEITUNG

1.1 Mobilität von Schwermetallen

Die Auswirkungen der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung mit festen Wärmequellen (thermal conduction heating, TCH) auf die Mobilität von Metallen sind noch wenig erforscht. Eine Forschergruppe zeigte einen Anstieg der Mobilität von Fe und Al (Roh, et al., 2000), eine andere erklärte eine erhöhte Ökotoxizität durch eine Änderung der Speziation von Schwermetallen (Bonnard, Devin, Leyval, Morel, & Vasseur, 2010), eine weitere beobachtete einerseits eine schwächere Sorption durch Zerstörung der organischen Substanz, aber auch eine Umverteilung von Fe und Zn in schwerer lösliche Fraktionen (Biache, Mansuy-Huault, Faure, Munier-Lamy, & Leyval, 2008). Die wenigen existierenden Studien zu diesem Thema basieren auf dem rein empirischen Prinzip der sequentiellen Extraktion, welche weder die realen Mechanismen, welche die Mobilität kontrollieren, berücksichtigt, noch die reale Speziation der Schwermetalle untersucht.

1.2 Korrosion von Heizlanzen

Beim Einsatz von Heizlanzen im Feld treten erfahrungsgemäß Korrosionsprozesse auf. Dezierte wissenschaftliche Untersuchungen der Korrosion durch TCH fehlen jedoch, obwohl zur Korrosion der für die Hüllrohre standardmäßig eingesetzten Legierung 304 eine umfangreiche Literatur existiert. Die Einwirkung von KCl und K_2CO_3 vor der Erhitzung in feuchter Atmosphäre (5 % O_2 , 40 % H_2O) auf 500 bis 600 °C führte zur Bildung von K_2CrO_4 und nach Lösung des darin enthaltenen Cr(VI) zur Bildung einer Doppelschicht aus Hämatit (Fe_2O_3) und Spinellphasen (Pettersson, Folkeson, Johansson, & Svensson, 2011). Ein Korrosionsmechanismus, der unter derartigen Bedingungen auftreten kann, ist die interkristalline Korrosion infolge der Verarmung

an Chrom und der Bildung chromreicher Ausscheidungen. Diese Sensibilisierung kann durch Diffusion von Chrom aus der Kornmatrix an den Verarmungssaum der Korngrenze wieder neutralisiert werden. Die chromreichen Ausscheidungen bleiben vorhanden (Kina, Souza, Tavares, Pardal, & Souza, 2008).

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Mobilität von Schwermetallen

Im Projekt InnoBLA wurde die Auswirkung der thermischen Behandlung von Böden auf die Mobilität von Schwermetallen und die Korrosion der Heizlanzen untersucht. Dabei wurden fünf Bodenproben thermisch behandelt ($t = 7$ d, $T = 105$ °C, 300 °C, 500 °C) und danach pH-abhängigen Elutionsversuchen (EN 14429) unterzogen. Mittels hydrogeochemischer Modellierung (LeachXSTTM) wurden Hypothesen aufgestellt, welche Prozesse die Mobilität der Schwermetalle kontrollieren und in welcher Speziation die Schwermetalle vor und nach der thermischen Behandlung vorliegen, und diese durch Elektronenstrahlmikrosonde experimentell getestet.

2.2 Korrosion von Heizlanzen

Ein Hüllrohr (Edelstahl 304, 18 % Cr, 8 % Ni) einer Heizlanze wurde nach dem Einsatz im Feld mittels Licht- und Elektronenmikroskopie sowie Röntgenfluoreszenzanalyse charakterisiert. Zur Optimierung des Lanzenmaterials wurden Proben von 15 weiteren Legierungen zunächst unter Argon thermisch behandelt (24 h, 750 °C), dann in einer Elektrolytlösung ausgelagert (120 h, 236 mL H₂SO₄, 25 g Fe₂(SO₄)₃, 400 mL Wasser) und die Abtragsrate lichtmikroskopisch bestimmt.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Mobilität von Schwermetallen

Die Elutionsversuche zeigen, dass die thermische Behandlung die Mobilität jener Schwermetalle, die Oxyanionen bilden können (z.B. Cr) tendenziell verringert, während bei kationisch auftretenden Schwermetallen (z.B. Pb und Zn) der umgekehrte Effekt eintritt, was darauf zurückgeführt werden kann, dass thermisch behandelte Böden stärker alkalisch reagieren (Abb. 1). Diese Beobachtung ist im Einklang mit den Ergebnissen der Modellierungen, denen zufolge die Freisetzung der Schwermetalle überwiegend durch Adsorptionsprozesse kontrolliert wird (Abb. 2). Dies bedeutet, dass sich die primären Phasen, wie z.B. in einer bei 500 °C behandelten Bodenprobe der Altlast ST 32, Phosphohedyphan, Ca₂Pb₃(PO₄)₃Cl, oder Pyromorphit, Pb₅[Cl]((PO₄)₃), (Abb. 3) zunächst partiell auflösen und das mobilisierte Pb dann z.B. an Eisenhydroxide adsorbiert wird.

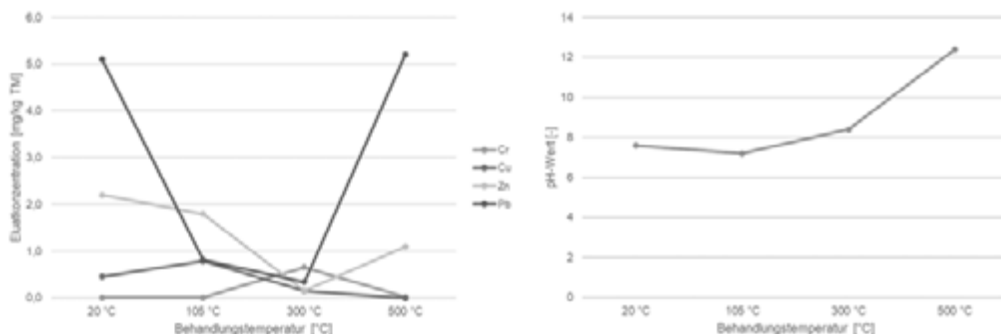


Abb. 1: Auslaugung von Cr, Cu, Zn und Pb (links) sowie die Entwicklung des pH-Wertes (rechts) als Funktion der Vorbehandlungstemperatur der Probe ST 32

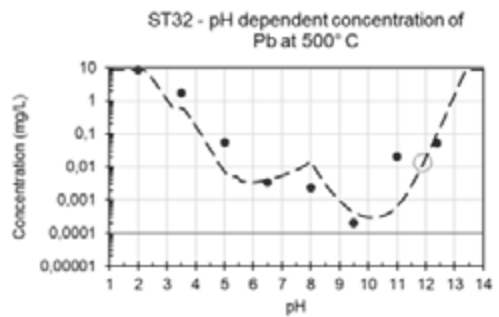
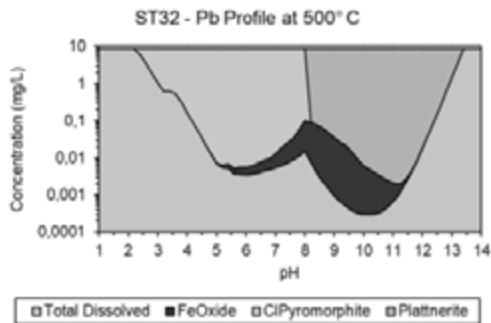


Abb. 2: Löslichkeitskontrollierende Prozesse (links); gemessene (rote Punkte) und modellierte (blaue Linie) Eluatkonzentrationen (rechts) von Pb in der bei 500 °C behandelten Probe ST 32

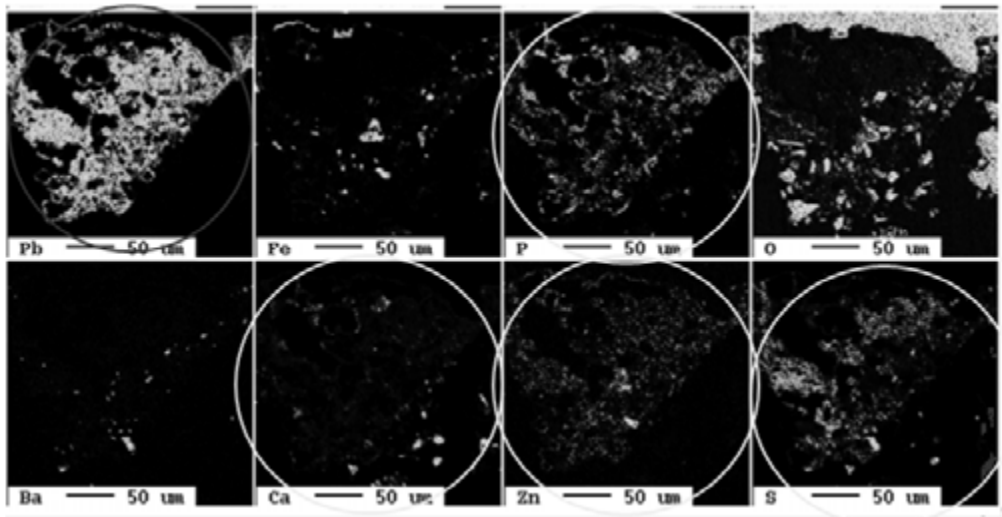


Abb. 3: Elementverteilungskarten der bei 500 °C thermisch behandelten Probe ST 32

3.2 Korrosion von Heizlanzen

Die Untersuchungen des Hüllrohres aus dem Feldbetrieb zeigen eine unregelmäßige, lokal tiefgreifende Korrosion an der Außenseite und eine gleichförmige, oberflächliche Korrosion mit Bildung von Eisenoxid bzw. Chrom-Eisen-Oxid an der Innenseite (Abb. 4).

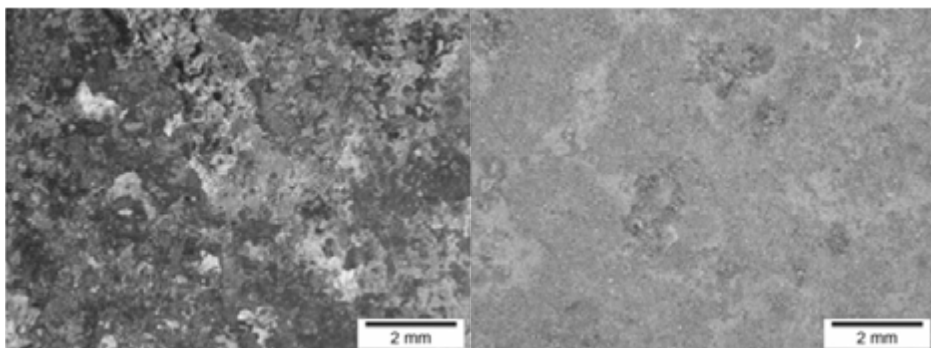


Abb. 4: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Korrosionserscheinungen auf der Außenseite (links) und Innenseite (rechts) eines Hüllrohres aus dem Einsatz im Feld

Die beobachtete Korrosion entstand, da einerseits bei 650 °C eine Ausscheidung von Korngrenzenphasen der Zusammensetzung (Fe,Cr)₂₃C₆ stattfand („Sensibilisierung“) und andererseits ein wässriger Elektrolyt an der Probenoberfläche in diesem Bereich vorlag, der durch Reaktion mit diesen Carbiden eine interkristalline Korrosion bis in eine Tiefe von über 500 µm bewirkte. Die Untersuchungen zur Materialauswahl zeigen, dass die Legierungen X1NiCrMoCu31-27.4, X10CrAl25 und X18CrN28 eine Abtragsrate von <1 g/(m²a) aufweisen.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Die Elutionsversuche zeigen, dass die thermische Behandlung die Mobilität jener Schwermetalle, die Oxyanionen bilden können (z.B. Cr) tendenziell verringert, während bei kationisch auftretenden Schwermetallen (z.B. Pb und Zn) der umgekehrte Effekt eintritt, was darauf zurückgeführt werden kann, dass thermisch behandelte Böden stärker alkalisch reagieren. Diese Beobachtung ist im Einklang mit den Ergebnissen der Modellierungen, denen zufolge die Freisetzung der Schwermetalle überwiegend durch Adsorptionsprozesse kontrolliert wird. Die Korrosionsuntersuchungen zeigen, dass sich bei der Erhitzung der Proben Cr-reiche Carbide ausscheiden und es später durch den Elektrolyten zu einer interkristallinen Korrosion kommt. Die Legierungen X1NiCrMoCu31-27.4, X10CrAl25 und X18CrN28 zeigen dagegen eine Abtragsrate von <1 g/(m²a). Zusammenfassend ist daher zu empfehlen, vor einer Altlastensanierung mittels TCH

- eine Co-Kontamination, insbesondere mit kationisch vorliegenden Schwermetallen gründlich zu überwachen und
- bei der Materialauswahl der Heizanlagen korrosionsbeständige Legierungen einzusetzen.

5 DANKSAGUNG

Das Projekt „InnoBLA - Innovationen für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung“ wird vom österreichischen Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie über die Kommunalkredit Public Consulting im Rahmen des Programms „Altlastenforschung“ unter der Projektnummer B920029 gefördert.

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie



LITERATUR

- Biache, C., Mansuy-Huault, L., Faure, P., Munier-Lamy, C., & Leyval, C. (2008). Effects of thermal desorption on the composition of two coking plant soils: Impact on solvent extractable organic compounds and metal bioavailability. *Environmental Pollution*, 156, S. 671-677.
- Bonnard, M., Devin, S., Leyval, C., Morel, J., & Vasseur, P. (2010). The influence of thermal desorption on genotoxicity of multipolluted soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73, S. 955-960.
- Kina, A., Souza, V., Tavares, S., Pardal, J., & Souza, J. (2008). Microstructure and intergranular corrosion resistance evaluation of AISI 304 steel for high temperature service. *Materials characterization*, 59(5), S. 651-655.
- Pettersson, J., Folkesson, N., Johansson, L., & Svensson, J. (2011). The Effects of KCl, K₂SO₄ and K₂CO₃ on the High Temperature Corrosion of a 304-Type Austenitic Stainless Steel. *Oxidation of Metals*, 76, S. 93-109.
- Roh, Y., Edwards, N., Lee, S., Stiles, C., Armes, S., & Foss, J. (2000). Thermal treated soil for mercury removal: soil and phytotoxicity tests. *Journal of Environmental Quality*, 29, S. 415-424.

Bestandsnutzung und Brachflächenrecycling vs. Grüne Wiese - Vorteile und Risikominimierungsoptionen

C. Kienreich¹, D. Vorraber¹, A. Ragossnig¹ & J. Maier¹

¹⁾ RM Umweltkonsultanten ZT GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Aufgrund der Flächeninanspruchnahme und Versiegelung von Neuf Flächen und dem damit einhergehenden Verlust biologisch produktiver Bodenfläche legt sich der Fokus vermehrt auf die Revitalisierung von Brachflächen. Diese Flächen, vor allem ehemalige Industrie- und Gewerbestandorte, welche aktuell ungenutzt sind, sollten unter dem Aspekt der Reduktion der Verbauung von Neuland und dem Erhalt unserer Umwelt einer Wiederverwendung zugeführt werden. Aufgrund des damit verbundenen Risikos von Kontaminationen am Standort bestehen jedoch derzeit noch Vorbehalte gegenüber dem Brachflächenrecycling. Um dieses Risiko zu minimieren, ist die Durchführung von Standortuntersuchungen essenziell. Zur Förderung des Flächenrecyclings wurde daher in Österreich 2022 die Möglichkeit geschaffen, diese Voruntersuchungen teilweise durch Fördergelder zu finanzieren, um damit die Nutzung von Brachflächen attraktiver zu machen.

1 EINLEITUNG

Die Flächeninanspruchnahme, darunter ist die Verbauung von biologisch produktivem Boden zu verstehen, stellt in Österreich ein wachsendes ökonomisches und ökologisches Problem dar. Die Auswirkungen zeigen sich einerseits im Verlust der biologischen Bodenfunktion sowie der Produktivität des Bodens, aber auch in der Beeinträchtigung der biologischen Vielfalt und der Staubbindefähigkeit, dem vermehrten Hochwasserrisiko und der Veränderung des Mikroklimas, da versiegelte Böden aufgrund der verringerten Verdunstungsfähigkeit lokal zu einem Temperaturanstieg führen. Abb. 1 zeigt die Entwicklung der Flächeninanspruchnahme / Versiegelung seit 2001.



Abb. 1: Jährliche Flächeninanspruchnahme in Österreich (Umweltbundesamt GmbH 2022)

Der 3-Jahresmittelwert lag 2020 bei 42 km² verbauter Fläche pro Jahr. Demnach wurden täglich 11,5 ha produktiver Boden verbaut. Der versiegelte Anteil dieser Flächen betrug 2018 - 2020 rund 40 %. In diesen rund 15 - 20 km² pro Jahr stirbt, bedingt durch die wasser- und luftundurchlässige Abdichtung des Bodens, die Bodenflora und -fauna ab. Der rote Balken in Abb. 1 stellt den Zielwert der maximalen Flächeninanspruchnahme für 2030 von 9 km² pro Jahr bzw. 2,5 ha pro Tag dar. Der Hauptanteil der Flächeninanspruchnahme wird seit 2013 durch Betriebsflächen sowie Wohn- und Geschäftsgebiete verursacht (Umweltbundesamt GmbH 2022).

2 FLÄCHENRECYCLING

Die Idee des Brachflächenrecyclings ist, vorrangig aktuell ungenutztes Bauland ehemaliger Industrie- und Gewerbestandorte zu nutzen, um gleichzeitig biologisch produktiven Bodenbestand zu schonen (Umweltbundesamt GmbH 2008). Es existiert in Österreich weder eine einheitliche Definition für das Wort „Brachfläche“ noch eine allgemein gültige Unterteilung in verschiedene Typen. Es kann jedoch anhand verschiedener Kriterien eine Einteilung in Brachflächentypen erfolgen. Eine Möglichkeit stellt die Unterteilung nach Vornutzung dar, wie in Abb. 2 dargestellt.



Abb. 2: Arten von Brachflächen abhängig von der vorangegangenen Nutzung (Zimak 2020)

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Unterteilung von Flächen nach ihrer Eignung zum Recycling bzw. ihrer Rentabilität, wie in Abb. 3 ersichtlich.

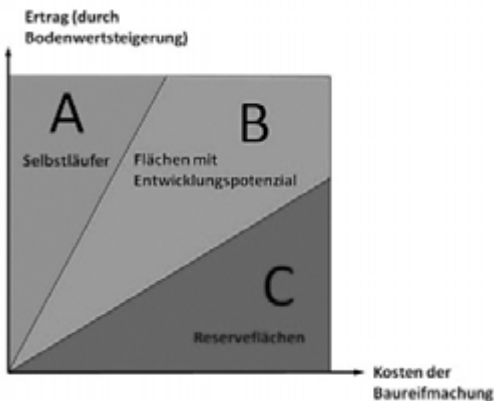


Abb. 3: ABC-Modell zur Einteilung von Brachflächen nach Rentabilität der Flächenentwicklung (Umweltbundesamt GmbH 2020)

Als „Typ A“ sind Flächen zu bezeichnen, deren Ertrag aller Wahrscheinlichkeit nach weit über den erforderlichen Kosten liegt. „Typ B“ sind Flächen, bei denen aufgrund von Risiken die Rentabilität nicht gesichert ist. Für solche Flächen müssen vorab Maßnahmen zur Risikominimierung (vgl. Kapitel 2.2) getroffen werden. Unter „Typ C“ fallen all jene Flächen, bei denen die anfallenden Kosten den zu erwartenden Betrag deutlich übersteigen (Umweltbundesamt GmbH 2008).

2.1 Probleme und Risiken

Dem Brachflächenrecycling stehen Bauträger vielfach noch skeptisch gegenüber. Die Hauptgründe dafür sind die Angst vor unbekannten Kontaminationen auf dem gegenständlichen Grundstück und eine damit einhergehende, nicht planbare Kostenzunahme und Bauzeitverzögerung. Bei bebauten Brachflächen stehen Bauträger zusätzlich vor der Herausforderung des Abbruchs

bzw. geordneten Rückbaus des Gebäudebestands (Umweltbundesamt GmbH 2020). Weiters besteht auch Unsicherheit bezüglich der Haftung bei Umweltschäden infolge von Kontaminationen. Zivilrechtliche Übereinkommen können zur Minimierung dieses Haftungsrisikos beitragen (Umweltbundesamt GmbH 2008). Zur Minimierung des Risikos durch bestehende (unbekannte) Kontaminationen ist jedoch auch die Durchführung diverser Vorarbeiten erforderlich. Dazu zählen etwa Schad- & Störstofferkundungen von Gebäuden, Gefährdungsabschätzungen mit Untersuchungen des Untergrundes und/oder des Grundwassers sowie grundlegende Charakterisierungen des anfallenden Aushubmaterials. Für durch derartige Vorarbeiten anfallende Mehrkosten kann in Österreich seit 2022 eine Förderung (BMK 2022) durch die Kommunalkredit Public Consulting GmbH (KPC) beantragt werden. Tatsächlich weist nur ein kleiner Teil der jährlich anfallenden Brachflächen Kontaminationen auf. Der Anteil jener Flächen, bei denen der Verdacht auf eine Kontamination besteht, ist ebenfalls gering im Vergleich zu den gesamten Brachflächen (vgl. Abb. 4).

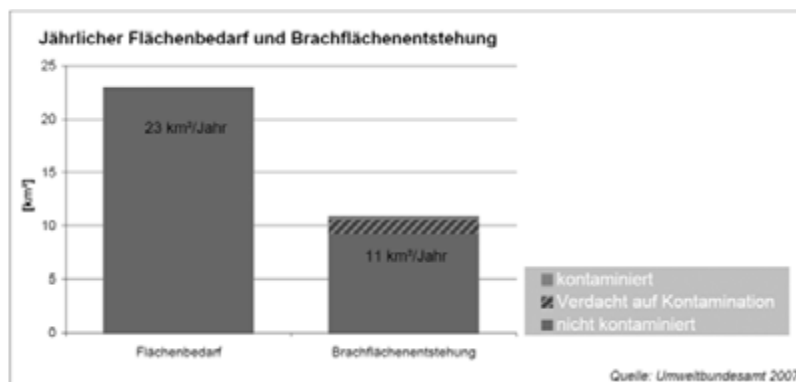


Abb. 4: Gegenüberstellung Flächenbedarf und Brachflächenentstehung mit Darstellung des Anteils kontaminierter Brachflächen (Umweltbundesamt GmbH 2008)

Weitere Probleme im Zusammenhang mit Brachflächenrecycling ergeben sich durch die fehlende Flexibilität bzgl. des Standortes, da der Standort von geeigneten Brachflächen unter Umständen nicht dort liegt, wo auch tatsächlich Flächen zur Entwicklung benötigt werden (Umweltbundesamt GmbH 2008). Zudem ist auf die Größe, die Geometrie und die Topografie der vorliegenden Fläche bei der Planung Rücksicht zu nehmen (Zimak 2020).

2.2 Warum Flächenrecycling?

Trotz der damit verbundenen Risiken sollte das Flächenrecycling, wenn möglich, dem Verbau von Neuf Flächen vorgezogen werden. Ganz allgemein bietet die Wiedernutzung von Brachflächen im Vergleich zum Verbau von Neuland diverse Vorteile, welche sowohl ökonomischer als auch ökologischer Natur sind:

- Biologisch produktiver Boden erfüllt eine Vielzahl wesentlicher Aufgaben in unserer Umwelt. Zudem ist die Neubildung von Boden bis zur Wiederherstellung der ursprünglichen Fruchtbarkeit des Bodens ein äußerst langsamer Prozess und dauert in der Regel mehrere hundert Jahre, weshalb aus ökologischer Sicht die Nutzung von Brachflächen zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme zu bevorzugen ist (Umweltbundesamt GmbH 2022, Lexer o.J.).
- Der zunehmende Flächenverbrauch in Kombination mit der aufgelockerten Siedlungsweise führt neben dem Verlust landwirtschaftlicher Flächen auch zur Begrenzung des Lebensraumes für Tiere und Pflanzen (ÖROK 2017). Dem kann durch die Wiedernutzung brachliegender Flächen entgegengewirkt werden.
- Durch die stete Versiegelung nimmt die Gefahr von Hochwasserschäden zu, da weniger natürlicher Boden für die Wasseraufnahme und -speicherung zur Verfügung steht (ÖROK 2017). Durch die Nutzung von Brachflächen kann die Versiegelung von Neuland reduziert werden.

Neben diesen allgemeinen Vorteilen ergeben sich durch Brachflächenrecycling auch Vorteile für Bauträger, ebenso wie für die Städte oder Gemeinden, in denen diese Flächen situiert sind:

- Häufig verfügen bestehende Brachflächen bereits über eine nutzbare Infrastruktur. Bei bebauten Brachflächen ist zudem unter Umständen die Nutzung bestehender Gebäude möglich, was neben den positiven Umwelteffekten auch zu Kosteneinsparungen führen kann (Umweltbundesamt GmbH 2008).
- Je nach Lage der zu recycelnden Brachfläche kann eine Wiederbelebung des Gebiets und eine vermehrte Ansiedlung erreicht werden. Bei bebauten Flächen kann zusätzlich alte Bausubstanz miteinbezogen werden und neue Projekte lassen sich so in das Ortsbild besser integrieren (Umweltbundesamt GmbH 2008).

2.3 Risikominimierung

Um Zeitverzögerungen und unerwartete Kostenaufwände zu verhindern, kann die Durchführung von Vorarbeiten Abhilfe schaffen. Dazu zählen unter anderem:

- Schad- und Störstofferkundung nach ÖNORM B 3151 (ASISI 2022) und ÖNORM EN ISO 16000-32 (ASI 2014)
- Gefährdungsabschätzung nach ÖNORM S 2088 (ASISI, 2018)
- Grundlegende Charakterisierung nach Deponieverordnung
- Environmental Phase Assessment Phase I & II nach ASTM E 1527-21 (vorab ASTM E 1527-13) (internationaler Rahmen) (ASTM, 2021)

Im Zuge dieser Untersuchungen wird die vorhandene Bausubstanz untersucht, die anfallenden Mengen verschiedener Abfälle beim Abbruch bestimmt und das Vorhandensein von Störstoffen (z.B. Holz, Gipskarton, Glas) und Schadstoffen (z.B. asbesthaltiges Material, mineralölhaltige Bauteile, Schlacken oder Aschen) geprüft.

Für die Flächen selbst wird im Zuge einer Gefährdungsabschätzung die Historie ermittelt und basierend auf den anzuwendenden Normen ein Untersuchungsplan für die gegenständliche Fläche erarbeitet, um die Situation in Untergrund und Grundwasser darzustellen. Anhand der durchgeführten Analytik kann ein Kontaminationsverdacht bestätigt und konkretisiert oder ausgeräumt werden. Sollten tatsächlich Kontaminationen gefunden werden, so ist die fachliche Begleitung bei Aushub und Abbruch, Planung der Sicherung & Sanierung sowie bei der Generierung von Fördermitteln relevant für einen zeit- / kostenoptimierten Ablauf der Flächenentwicklung. Für solche Anforderungen stehen Ingenieurbüros, wie die RM UMWELTKONSULENTEN ZT GMBH, zur Verfügung.

2.4 Förderung

Um die Attraktivität des Flächenrecyclings zu steigern, wird für Projekte, deren Ziel die Wiedernutzung und Entwicklung aktuell nicht genutzter bzw. nicht entsprechend genutzter Flächen ist und die somit zu einer Verringerung der Flächeninanspruchnahme und Verbesserung des Umweltzustandes führen, eine Förderung angeboten. Anspruch auf Förderung besteht für folgende Maßnahmen (Auszug aus den Förderrichtlinien; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie 2022):

- Erstellung von Entwicklungskonzepten für Flächen und Objekte bzw. Objektteile, z.B. Machbarkeitsstudien, Variantenuntersuchungen, Bedarfserhebung
- Untersuchung des Untergrundes und der Bausubstanz der betroffenen Flächen und Objekte bzw. Objektteile, sofern dies zweckmäßig ist
- Vorbereitung von Maßnahmen, die einen standortbedingten Mehraufwand, wie beispielsweise geotechnische Maßnahmen oder Emissionsminimierung, darstellen, darunter fallen Identifikation und Definition des standortbedingten Mehraufwandes, Vorplanung sowie Kostenschätzung

Das bedeutet für Bauträger, dass Voruntersuchungen, wie etwa Schad- & Störstofferkundungen oder Gefährdungsabschätzung mit Untergrunduntersuchungen von Brachflächen unter dem Aspekt der Entwicklung und Wiedernutzung dieser Flächen förderungsfähig ist. Durch diese Maßnahme wird der potentielle finanzielle Nachteil, der sich aus der Entwicklung solcher Flächen im

Vergleich zur Grünen Wiese ergibt, reduziert und das Flächenrecycling für Bauträger attraktiver gestaltet.

2.5 Praxisbeispiel

Die RM UMWELTKONSULENTEN ZT GMBH weist bereits ein breites Spektrum an Erfahrungen mit den genannten Voruntersuchungen nach nationalen bzw. internationalen Vorgaben im In- und Ausland auf. Ein Beispiel für solch eine Untersuchung ist die Entwicklung einer Brachfläche im Grazer Umland. Ziel des Projekts war die Neuerrichtung einer Wohnanlage unter teilweiser Einbindung des vorhandenen Gebäudebestands. Der restliche Gebäudebestand wurde nach Durchführung einer Schad- & Störstofferkundung abgebrochen. Für den anfallenden Aushub wurde eine Grundlegende Charakterisierung nach Deponieverordnung durchgeführt. Nachstehend sind die verschiedenen Projektphasen abgebildet.



Abb. 5: Brachfläche mit abzubrechendem Gebäudealtbestand (RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, 2020)

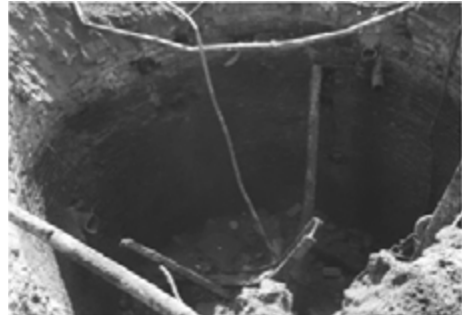


Abb. 6: Ziegelbauwerk im Untergrund mit Fäkal- und Ölkontaminationen (RM Umweltkonsulenten ZT GmbH 2020)



Abb. 7: Abbruch und zu erhaltendes Gebäude (RM Umweltkonsulenten ZT GmbH 2020)



Abb. 8: Entwicklungskonzept - Bestand & neue Gebäude (Scherzer+Valent Architekten 2019)

Abb. 5 zeigt die Brachfläche und den Gebäudebestand bei der Erstellung von Schürfen für die Grundlegende Charakterisierung. Auf Abb. 6 ist ein unterirdisches Ziegelbauwerk abgebildet, in dessen Umgebung Öl- und Fäkalverunreinigungen erkundet wurden. Abschließend ist ein Foto des Abbruchprozesses (Abb. 7) ersichtlich mit dem Gebäude, welches in der Studie (Abb. 8) zur geplanten neuen Wohnanlage als zentraler Teil erhalten bleibt, abgebildet.

3 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die Skepsis bei der Planung von neuen Projekten auf Brachflächen beruht hauptsächlich auf der Angst vor bestehenden Kontaminationen, welche in weiterer Folge zu Zeitverzögerungen beim Bau, unvorhersehbaren Kosten und Haftungsrisiken führen können. Um dem vorzubeugen kann eine Bandbreite an Voruntersuchungen auf der betroffenen Liegenschaft durchgeführt werden.

Diese Voruntersuchungen sind seit 2022 durch die KPC förderungswürdig, um die Entwicklung bestehender Brachflächen anzuregen. Zu diesem Zweck werden von Ziviltechnikern, wie der RM UMWELTKONSULENTEN ZT GmbH, Recherchen und Untersuchungen am Standort durchgeführt, um einen bestehenden Kontaminationsverdacht auszuräumen oder zu konkretisieren und so eine optimale Planung zu ermöglichen. Dadurch wird für Bauträger mehr Sicherheit bei der Entwicklung von Brachflächen geboten und gleichzeitig der Verbrauch von Neuflächen zur Schonung der Umwelt reduziert.

LITERATUR

- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2021) Standard Practice for Environmental Site Assessments, USA
- Austrian Standards Institute (ASI) (2014) ÖNORM EN ISO 16000-32 - Innenraumluftverunreinigungen Teil 32: Untersuchung von Gebäuden auf Schadstoffe, Wien.
- Austrian Standards International Standardisierung und Innovation (ASISI) (2018) ÖNORM S 2088-1 – Kontaminierte Standorte – Teil 1: Standortbezogene Beurteilung von Verunreinigungen des Grundwassers bei Altstandorten und Altablagerungen, Wien.
- Austrian Standards International Standardisierung und Innovation (ASISI) (2022) ÖNORM B3151 - Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode, Wien.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) (2022) Förderungsrichtlinien 2022 Flächenrecycling. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- Lexer, W. (o.J.) *Zerschnitten, versiegelt, verbaut? - Flächenverbrauch und Zersiedelung versus nachhaltige Siedlungsentwicklung*.
- ÖROK. (2017) ÖROK-Empfehlung Nr. 56: "Flächensparen, Flächenmanagement & aktive Bodenpolitik". Wien: Geschäftsstelle der Österreichischen Raumordnungskonferenz (ÖROK).
- RM Umweltkonsulenten ZT GmbH (2020) Eigene Unterlagen. Frohnleiten.
- Scherzer+Valent Architekten (2019) Studie. Graz.
- Umweltbundesamt (2020) *Flächenrecycling und Innenentwicklung*. Von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten/flaechenrecycling-innenentwicklung#massnahmen-und-instrumente-zur-forderung-der-innenentwicklung-und-des-flaechenrecycling> abgerufen am 14.10.2020
- Umweltbundesamt GmbH (2008) *(Bau)Land in Sicht - Gute Gründe für die Verwertung industrieller und gewerblicher Brachflächen*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Umweltbundesamt GmbH (2022) *Flächeninanspruchnahme*. Von <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/boden/flaecheninanspruchnahme> abgerufen am 11.07.2022
- Zimak, T. B. (2020) *Industriebrachen im österreichischen Alpenraum - Erarbeitung eines Modells zur Erfassung von industriellen Brachflächen im alpinen Raum*. Wien.

In-situ Bodenwäsche mit Pflanzenöl/Wasser-Emulsionen zur Kohlenwasserstoff-Entfrachtung

M. Lackner¹, K. Putz², M. Plank³ & A. Loibner⁴

¹⁾ FH Technikum Wien, Fakultät Industrial Engineering, Wien, Österreich

²⁾ ensowa GmbH, Schäffern, Österreich

³⁾ Spitzer GesmbH, Voralpe, Österreich

⁴⁾ BOKU, Department IFA-Tulln, Institut Umweltbiotechnologie, Geobiotechnologie and Environmental Chemistry, Tulln, Österreich

KURZFASSUNG: Mineralische Kohlenwasserstoffe (MKW) stellen an zahlreichen Altstandorten und Altlasten ein Problem dar. Sowohl die gesättigte als auch die ungesättigte Zone können auch noch Jahrzehnte nach dem Schadensereignis stark belastet sein, v.a. kommt es zu einer relativen Anreicherung der schwer abbaubaren Kohlenwasserstoff-Fraktion, die von verzweigten und zyklischen Aliphaten sowie anellierten Aromaten dominiert ist. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Aufreinigungskaskade“ wurde am Beispiel der Altlast N77 untersucht, wie sich derartige Böden kostengünstig vor Ort dekontaminieren lassen. Am Standort N77 finden sich Kontaminationsherde mit bis zu 40.000 mg/kg Boden MKW in der gesättigten als auch ungesättigten Zone, ferner findet sich Mineralöl in Phase auf dem Grundwasser. Im Zuge der Verfahrensentwicklung wurden Emulsionen aus 5-10% Rapsöl in Wasser angefertigt und in den Untergrund infiltrierte. Die grundlegende Idee des Verfahrens ist, dass Pflanzenöl während der Perkolation Kohlenwasserstoffe absorbiert und dass derart beladenes Pflanzenöl vom Grundwasserspiegel abgezogen wird. Gleichsam absorbiert in die gesättigte Zone eingebrachtes Pflanzenöl während der Flotation MKW und wird ebenfalls abgezogen. Die Infiltrationsversuche wurden mit Drücken bis zu 5 bar durchgeführt. Es zeigte sich, dass sich das Verfahren für ausreichend durchlässige Böden (Kies) eignet. In die ungesättigte Zone wurden insgesamt 70 L Pflanzenöl (PÖL) in Form einer Emulsion infiltriert womit eine Entfrachtung von 31 L Mineralöl (MÖL) erzielt werden konnte bei einer Wiedergewinnung von 25 L PÖL. In die gesättigte Zone wurden 120 L PÖL eingebracht. Damit wurden 7,6 L MÖL entfernt bei einer Wiedergewinnung von 104 L PÖL. Die wesentlichen Ergebnisse für die ungesättigte Zone fassen sich wie folgt zusammen:

- 50-85 % an MKW im Boden lassen sich in einem Durchgang mit 10 % PÖL in Wasser extrahieren
- Das Verfahren ist für durchlässige Böden geeignet: Bodendurchlässigkeitsbeiwert $k_f > 10^{-4}$ m/s.
- Max. 15-50 % des PÖLs verbleiben im Boden, bei Nachwaschen mit Wasser nur max. 5-30 %
- Der Wirkungsbereich beträgt etwa 1-5 m² in der ungesättigten und 5-10 m² in der gesättigten Zone. Grundsätzlich hängt dieser vom jeweiligen K_f -Wert ab, d.h. vom Absenktrichter, der durch den Pumpbetrieb (am besten intermittierender Modus) entsteht.

Für gering bis schwer durchlässige Böden könnte das Verfahren auch on-site als Bodenwäsche eingesetzt werden. In diesem Fall sind kombinierte Behandlungsschritte denkbar, speziell der Zusatz von Schadstoff-abbauenden Enzymen scheint vielversprechend zu sein.

Das hier entwickelte Verfahren erlaubt eine rasche und einfache Schadstoffreduktion von durchlässigen Böden sowohl in der gesättigten als auch ungesättigten Zone. Es eignet sich auch als Vorbehandlungsschritt für mikrobielle Techniken, wodurch eine signifikante Reduktion der Sanierungszeit ermöglicht wird.

1 DURCHGEFÜHRTE VERSUCHE

Die Arbeiten aus 2020 (Lackner et al. 2020) im Rahmen des Projekts „Aufreinigungskaskade“ wurden im Feld fortgesetzt. Dies erfolgte am ehem. Standort der Petroleumfabrik Drösing, der Altlast N77. Ziel war die Verfahrensentwicklung und Demonstration im Feld einer *in-situ*

Bodenwäsche mit Pflanzenöl/Wasser-Emulsionen, um mineralische Kohlenwasserstoffe aus dem Boden zu entfernen, sowohl in der ungesättigten, als auch in der gesättigten Zone.

1.1 Herstellung von Emulsionen

Für die Bodenwäsche wurden Emulsionen aus Rapsöl in Wasser hergestellt. 5-10% Rapsöl (nach Masse) sollten als Emulsion für mind. 50 Stunden stabil in Wasser verteilt werden. Die Stabilität der Emulsionen konnte von zu Beginn der Experimente mit 4 h auf fast 50 h gesteigert werden. Es erfolgte hierzu ein systematisches Screening mit Tensiden und Co-Tensiden. Für die Versuche wurden die Polysorbate 20¹, 40, 60, 80 und 85 als besonders geeignet erachtet. Zudem wurde n-Propanol als Co-Tensid ausgewählt. Ein Co-Tensid ist ein 2. Tensid. Damit kann die Emulsion stabilisiert werden (Steigerung Dispersionsgrad der Tröpfchen). Dem Hinweis aus der Literatur, dass das Wasser vor dem Ansetzen einer Emulsion entgast werden sollte, wurde gefolgt. Beispielhaft sind hier einige Ergebnisse der Emulsionsherstellung in Abb. 1 wiedergegeben, anhand von Dreiecksdiagrammen:

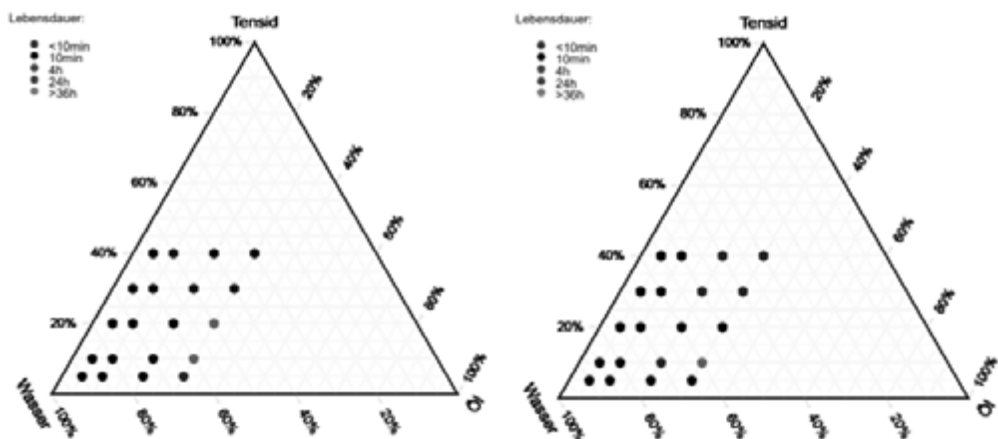


Abb. 1: Beispiele der Stabilität von Wasser, Öl und Tensid-Mischungen. 3 Mischungen sind über 36 h stabil

Bei einem k -Wert von beispielsweise $5 \cdot 10^{-5}$ m/s und einer Penetrationslänge von 5 m werden 27,8 Stunden benötigt, daher wurden 36-50 Stunden Stabilität der Emulsion angepeilt.

Ein höherer Ölteil resultierte in den Versuchen in höherer Viskosität, die Versuche im Feld wurden daher mit 5 % Ölteil durchgeführt. Es kam nur Rapsöl als günstiger, abbaubarer und lokal verfügbarer Rohstoff zum Einsatz. Als wässrige Phase wurden destilliertes Wasser, Leitungswasser (entgast/nicht entgast) und im Feld Grundwasser verwendet. Vollmilch, Kondensmilch, Kokosmilch wurden ebenfalls als leicht verfügbare, fertige Emulsionen mit unterschiedlichen Fettgehalten vorgeschlagen, die Versickerungsversuche zeigten aber schlechtere Ergebnisse.

¹ Ein nichtionisches Tensid mit einem HLB-Wert von 16,7 (HLB = *hydrophilic-lipophilic balance*). CAS-Nr. 9005-64-5

Für die Feldversuche wurde schließlich nur Lecithin als Emulgator eingesetzt. Vorteile von Lecithinen sind gute Verfügbarkeit, biologische Unbedenklichkeit und leichtere Trennung, da die daraus hergestellten Emulsionen nicht dauerhaft stabil sind. Im Feldversuch wurde v.a. dieses Material verwendet: Giralec HE-60. Es handelt sich dabei um ein hydrolysiertes Sonnenblumenlecithin, bei dem der Masseanteil der apolaren Anteile verringert wurde, was zu verbesserter Wasserlöslichkeit bei geringerer Energieeinbringung führt. Der Aufbau im Feld ist in Abb. 2 zu sehen.



Abb. 2: Die Feldversuche. Links: 300 l Mischer für die Herstellung der Emulsionen aus Pflanzenöl in Wasser. Rechts: Aus dem Boden in Drösing gewonnenes Material, bereits teilweise entmischt. Die Menge der öligen Schicht (schwarz), welche aus einer Mischung aus Pflanzenöl und Mineralöl besteht, beträgt hier etwa 56 Liter, vgl. Tabelle 2

Im nächsten Schritt wurde untersucht, wie viel Pflanzenöl im Boden zurückbleibt, siehe Tab. 1. Ziel des Verfahrens ist es, das Pflanzenöl möglichst vollständig und stark mit Mineralöl beladen zurückzugewinnen. Im Boden verbleibende Reste des Pflanzenöls (und eines abbaubaren Emulgators) stellen jedoch kein Problem dar.

Tab. 1: Wie viel Pflanzenöl verbleibt im Boden? - Die Versuche zeigen Modellböden (Kieselsteine, Grobsand und Lehm)

Medium	Gemenge [g]	Rückgewinnung [%]	Rückgewinnung nach Waschgang 1 [%]	nach Rückgewinnung Waschgang 2 [%]
Kieselsteine	Wasser/Öl 900/100	84	91,37	97,64
Kieselsteine	Wasser/Öl 900/100	90,85	99,35	99,71
Medium	Gemenge [g]	Rückgewinnung [%]	Rückgewinnung nach Waschgang 1 [%]	nach Rückgewinnung Waschgang 2 [%]
Grobsand	Wasser/Öl 900/100	63,15	71,67	78,75
Grobsand	Wasser/Öl 900/100	57,77	71,21	76,77
Medium	Gemenge [g]	Rückgewinnung [%]	Rückgewinnung nach Waschgang 1 [%]	nach Rückgewinnung Waschgang 2 [%]
Lehm	Wasser/Öl 900/100	56,11	73,26	79,83
Lehm	Wasser/Öl 900/100	53,9	67,82	74,67
Medium feucht	Flüssigkeit	Rückgewinnung nach vermischen [%]	Rückgewinnung nach Waschgang 1 [%]	Gesamtrückgewinnung [%]
Lehm	Öl	81,5	86,37	89,7
Lehm	Öl	80,89	87,56	89,61

Man sieht, aus Tab. 1, dass je nach Bodenart zwischen 77 und 99 % des Öls (nach 3 Waschgängen) zurückgewonnen werden können. Die Kieselsteine hatten eine Körnung von 3-8 mm, der Grobsand von 1-5 mm. Der Lehm stammte aus Drösing, Schicht 4-6 m.

1.2 Auswaschen von MKW aus der ungesättigten Zone - Feldversuche

Um die prinzipielle Machbarkeit des neuen Verfahrens zu demonstrieren, wurden Feldversuche durchgeführt. Die wesentlichen Versuche für die ungesättigte Zone sind hier zusammengefasst (Tab. 2; MKW = Mineralölkohlenwasserstoffe, MÖL; PÖL = Pflanzenöl):

Tab. 2: Versickerungs- und Pumpversuche in der ungesättigten Zone

	Emulsion [L]	enthaltene PÖL [L]	Emulgator	Einheit Emulgator	Emulgator	Abgepumpte Ölmenge (geschätzt*) [L]	Enthalte- nes MÖL [%]	Liter PÖL	% Rückgewinn- ung	Liter MÖL
27.05.2021	190	10	5kg		Sojalecithin, Pulver		9	65	3,15	5,85
08.06.2021	190	10	5kg		Sojalecithin, Pulver		8	60	3,2	4,8
09.06.2021	190	10	6L		Giralec HE		8,5	60	3,4	5,1
17.06.2021	190	10	6L		Giralec HE		8	55	3,6	4,4
18.06.2021	190	10	6L		Giralec HE		7	50	3,5	3,5
29.06.2021	190	10	6L		Giralec HE		7,5	50	3,75	3,75
30.06.2021	190	10	6L		Giralec HE		8	45	4,4	3,6
Gesamt:		70				56		25		31

* Ölmenge geschätzt durch Messung der Schichthöhe in IBC
Ölphase abgepumpt nach max. 36h

Es wurden 7 Versuche gemacht, mit insgesamt 7*190 Liter = 1330 Liter Emulsion, die 70 Liter Rapsöl enthielten. Es konnten insgesamt 56 l, bestehend aus 25 l Pflanzenöl und 31 l Mineralöl, ausgewaschen werden (Abb. 2 rechts). Das Abpumpen startete 5 Stunden nach Versuchsbeginn und wurde nach max. 36 h beendet. Abb. 2 zeigt einen IBC in Drösing mit 2 Phasen: Grundwasser und darüber abgesetztes Gemisch aus Mineral- und Pflanzenöl, aus dem Feldversuch in der ungesättigten Zone in Drösing.

Es wurden im Feldversuch folgende Resultate für die ungesättigte Zone erzielt:

- Bodenwäsche: Etwa 50-85 % der MKW aus dem Boden lassen sich in einem Durchgang mit 5 % PÖL (Pflanzenöl) in Wasser auswaschen.
- Das Verfahren ist für durchlässige Boden (Kies) geeignet, nicht für Lehm.
- Max. 15-50 % des PÖLs verbleiben im Boden, durch Nachwaschen mit Wasser nur max. 10-30 %, teilweise < 5 %.

1.3 Auswaschen von MKW aus der gesättigten Zone - Feldversuche

Die grundlegende Idee des Verfahrens für den Grundwasserschwankungsbereich und die gesättigte Zone ist, dass Pflanzenöl in tiefere Lagen eingepresst wird und zum Grundwasserhorizont aufsteigt. Während der Perkolation werden Kohlenwasserstoffe (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, PAK, aber auch MKW) aus dem Boden absorbiert, und das derart beladene Pflanzenöl kann anschließend vom Grundwasserspiegel abgezogen werden. für die Feldversuche wurde reines Pflanzenöl (Rapsöl) mit Lanzen bis zu 5 bar Druck unterhalb des Grundwasserspiegels eingebracht und max. 1 Stunde später wieder abgepumpt, vom Grundwasserhorizont. Die wesentlichen Versuche für die gesättigte Zone sind hier zusammengefasst (Tab. 3):

Tab. 3: Infiltrierungs- und Pumpversuche in der gesättigten Zone

	PÖL [L]	Abgepumpte Ölmenge (geschätzt*) [L]	Enthalten es MÖL %	Liter PÖL	% Rückgewinnun g	Liter MÖL
14.07.2021	30	28	8	25,76	92%	2,24
15.07.2021	30	29	8	26,68	92%	2,32
22.07.2021	30	27	6	25,38	94%	1,62
23.07.2021	30	28	5	26,6	95%	1,4
	120	112		104,42		7,58

* Ölmenge geschätzt durch Messung der Schichthöhe in IBC
Ölphase abgepumpt nach max. 1h

In die gesättigte Zone wurde, wie aus Tab. 3 zu sehen ist, an vier Versuchstagen reines Pflanzenöl unter den Grundwasserhorizont eingebracht, in Summe 120 Liter. Zurückgewonnen werden konnten 112 Liter Öl, bestehend auf 104,42 Liter PÖL und 7,58 Liter MÖL. Damit wurden folgende Resultate für die gesättigte Zone erzielt:

- 87 % des Pflanzenöls konnten zurückgewonnen werden, durch Abpumpen vom Grundwasserhorizont.
- Das PÖL hat sich zu 6,8 % mit MÖL angereichert, auf seiner Passage zum Grundwasserhorizont.

1.4 Ausblick des Verfahrens

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten wurde eine neue Verfahrenskombination untersucht. Die Bodenwäsche hat den Zweck, einen Großteil der Kontamination zu entfernen. Auf die Bodenwäsche mit Pflanzenöl sollte ein enzymatischer Abbau folgen (siehe dazu Loibner et al. 2022). Das abgezogene Gemisch aus Pflanzenöl, Mineralöl und Wasser wird vor Ort getrennt. Für die Trennung der Ölphase vom Wasser (siehe Lackner et al. 2022), wo ölbindende Vliese zum Einsatz kamen. Das gereinigte Wasser kann wiederversickert werden. Für das Gemisch aus PÖL und MÖL konnte kein geeignetes Trennverfahren entwickelt werden. Dies hätte eine Wiederverwendung des PÖLs für weitere Waschzyklen ermöglicht. Es kann daher angeregt werden, das PÖL/MÖL-Gemisch thermisch zu verwerten.

Es kann abgeschätzt werden, dass 15-50 % des PÖLs im Boden verbleiben, bei Nachwaschen mit Wasser nur max. 5-30 %. Der Wirkungsbereich beträgt etwa 1-5 m² in der ungesättigten und 5-10 m² in der gesättigten Zone.

2 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die Infiltrationsversuche mit Pflanzenöl/Wasser Emulsionen für die ungesättigte Zone und mit Pflanzenöl für die gesättigte Zone konnten erfolgreich im Feld getestet werden. Es wurde mit Drücken bis zu 5 bar gearbeitet. Als wesentliche Erkenntnis ergab sich, dass sich das Verfahren für ausreichend durchlässige Boden (Kies) eignet. In die ungesättigte Zone wurden insgesamt 70 L Pflanzenöl (PÖL) in Form einer Emulsion infiltriert, womit eine Entfrachtung von 31 L Mineralöl (MÖL) erzielt werden konnte bei einer Wiedergewinnung von 25 L PÖL. In die gesättigte Zone wurden 120 L PÖL eingebracht. Damit wurden 7,6 L MÖL entfernt bei einer Wiedergewinnung von 104 L PÖL. Die wesentlichen Ergebnisse für die ungesättigte Zone fassen sich wie folgt zusammen:

- 50-85 % an MKW im Boden lassen sich in einem Durchgang mit 10 % PÖL in Wasser extrahieren
- Das Verfahren ist für durchlässige Boden geeignet: Bodendurchlässigkeitsbeiwert $k_f > 10^{-4}$ m/s.
- Max. 15-50 % des PÖLs verbleiben im Boden, bei Nachwaschen mit Wasser nur max. 5-30 %
- Der Wirkungsbereich beträgt etwa 1-5 m² in der ungesättigten und 5-10 m² in der gesättigten Zone. Grundsätzlich hängt dieser vom jeweiligen K_f -Wert ab, d.h. vom Absenke-trichter, der durch den Pumpbetrieb (am besten intermittierender Modus) entsteht.

Für gering bis schwer durchlässige Böden könnte das Verfahren auch on-site als Bodenwäsche eingesetzt werden. In diesem Fall sind kombinierte Behandlungsschritte denkbar, speziell der Zusatz von Schadstoff-abbauenden Enzymen scheint vielversprechend zu sein. Das hier entwickelte Verfahren erlaubt eine rasche und einfache Schadstoffreduktion von durchlässigen Böden sowohl in der gesättigten als auch ungesättigten Zone. Es eignet sich auch als Vorbehandlungsschritt für mikrobielle Techniken, wodurch eine signifikante Reduktion der Sanierungszeit ermöglicht wird.

3 DANKSAGUNG

Das Projekt „Aufreinigungskaskade“ wurde dankenswerterweise vom BMK, abgewickelt von der Kommunalkredit Public Consulting, unter der Projektnummer B820001 gefördert.

LITERATUR

- Lackner, M., Putz, K., Plank, M., Loibner, A. (2022) Ölbindende Vliese zur Entfernung von Mineral- und Pflanzenöl aus Wasser (Oil-binding non-wovens for removing mineral and vegetable oil from water). Posterpräsentation, Recy & DepoTech 2022, 9.-11- November 2022, Leoben, Österreich.
- Lackner, M., Braunschmid, V., Sumetzberger-Hasinger, M., Müllern, K., Putz, K., Plank, M., Rüttinger, N., Ribitsch, D., Loibner, A. (2020) KASKADE - Vegetable oil extraction of hydrocarbons from soil and subsequent separation via non-woven fabrics. Recy & DepoTech2020 (Vortrag), 18.-20. November 2020, Leoben, Österreich.
- Loibner, A. (2022) Enzymatically enhanced biodegradation of persistent petroleum hydrocarbon mixtures. Vortrag, Recy & DepoTech2022, 9.-11- November 2022, Leoben, Österreich

Thermische Behandlung und Konditionierung von Hüttenreststoffen zur stofflichen Verwertung

K. Doschek-Held¹, A. Krammer¹, F.R. Steindl^{2,3}, P. Eisner¹ & D. Wohlmuth⁴

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Leoben, Österreich

²⁾ Technische Universität Graz, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, Graz, Österreich

³⁾ Technische Universität Graz, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Graz, Österreich

⁴⁾ voestalpine Stahl Donawitz GmbH, Wert- und Reststoffwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Im integrierten Hüttenwerk fallen bei der Stahlerzeugung unterschiedliche Hüttenreststoffe an, welche oftmals aufgrund von fehlenden Verwertungsmöglichkeiten zwischengelagert oder deponiert werden müssen. Zur Forcierung der reststofffreien Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung sollen Möglichkeiten einer stofflichen Verwertung dieser Reststoffe evaluiert werden. Hierfür werden einerseits die Rückführung der Metallfraktion (ME) als Sekundärrohstoff und andererseits die Nutzbarmachung der Mineralfraktion (MI) als Bindemittelkomponente für die Baustoffindustrie betrachtet. Als potenzielle Stoffflüsse zur Untersuchung wurden die Reststoffe aus der Roheisenentschwefelung und Sekundärmetallurgie/Strangguss identifiziert. Darüber hinaus erfolgte die Erhebung von möglichen Korrekturstoffen aus Sekundärquellen zur Konditionierung. Über das mit Priorität angestrebte Ziel der Wertmetallrückgewinnung und des Nachweises der Bindemittelleignung hinaus wird auch eine Stoffflussanalyse zur Potentialdarstellung für das Bundesland Steiermark angestrebt.

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Mineralische Baustoffe machen weltweit den größten Anteil aller Baustoffe aus und verursachen als Bauschutt einen Großteil des Abfallaufkommens (Sobek 2014). Der Portlandzementklinker, derzeit der Hauptbestandteil der für solche Baustoffe eingesetzten Bindemittel, ist für 5 – 10 % der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich (Favier et al. 2018) (International Energy Agency 2018). Auf dem Weg zu einer vollständigen Dekarbonisierung der mineralischen Baustoffe werden dringend neue Klinkersubstitutionsstoffe für emissionsarme und nachhaltige, entweder portlandzementbasierte Bindemittel oder alternative Bindemittel wie z.B. Geopolymere, benötigt (Favier et al. 2018). Gerade in der Steiermark fehlen zunehmend reaktive Klinkerersatzstoffe (Flugasche, Hüttensand, etc.) bei gleichzeitig steigender Nachfrage, zumal bisher verwendete Flugaschen aus der Kohleverbrennung nicht mehr anfallen und die ausreichende Verfügbarkeit von Hüttensand durch die zunehmende Nachfrage und die Entwicklungsziele der Eisen- und Stahlindustrie nicht gewährleistet werden kann. Dies lässt sich vor allem durch den angestrebten Technologiewechsel auf eine CO₂-optimierte Stahlproduktion mittels strombasierter Verfahren zurückführen (International Energy Agency 2018). Dadurch kommt es zukünftig zu einer schrittweisen Reduzierung von Hochofenschlacke als Nebenprodukt, welcher aktuell als Hüttensand in der Bindemittelindustrie eingesetzt wird. Der Mangel an Zement- und Zusatzstoffen (Moser et al. 2014) könnte durch alternative Hüttenreststoffe der Eisen- und Stahlindustrie kompensiert werden, sodass das vorhandene Know-how und bestehende Absatzwege genutzt werden könnten. Die angestrebte, getrennte stoffliche Verwertung des Metall- und Mineralanteils von bisher ungenutzten, deponierten Hüttenreststoffen leistet folglich einen wichtigen Beitrag zur Ressourcen- und Energieeffizienzsteigerung, Treibhausgasminimierung und Kreislaufwirtschaft in der Eisen-, Stahl- und Baustoffindustrie (International Energy Agency 2020).

1.1 Fragestellung

Basierend auf einer grundlegenden chemisch-mineralogischen Charakterisierung der Untersuchungsmaterialien und der Erhebung von relevanten Qualitätsmerkmalen für die angestrebten Verwertungsziele durch die Institute für Materialprüfung und Baustofftechnologie (IMBT) sowie Angewandte Geowissenschaften (IAG) der TU Graz (TUG) sollen Versuche zur thermischen Behandlung geplant und im Labormaßstab am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik (TPT) an der Montanuniversität Leoben (MUL) durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Versuche soll die Trennung zwischen Metall- und Mineralfraktion und die Möglichkeit der Konditionierung mit sekundären Korrekturstoffen entsprechend den erhobenen Qualitätsmerkmalen durchgeführt und nachgewiesen werden. Abschließend gilt es die entstandenen Fraktionen zu analysieren und entsprechend den angestrebten Verwertungsmöglichkeiten zu evaluieren. Zuletzt soll ein Stoffflussdiagramm zur Potentialdarstellung erstellt werden.

2 MATERIAL UND METHODE

Im folgenden Kapitel erfolgt eine detaillierte Beschreibung von Material und angewandter Methodik.

2.1 Material

Anhand des Prozessablaufdiagramms des integrierten Hüttenwerkes der voestalpine Stahl Donawitz GmbH (VASD) wurden die Reststoffe aus der Roheisenentschwefelung und Sekundärmetallurgie als ungenutzte Wertstoffpotentiale für die gegenständliche Untersuchung identifiziert. Darüber hinaus erfolgte die Ermittlung von möglichen Calcium- und Siliziumquellen aus Sekundärrohstoffen zur Konditionierung der eingesetzten Reststoffe. In Tab. 1 werden die herangezogenen Untersuchungsmaterialien und deren Anfallsorte zusammengefasst.

Tab. 1: Zusammenfassung der Untersuchungsmaterialien und deren Anfallsort

Hüttenreststoff Anfallsort	Material	Korrekturstoff Anfallsort	Material
Roheisenent- schwefelung	• Roheisen- entschwefelungs- schlacke (REES)	Deponie/ Zwischenlager	• Konverterschlacke (LDS) • Siemens-Martin-Schlacke (SMS)
Sekundär- metallurgie/ Strangguss	• continuous casting- schlacke (CCS)	Glasrecycling	• Feinglas (FG)
		Landwirtschaft	• Eierschalen (ES)

Zur Charakterisierung wurden eine chemisch/mineralogische und materialtechnische Untersuchung der Hüttenrest- und Korrekturstoffe, sowie der entstandenen Metall- und Mineralfraktion durchgeführt. In Tab. 2 sind die entsprechenden Prüfverfahren zusammengefasst. Diese Analysen wurden durch das IMBT (Steindl et al. 2022) und die VASD bereitgestellt.

Tab. 2: Übersichtsdarstellung der chemisch/mineralogischen und materialtechnischen Untersuchungen

Prüfung	Material	eingesetzte Untersuchungsmethode
chemische Zusammensetzung	Hüttenreststoffe	• RFA – Röntgenfluoreszenzanalyse
	Korrekturstoffe	• ICP-OES – Induktiv gekoppelte Plasma- Emissionsspektroskopie
mineralogische Zusammensetzung	Mineral- Metallfraktion	• nasschemische Analyse
		• XRD – Röntgendiffraktometrie
Reaktivität R ³	Mineralfraktion	• isotherme Kalorimetrie • gebundenes Wasser

Basierend auf der grundlegenden chemisch-mineralogischen Analyse konnte folgende Hauptoxidzusammensetzung der herangezogenen Untersuchungsmateriale in Abb. 1 dargestellt werden.

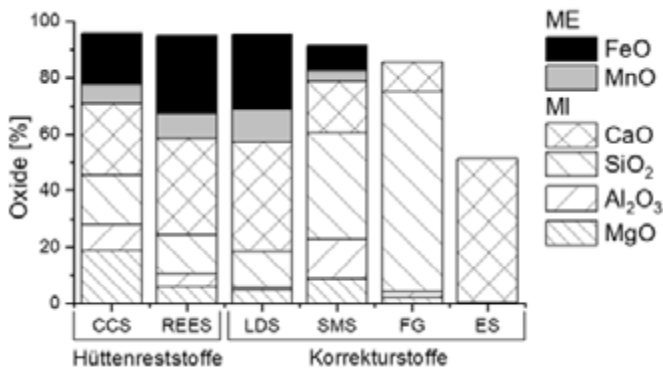


Abb. 1: Hauptoxidzusammensetzung der Hüttenrest- und Korrekturstoffe

Daraus lässt sich der hohe Metallgehalt in Form von Eisen- und Manganoxid als potenzielle Sekundärmetallressource ableiten. Durch die angestrebte Metallseparierung mittels Dichtentrennung entsteht eine potenzielle Calciumsilikatschlacke für die Bindemittelindustrie.

2.2 Methode

Im Zuge praktischer Versuchsdurchführungen sollen der Metall- und Mineralanteil der Hüttenreststoffe durch gezielte thermische Behandlungs-, Abkühlungs- und Aufbereitungsschritte separat nutzbar gemacht werden. Die angestrebte carbothermische Reduktion der Metalloxide bildet die Voraussetzung für die Trennung der Metall- und Mineralfraktion. Die Optimierung dieses Schrittes soll durch eine geeignete Temperaturführung, Konditionierung mit entsprechenden Korrekturstoffen und Reaktantenzugabe in Form von Kohlenstoffpulver erfolgen. Bei der anschließenden Abkühlung soll eine glasige Erstarrung der Mineralphase, welche für die Aktivierung und in weiterer Folge für die Festigkeitsentwicklung von reagierten Produkten (hydraulisch reagierende Zemente oder alkalisch aktivierte Materialien) maßgeblich ist, erreicht werden. Zur Abkühlung der Schmelze wird eine Nassgranulation mit Wasser nach dem Stand der Technik für Hütten sand im Labormaßstab herangezogen. Anschließend erfolgen weitere Probenaufbereitungsschritte, um eine umfassende Analyse der entstehenden Mineral- und Metallfraktion durchzuführen.

3 DURCHFÜHRUNG

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die Einzelschritte der Versuchsdurchführung näher erläutert.

Konditionierung

Um das Rohstoffpotential der Hüttenreststoffe nutzbar zu machen, wurde eine Anwendung zur Berechnung idealer Kombinationen von Reststoffen, Korrekturstoffen und Reaktanten entwickelt. Dieser Mischungsrechner wurde in Folge eingesetzt, um optimierte Mischungen unter vordefinierten Qualitätsmerkmalen zu nähern (Eisner in.Bearbeitung). Daraus ergeben sich in Tab. 3 folgende Mischungszusammensetzungen der Untersuchungsmaterialien, welche zur Behandlung herangezogen werden.

Tab. 3: Zusammensetzung der Untersuchungsmischungen in Prozent [%]

[%]	M01	M02	M03	M04
CCS	50	21	50	29
REES	16	35	17	10
SMS	30	40	-	49
LDS	4	4	14	-
FG	-	-	19	12

Thermische Behandlung und Abkühlung

Im Labormaßstab wurden ca. 1,2 kg der Mischungen mittels Widerstandsofen mit Argonspülung bei 1600 °C und einer Haltezeit von 1,5 h in einem Graphittiegel geschmolzen. Das schmelzflüssige Material wurde daraufhin in einer Nassgranulation mit Wasser abgekühlt und getrocknet (Doschek-Held & Raupenstrauch 2020).

Probenaufbereitung und -analyse

Durch Brechen, Sieben und Magnetscheidung erfolgt die Probenaufbereitung zur finalen Separation der Metall- und Mineralfraktion nach der Dichtentrennung. Die chemisch-mineralogischen Analysen der Mineralfraktion und Untersuchungen zur Bindemittleignung wurden vom IMBT durchgeführt, die Analyse der Metallfraktion erfolgte durch die VASD.

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Basierend auf der durchschnittlichen Metallanalyse, dargestellt in Abb. 2, konnte eine grundlegende Eignung als Sekundärmaterial für die Rückführung in den Konverter durch die VASD bestätigt werden.

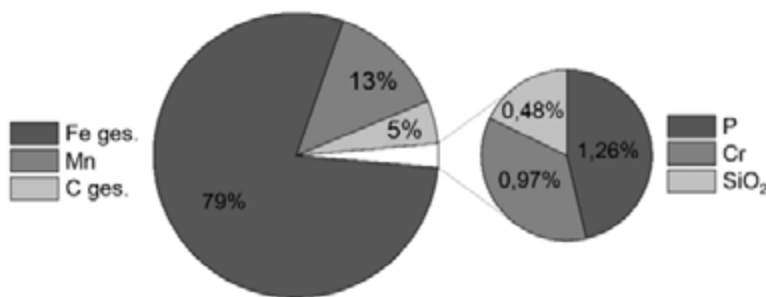


Abb. 2: Durchschnittliche chemische Zusammensetzung der Metallfraktion in Prozent [%]

Dabei konnten durchschnittliche Rückgewinnungsraten für Eisen von 98 % und für Mangan von 60 % erzielt werden (Krammer in Bearbeitung). Die Ergebnisse der baustofflichen Eignungsuntersuchung der Mineralfraktion werden in Tab. 4 zusammengefasst (Steindl et al. 2022).

Tab. 4: Auszug der bautechnologischen Analyseergebnisse (Steindl et al. 2022)

Parameter	Einheit	Kriterium/	M01	M02	M03	M04
<u>gemäß ÖN B3309</u>						
CaO+MgO+SiO ₂	%	> 67,0	80,7	81,6	85,6	81,3
(CaO+MgO)/SiO ₂	-	> 1,0	1,65	1,45	1,48	1,46
Glasgehalt	%	> 67,0	> 99	> 99	> 99	> 99
MgO	%	< 18,0	17,3	13,4	16,9	14,3
Aktivitätsindex nach 28 Tagen ¹⁾	-	0,9	1,02	0,97	0,93	0,95
<u>gemäß Literaturrecherche (Steindl, Doschek-Held, Mittermayr, & Juhart, 2022)</u>						
R ³ - gebundenes Wasser	g/100 Leim	g > 6	5,4	4,9	4,6	5,4
R ³ - kumulative Wärme	J/g Mineralfraktion	> 250	53,3	34,6	25,6	39,3
FeO	%	möglichst niedrig	0,31	0,52	0,18	0,22
MnO	%	möglichst niedrig	3,47	4,07	4,16	3,68

¹⁾ Wasser/Bindemittel (W/B) bei 25/75

Die Ergebnisse zeigen, dass eine grundsätzliche baustoffliche Eignung der Mineralfraktion nach der durchgeführten Behandlung erreicht werden kann. Dadurch ist das Potential zur stofflichen

Verwertung als alternative Bindemittelkomponente gegeben. Basierend auf weiteren Untersuchungen sollen die Einflussgrößen der Einzeloxide und der Behandlungsbedingungen auf die Wertmetallrückgewinnungsrate und die Bindemittelqualität ermittelt und weiter optimiert werden. Zuletzt wurde eine Stoffflussanalyse zur Potentialabschätzung der stofflichen Verwertung der Metall- und Mineralfraktion durchgeführt. Dazu wurde exemplarisch die Mischung M03 in Abb. 3 als Stoffflussdiagramm dargestellt. Hierzu wurde als Rechengrundlage ein Anfall von 100.000 t/a CCS angenommen und dem theoretischen Sekundärzumahlstoffbedarf (SZS) an Hochofenschlacke (HOS) der Zementindustrie in der Steiermark für das Jahr 2020 gegenübergestellt (Mauschitz 2021), (Bohslavski 2020).

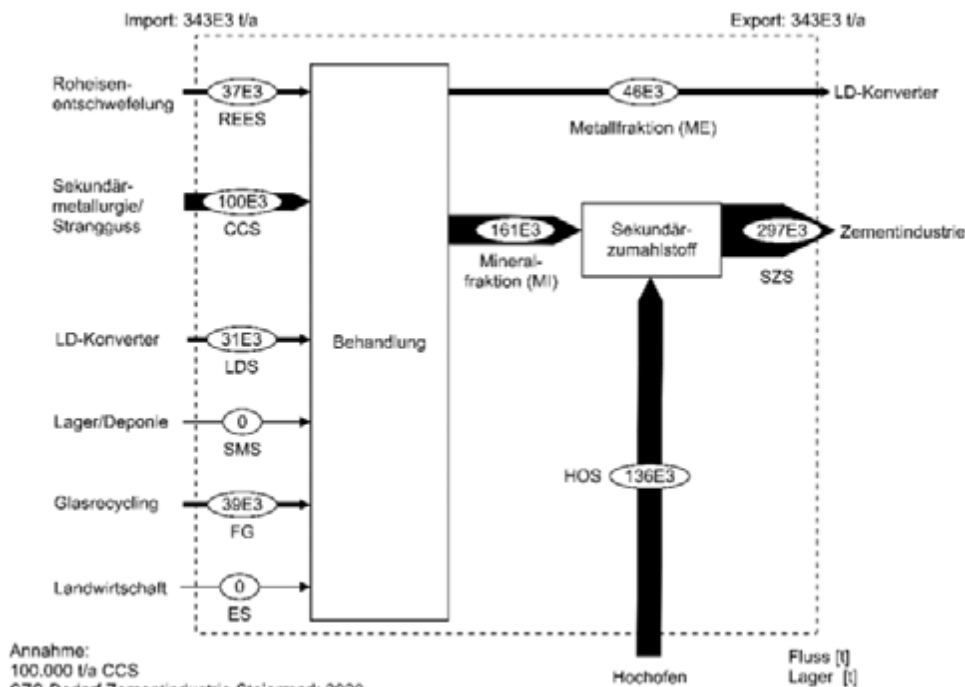


Abb. 3: Stoffflussdiagramm zur Potentialabschätzung der Wertmetallrückgewinnung und Sekundärzumahlstoffbedarf der Zementindustrie in der Steiermark für das Jahr 2020

Daraus ergibt sich ein Wertmetallrückgewinnungspotential von circa 45.000 t/a für den LD-Konverter und ein Substitutionspotential von konventioneller Hochofenschlacke (HOS) von circa 160.000 t/a für den Einsatz als Sekundärzumahlstoff in der Zementindustrie. Dadurch könnten circa 54 % des Hüttensandbedarfs in der Steiermark im Betrachtungsjahr 2020 gedeckt werden.

5 SCHLUSSFOLGERUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

Auf dem Weg zur vollständigen Dekarbonisierung der Bauproduktion bis 2050 spielen CO₂-intensive mineralische Baustoffe eine zentrale Rolle. Eine CO₂-Reduktion und Ressourcenschonung kann durch die Verwertung von potenziellen Reststoffen erreicht werden, sodass neue, nachhaltige Bindemittel den CO₂- und energieintensiven Portlandzementklinker in unmittelbarer Zukunft ergänzen oder ersetzen könnten. Daher gilt es, bisher deponierte Hüttenreststoffe durch geeignete Behandlungs-, Abkühlungs- und Aufbereitungsschritte sowie durch die Kombination mit weiteren Sekundärkorrekturstoffen einer stofflichen Verwertung zuzuführen. Dazu wurden die notwendigen Grundlagen sowie die Bindemittel-Wirkungsweise erhoben und die Recyclingfähigkeit evaluiert. Allgemein konnte durch die gesetzten Behandlungsschritte eine Metallfraktion gewonnen werden, welche den Qualitätsansprüchen zur Rückführung in das Stahlwerk genügt. Gleich-

zeitig konnte die geforderte Leistungsfähigkeit der Mineralfraktion nachgewiesen werden. Basierend auf den Erkenntnissen sollen weitere Entwicklungsschritte, wie die Etablierung eines geeigneten thermischen Behandlungsaggregats im Industriemaßstab, welches idealerweise mit regenerativen Energieträgern betrieben werden kann, gesetzt werden. Möglichkeiten dazu wären zum Beispiel induktive Schmelzaggregate bzw. Plasmaschmelzverfahren. Darüber hinaus sollen auch die Einflüsse der Rohstoff- und Energiekosten sowie die CO₂-Zertifikatspreise im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse für die Verfahrensbewertung miteinbezogen werden.

Zusammenfassend können nochmals folgende Vorteile durch die angestrebte Nutzbarmachung von Hüttenreststoffen in Kombination mit Korrekturstoffen aus Sekundärquellen festgehalten werden:

- Deponievolumenschonung durch das Recycling der Hüttenrest- und Sekundärkorrekturstoffe,
- Upcycling durch die angestrebte stoffliche Verwertung der Metall- und Mineralfraktion,
- Primärressourcenschonung und CO₂-Emissionseinsparung in der Eisen- & Stahlindustrie durch die Rückführung der Metallfraktion,
- Primärressourcenschonung und CO₂-Emissionseinsparung in der Zementindustrie durch die Bereitstellung einer alternativen Bindemittelkomponente.

6 DANKSAGUNG

Der gegenständliche Beitrag wurde im Zuge des Forschungsprojektes „UpcycSlag-Binder“ verfasst. Dieses Projekt wird aus Mitteln des Zukunftsfonds Steiermark und dem Klimaschutzfonds der Stadt Graz gefördert und im Rahmen des Programms „Green Tech 100 – 1 Earth, 0 Carbon, 0 Waste“ durchgeführt. Darüber hinaus sei der voestalpine Stahl Donawitz GmbH für die Durchführung der Metallanalysen gedankt.

LITERATUR

- Bohslavski, S. (2020) Sekundärrohstoffbedarf und -anfall für die Bereitstellung von neuen, nachhaltigen Bindemitteln aus Reststoffen mittels Heatmaps. Leoben: Bachelorarbeit, Montanuniversität Leoben.
- Doschek-Held, K., Raupenstrauch, H. (2020) Hochtemperaturprozessstechnik. Berg Huettenmaenn Monatsh (BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte), 289-296.
- Eisner, P. (in Bearbeitung) Eisenhüttenschlacken - Stoffliche Verwertung in der Zementindustrie und Möglichkeiten zur Rückgewinnung thermischer Energie. Leoben: Bachelorarbeit, Montanuniversität Leoben.
- Favier, A., Wolf, C. d., Scrivener, K., Habert, G. (2018) A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry: Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050. Zürich: Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ).
- International Energy Agency. (2018) Low-Carbon Transition in the Cement Industry. Paris: International Energy Agency.
- International Energy Agency. (2020) Energy Technology Perspectives 2020. Paris: International Energy Agency.
- Krammer, A. (in.Bearbeitung) Thermal treatment and cooling of metallurgical residues for the usage as an alternative additive. Leoben: Montanuniversität Leoben.
- Mauschitz, G. (2021) Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie - Berichtsjahr 2020. Wien: Technische Universität Wien.
- Moser, S., Leitner, K.-H., Steinmüller, H. (2014) F&E-Fahrplan - Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie. Wien: Klima- und Energiefonds der österreichischen Bundesregierung.
- Sobek, W. (2014) Mit Beton in die Zukunft. Nachhaltig Bauen mit Beton: Werkstoff und Konstruktion. Graz: Verl. der Techn. Univ. Graz.
- Steindl, F., Doschek-Held, K., Mittermayr, F., Juhart, J. (2022) Mineralische Reststoffe und Nebenprodukte als Bestandteile reaktiver Bindemittelkomponenten. Recy & DepoTech. Leoben.

Alternative Bettmaterialien für Wirbelschichtöfen mit Potenzial zur Wiederverwendung als Zementzuschlagstoff

P. Dörfler¹, U. Eggenberger¹ & M. Wolffers¹

¹⁾ Universität Bern, Institute für Geologie, Bern, Schweiz

KURZFASSUNG: Ziel der Studie war die Ausarbeitung und Anwendung einer Testmatrix, mit der alternative Bettmaterialien für den Einsatz in Wirbelschichtöfen zur Holzverbrennung geprüft und beurteilt werden können. Dazu wurde ein interdisziplinärer Ansatz gewählt, der sowohl mineralogische als auch verfahrenstechnische Aspekte in Betracht zieht. Neben der initialen Materialcharakterisierung werden die Bedingungen im Wirbelschichtreaktor in Verbrennungsversuchen nachgestellt. An diesen Bett- und Flugaschen können dann Versuche zum Verhalten der neuartigen Aschen durchgeführt werden. Über die Testmatrix wurden aus acht potenziellen Bettmaterialien drei ausgewählt, die für Performance-Tests im Zementwerk verwendet werden können. Der gewählte Ansatz erwies sich als geeignet, um im Sinne der Kreislaufwirtschaft günstige Materialien effizient auszuwählen und ihre Einsatzmöglichkeit robust zu testen.

1 PROJEKTHINTERGRUND

Die Erwartungen an nachhaltige, lokale Energiequellen steigen mit dem Ausstieg aus der fossilen Energie. Gleichzeitig geraten Deponien an ihre Grenzen und ein gesellschaftliches Umdenken in Richtung der Kreislaufwirtschaft ist im Gange. Da besonders die Holzenergie ein Hoffnungsträger heimischer Energieproduktion ist, ist es notwendig, heutige Prozessabläufe kritisch zu evaluieren. Dazu gehört auch die Erfassung der Reststoffe, die aus dem Verbrennungsprozess entstehen. Einerseits sind die Bestandteile der Holzasche mit ihren hohen CaO – Gehalten ein potenzieller Zementrohstoff (Maschowski 2020). Andererseits verhindert der momentan weit verbreitete Einsatz von Quarzsand als Bettmaterial eine Verwertung der Holzaschen im Zement. Ziel der Studie war es deshalb, sekundäre Rohstoffe als Bettmaterialien einzusetzen, welche zudem eine aktive Funktion als Zumahlstoff im Zement aufweisen.

2 MATERIALIEN UND METHODEN

In einem ersten Schritt wurden acht Materialien zur Evaluierung identifiziert: Sande aus dem Rückbaurecycling (A), Stahlschlacke (B), Steinkohleschlacke (C), MVA-Schlacke (D), Eisonschlacke (E), Stahlveredlerschlacke (F), Giessereialtsand (G) und Heissmehl (H). Sie wurden mittels der Testmatrix (Abb. 1) charakterisiert. Es wurden relevante Parameter erfasst, welche die Stabilität eines Materials während des Verbrennungsprozesses beschreiben. Zudem wurde das Potential der Materialien für den Einsatz als Zementrohstoff abgeschätzt.



Abb. 1: Graphische Darstellung der Testmatrix

3 RESULTATE

3.1 Materialphysikalische Charakterisierung

Zur Evaluierung der Fluidisierbarkeit bei Bedingungen in Holzheizkraftwerken wurde die sog. Geldart-Gruppe der Materialien anhand ihrer Partikeldichte und der mittleren Korngröße bestimmt. Die Partikeldichte kann aufgrund der Inhomogenität der Materialien mit einfachen Methoden nicht bestimmt werden. Daher wurden sowohl die Korndichte als auch die Schüttdichte bestimmt, und die Geldart-Klasse graphisch abgeschätzt. Die optimale mittlere Korndurchmesser wurde rechnerisch ermittelt. Je nach Siebkurve der Ausgangsmaterialien wurden dann Siebschnitte gesetzt, die den optimalen Korndurchmesser bestmöglich wiedergeben.

In Abb. 2 sind die Ergebnisse im Geldart-Diagramm dargestellt. Die Materialien F und H fallen in den Bereich der Geldart-Gruppe A oder in den Grenzbereich zwischen den Gruppen A und B. Sie sind somit kaum als Bettmaterial für den Einsatz im Holzheizkraftwerk geeignet. Alle anderen Materialien fallen in die Geldart-Gruppe B und haben somit potenziell geeignete Fluidisierungseigenschaften. Sie wurden gemäß der Testmatrix weiter analysiert.

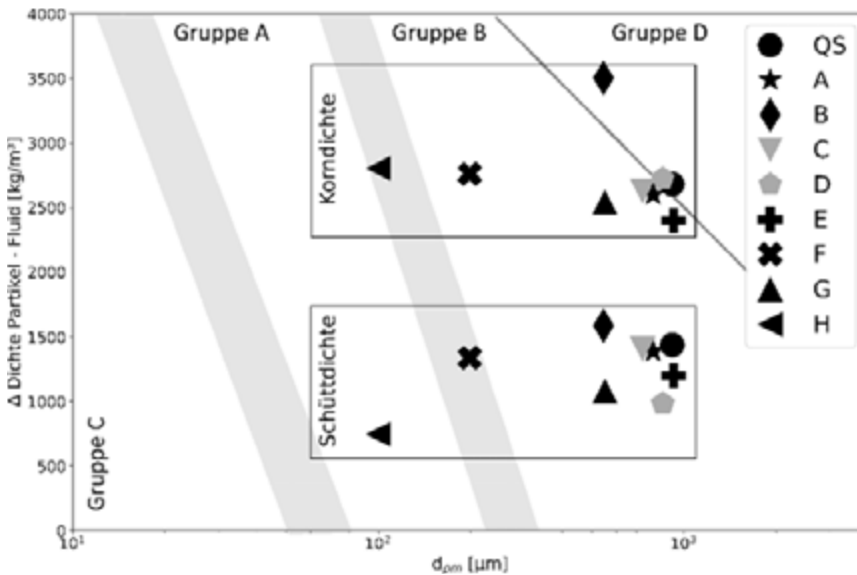


Abb. 2: Geldart-Diagramm zur Bestimmung der Fluidisierungseigenschaften

3.2 Chemisch-Mineralogische Charakterisierung

Die Materialien wurden in einem zweiten Schritt mittels XRF- und XRD-Analyse auf ihre chemische und strukturelle Zusammensetzung untersucht und hinsichtlich der Stabilität der Phasen während des Verbrennungsvorganges beurteilt. Andererseits wurde evaluiert, ob das Material potenziell puzzolanische Eigenschaften besitzt oder durch den Verbrennungsvorgang erhalten kann. Dabei ist zum einen die chemische Gesamtzusammensetzung von Bedeutung, andererseits, ob die Elemente in einer hydraulisch aktiven Phase gebunden sind. Zudem wurden mögliche Grenzwertüberschreitungen bezüglich der Wiederverwertung von Materialien als Zuschlagstoff nach schweizerischem Recht überprüft.

Nebst guter Fluidisierungseigenschaften erweisen sich drei Materialien auch hinsichtlich ihrer Zusammensetzung (vgl. Tab. 1) als geeignet:

In **Material A (Sande aus dem Rückbaurecycling)** sind Silikate und Karbonate die Hauptbestandteile. Entsprechend sind auch der SiO_2 und CaO -Anteil dominierend und zeigen einen hohen Glühverlust (LOI). Bei einem Einsatz als Bettmaterial ist zu erwarten, dass der enthaltene Calcit zu Branntkalk dekarbonisiert und zusammen mit den silikatisch gebundenen Anteilen potenziell Klinkerphasen bildet. Zudem weist Material A einen hohen amorphen Anteil auf, was einen positiven Einfluss seine Wirkung als Zusatzstoff haben kann.

Material B (Stahlschlacke) besteht überwiegend aus Silikaten und Fe-Oxiden, gleichzeitig weist es auch einen erheblichen amorphen Anteil auf. Der hohe CaO -Anteil ist hier in einer Form gebunden, die nicht im Wirbelschichtofen aktiviert werden kann. Zudem ist ein Teil des Fe in reduzierter Form gebunden, sodass mögliche Oxygen-Carrier-Eigenschaften bestehen.

Material C (Steinkohleschlacke) ist amorph. Es ist daher eine hohe Reaktivität der Stoffe zu erwarten. Gleichzeitig hat Material C einen hohen CaO - und SiO_2 -Gehalt und ist daher eine potenziell hydraulisch reaktive Komponente im Zement.

Tab. 1: Übersicht der Ergebnisse aus der chemischen und mineralogischen Materialcharakterisierung mittels XRF und XRD

[Gew. %]	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	SO_3	LOI	Amorph	Silikate	Karbonate	Halogenide	Fe-Oxide	Andere Oxide	Andere
QS	95.66	<0.1	1.93	0.13	<0.1	0.06	<0.1	0.12	1.18	<0.1	<0.1	0.16	100						
A	29.96	0.34	5.49	3.05	<0.1	2.07	35.86	0.52	1.05	<0.1	0.88	20.36	22	40	37	0	0	0	0
B	20.36	0.65	12.06	25.83	4.57	3.07	31.67	0.15	0.16	0.34	0.31	-1.12	15	61	0	0	16	7	1
C	54.37	1.21	20.61	11.25	0.11	<0.1	8.36	1.12	2.49	0.53	<0.1	-0.72	100						

3.3 Prozess- und Anwendungsversuche

Die auf Basis der Charakterisierung ausgewählten Materialien durchlaufen im nächsten Schritt verfahrenstechnische Versuche. Dabei werden durch Kaltmodellversuche zuerst die ermittelten Fluidisierungseigenschaften ermittelt. Durch Bestimmung des Lockerungspunktes (Abb. 3) kann errechnet werden, ob das Material auch unter bestehenden Betriebsbedingungen einsetzbar ist. Bei den drei Materialien A, B, und C sind diese gegeben.

Anschließend wurden Verbrennungsversuche geplant und im Versuchsaufbau im Technikum der TU Wien die Bettmaterialien im Wirbelschichtbetrieb mit Rinde als Brennstoff geprüft. Dabei werden neben den Bettaschen auch Aschefractionen gesammelt, deren Wirkung als Zementrohstoff geprüft werden kann.

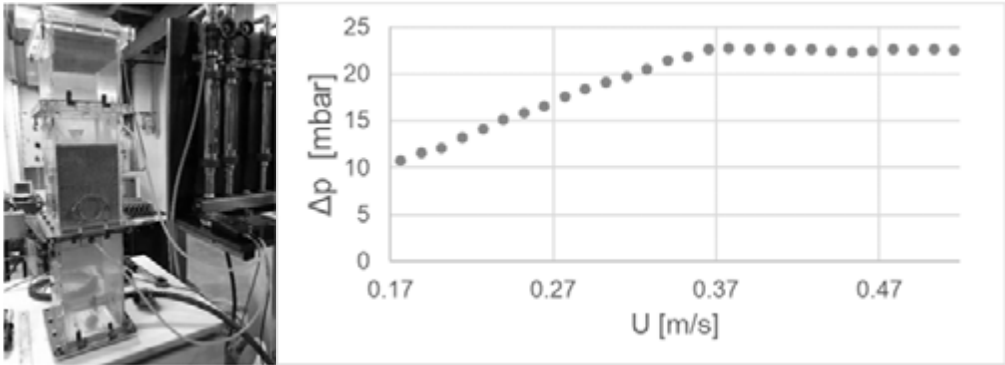


Abb. 3: Versuchsaufbau Kaltversuche (links), Bestimmung des Lockerungspunktes an Material C (rechts)

4 DISKUSSION

Der (Teil-)Ersatz des heute eingesetzten Bettmaterials Quarzsand durch Sekundärrohstoffe und die daraus resultierende Aufwertung der Bettasche im Hinblick auf die Verwertung als Zementzuschlagstoff ist ein großer Schritt, um Kreisläufe in der Holzenergieproduktion zu schließen und Deponievolumen zu sparen. Während bestehende Arbeiten zu alternativen Bettmaterialien einen Fokus vorrangig auf Verbesserungen der Prozesse im Holzheizkraftwerk abzielen (Hildor et al 2019), zeigt diese Studie auf, wie Materialien auch hinsichtlich ihrer Wiederverwendung überprüft werden können.

Die erarbeitete Testmatrix baut auf einer Vorabüberprüfung einfach zu bestimmender Parameter (Dichte und Korngrößenverteilung) auf. Standardmethoden zur Charakterisierung der Materialzusammensetzung geben Hinweise auf das Verhalten im Brennraum, da so Phasenstabilität und mögliche Reaktionen erkannt werden können. Zudem kann eine Priorisierung der Materialien für weiterführende Tests in den Versuchsreaktoren erfolgen. Die Durchführung solcher Heißversuchen zur Evaluierung der tatsächlichen Materialstabilität bei Verbrennungsbedingungen ist besonders wertvoll. Die in den Verbrennungsversuchen generierten Aschen können direkt auf ihre Eignung als Zementzuschlagstoff getestet werden.

Abschließend sollen mit dem bestgeeigneten Alternativmaterial nach Abschluss der Zementtests Versuche auf einer Bestandsanlage durchgeführt werden. Nur so kann die Wirksamkeit der Testmatrix abschließend beurteilt werden.

LITERATUR

- Hildor, F., Mattisson, T., Leion, H., Linderholm, C., & Ryden, M. (2019). *Steel converter slag as an oxygen carrier in a 12 MWth CFB boiler - Ash interaction and material evolution*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 88, S. 321-331.
- Maschowski, C. K. (2020). *Use of biomass ash from different sources and processes in cement*. Journal of sustainable cement-based materials, 9(6), S. 350-370.

Untersuchungen zum thermochemischen Recycling teerhaltigen Straßenaufbruchs

J. Hee¹ & P. Quicker¹

¹⁾ RWTH Aachen University, Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe, Aachen, Deutschland

KURZFASSUNG: Teerhaltiger Straßenaufbruch wird gemäß Abfallverzeichnisverordnung den Abfallschlüsseln 17 03 01* ($> 1.000 \text{ mg/kg}$ EPA-16-PAK) und 17 03 02 ($25 > x < 1.000 \text{ mg/kg}$) zugeordnet. Erhebliche Mengen dieser Abfälle werden in den nächsten Jahren erwartet. Derzeit gibt es in Deutschland kaum Konzepte oder eine einheitliche Strategie für eine nachhaltige und wirtschaftliche Behandlung dieser potenziellen Wertstoffe, nicht zuletzt aufgrund unzureichender rechtlicher Rahmenbedingungen. Die thermische Behandlung von teerhaltigen Straßenbauabfällen stellt ein mögliches Recyclingverfahren dar. Anhand von thermogravimetrischen Analysen und Versuchen im halbtechnischen Maßstab konnte gezeigt werden, dass eine Behandlungstemperatur von $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und eine Verweilzeit von mindestens 30 Minuten ausreichen, um EPA-16-PAK aus dem festen Material auszutreiben. $650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sollten nicht überschritten werden, um die mechanische Stabilität und die spätere Verwendung als Baumaterial zu gewährleisten. Die Sauerstoffkonzentration in der Gasatmosphäre spielt zum Austreiben der EPA-16-PAK eine untergeordnete Rolle. Um die vollständige Oxidation der ausgetriebenen organischen Bestandteile zu gewährleisten, ist eine thermische Nachverbrennung jedoch zwingend vorzusehen.

1 VERWERTUNG TEERHALTIGEN STRASSEN-AUFBRUCHS IN DEUTSCHLAND: STATUS QUO

Ausbau und Erneuerung der verkehrstechnischen Infrastruktur erfordern große Mengen mineralischer Rohstoffe von hoher Qualität. Die Rezyklierung von Materialien aus Straßenaufbruch, nach Aufbereitung in einer Mischanlage, erscheint daher aus Aspekten der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit naheliegend. Unter Straßenaufbruch wird im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) ein Abfall verstanden, welcher aus den mit Bindemitteln gebundenen mineralischen Schichten aus dem Oberbau einer Straße, d.h. Deck-, Binder- sowie Tragschicht, besteht. Als Bindemittel kommen heutzutage hydraulische Bindemittel und Bitumen zum Einsatz, bis 1987 wurde hingegen Steinkohlenteer/-pech als Bindemittel verwendet (Benedix 2011). Die darin enthaltenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) stellen die Abfallwirtschaft vor Herausforderungen.

PAK ist ein Oberbegriff für ca. 300 Einzelsubstanzen, von denen durch die United States Environmental Protection Agency (EPA) 16 stellvertretend als Leitsubstanzen für umweltanalytische Untersuchungen ausgewählt wurden (EPA-16-PAK). Sie sind charakterisiert durch einen niedrigen Dampfdruck, hohe Siedepunkte bis $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sowie mutagene und kanzerogene Wirkungen (Umweltbundesamt 2016). Zur Einstufung von Straßenaufbruch als teer-/pechhaltig sind in Deutschland die Richtlinien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) anzuwenden, welche die technischen Anforderungen des Merkblatt 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) berücksichtigen. Demnach gelten Einbaumaterialien mit einer Konzentration über 25 mg/kg EPA-16-PAK, gemäß RuVA StB 01 und TL AG-StB 09, als teer-/pechhaltig (LAGA 2003).

Die Einstufung von Straßenaufbruch als gefährlicher Abfall (17 03 01*) ist in der Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG) festgelegt. Die darin aufgeführten Schadstoffkonzentrationen werden wiederum gemäß dem Chemikalienrecht (Verordnung (EG) 1272/2008) abgeleitet. So ist Straßenaufbruch dann als gefährlich einzustufen, wenn in Summe ein EPA-16-PAK Gehalt von mindestens 1.000 mg/kg im Feststoff analysiert wurde. Materialien mit $< 1.000 \text{ mg/kg}$ EPA-16-PAK werden hingegen als Abfallschlüsselnummer 17 03 02 eingestuft. Wird lediglich der Gehalt von Benzo(a)pyren als Leitsubstanz bestimmt, gilt der Schwellenwert von 50 mg/kg im Feststoff. Diese Schwellenwerte sind bundesweit allerdings nicht einheitlich geregelt, da die Bundesländer

hierzu Vorschriften mit unterschiedlicher Regelungstiefe erlassen haben, was in teilweise niedrigeren Schwellenwerten als den o. g. resultiert (Wagner et al. 2018), (LFU 2019). Mit einem Gesteinsanteil von ca. 95 Ma.-%, bei unterschiedlicher Korngröße und einem Gehalt von ca. 5 Ma.-% Bindemittel, stellt Asphalt einen komplexen Verbundstoff dar. Bindemittel aus Steinkohlenteer/-pech ist meist ein Nebenprodukt der Pyrolyse in Kokereien und als Mischung von mehr als 1.000 Einzelsubstanzen zudem äußerst heterogen (Benedix 2011). Aufgrund dieser Heterogenität sind Schadstoffkonzentrationsgradienten im Asphalt sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung des Straßenbelages möglich. Der Übergang vom nicht gefährlichen zum gefährlichen Abfall kann auf demselben Straßenabschnitt fließend sein und mehrfach wechseln. Grundsätzlich ist daher die Aussagekraft der analytisch ermittelten PAK-Konzentrationen von einer geringen Anzahl Stichproben aus Straßenaufbruch mit Vorsicht zu bewerten. Es kann in der Regel nicht nachvollzogen werden, inwieweit die ausgewählten Proben die in der Praxis verbauten Materialien in Gänze repräsentieren.

2 THERMISCHE BEHANDLUNG IM LABORMASSSTAB

Für die Grundlagenuntersuchungen wurde von einem Entsorgungsfachbetrieb teer-/ pechhaltiger Straßenaufbruch zur Verfügung gestellt. Als Vorkonditionierung für die Versuche im Labormaßstab durchlief das Material zunächst eine Zerkleinerung in einer langsam laufenden Prallmühle, auf eine Korngröße von $d < 50$ mm. Aus dem zerkleinerten Material wurde nach den Vorgaben der LAGA PN 98 anschließend eine Laborprobe generiert, mittels Scheibenschwingmühle auf eine Korngröße von $d < 0,2$ mm zerkleinert, homogenisiert und der Analytik zugeführt. Bei den in Tabelle 1 aufgeführten Ergebnissen ist der Aschegehalt hervorzuheben. Die Bestimmung wurde in Anlehnung an die Vorgaben für feste Sekundärbrennstoffe (DIN EN ISO 21656) sowohl bei 550 °C, als auch in Bezug auf die Norm für feste Brennstoffe (DIN 51719) bei 815 °C durchgeführt. Eine Erklärung für den Unterschied zwischen den ermittelten Ergebnissen (93,3 im Vgl. zu 90,22 Ma.-%) ist die thermische Zersetzung von Calciumcarbonatverbindungen ab etwa 635 °C (Halikia et al. 2001). Der Gehalt an Kohlenstoff mit 5,8 Ma.-% und der Heizwert mit 2.030 kJ/kg sind aufgrund des hohen Anteils an Mineralik sehr niedrig. Die Konzentrationen an Stickstoff und Chlor lagen unterhalb der analytischen Nachweisgrenzen. Für Schwefel wurde ein Wert in Höhe von 0,3 Ma.-% nachgewiesen.

Der maßgebliche Parameter zur abfallrechtlichen Einordnung und Nutzung von Straßenaufbruch als Rezyklat ist der Gehalt an EPA-16-PAK. Zur Durchführung der Analyse wurden Proben des analysenfeinen Materials an drei zertifizierte Labore übersendet. Tabelle 1 zeigt, dass die drei Messungen unterschiedliche EPA-16-PAK Gehalte zwischen 626 und 980 mg/kg im Feststoff ergaben. Dies verdeutlicht die in Kapitel 1 beschriebene Heterogenität von Straßenaufbruch, selbst nach einer Zerkleinerung und Homogenisierung, oder die Fehleranfälligkeit der Analysen.

Tab. 1: Ergebnisse der Laboranalytik (Bezug: Rohzustand, sofern nicht anders angegeben)

Parameter	Einheit	Probe
Wassergehalt	Ma.-%	2,4
Aschegehalt 815 °C	Ma.-%	90,22
Aschegehalt 550 °C	Ma.-%	93,30
Flüchtige Bestandteile	Ma.-%	6,2
Heizwert	kJ/kg	2.030
Kohlenstoffgehalt	Ma.-%	5,8
Wasserstoffgehalt	Ma.-%	0,8
Stickstoffgehalt	Ma.-%	< 0,06
Schwefelgehalt	Ma.-%	0,3
Chlorgehalt	Ma.-%	< 0,02
TOC	Ma.-% _{TS}	4,3
EPA-16-PAK (Labor 1)	mg/kg _{TS}	980
EPA-16-PAK (Labor 2)	mg/kg _{TS}	655
EPA-16-PAK (Labor 3)	mg/kg _{TS}	626

Die chemische Zusammensetzung des Materials wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalysator (RFA) bestimmt. Die in der 17. BImSchV genannten Schwermetalle sind in der Probe nur in sehr geringen Konzentrationen nachzuweisen. Mit 0,075 Ma.-% zeigt Mangan die höchste Konzentration, gefolgt von Vanadium und Chrom mit etwa 0,02 Ma.-%. Die Gehalte an Arsen, Cadmium, Zinn, Antimon, Quecksilber und Thallium lagen nahe bzw. unterhalb der Nachweisgrenze von 0,0001 Ma.-%. Als häufigste Elemente wurden Silizium, Calcium, Eisen, Aluminium, Magnesium und Natrium quantifiziert.

Die thermogravimetrischen Analysen erfolgten in einer Thermowaage der Fa. Linseis (STA PT1600). Die Untersuchungen wurden in inerter Stickstoffatmosphäre und unter drei unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen von 3, 7 und 20 Vol.-% (Restgasmenge Stickstoff) durchgeführt. Es wurde eine Aufheizrate von 10 K/min und eine Endtemperatur von 900 °C festgelegt. Analog zu den brennstofftechnischen Untersuchungen wurde das analysenfeine Probenmaterial herangezogen. In allen nachfolgend dargestellten Versuchen betrug die Probenmasse je Messung etwa 100 mg. Die Messungen wurden als Dreifachbestimmung ($n=3$) durchgeführt und sind in Abb. 1 als Mittelwertkurven dargestellt.

Ein Gehalt an EPA-16-PAK von 980 mg/kg_{TS} in der Probe (vgl. Tabelle 1) bedeutet weniger als 0,1 Ma.-% Anteil an der Gesamtmasse. Wie in Abb. 1 zu sehen ist, wurden demgegenüber Massenabnahmen bis zu 10 % beobachtet. Somit dominiert das Austreiben anderer flüchtiger Bestandteile eine potenzielle PAK Entgasung, die anhand der Massenabnahme nicht nachweisbar ist. Zwischen 400 und 550 °C zeigt die Messung für 3 Vol.-% Sauerstoff eine langsamere Massenreduktion als bei inerten Bedingungen. Dies lässt darauf schließen, dass die Reaktion bei 3 Vol.-% Sauerstoff, im Vergleich zu Inertbedingungen, aber auch im Vergleich zu höheren Sauerstoffkonzentrationen, gehemmt abläuft.

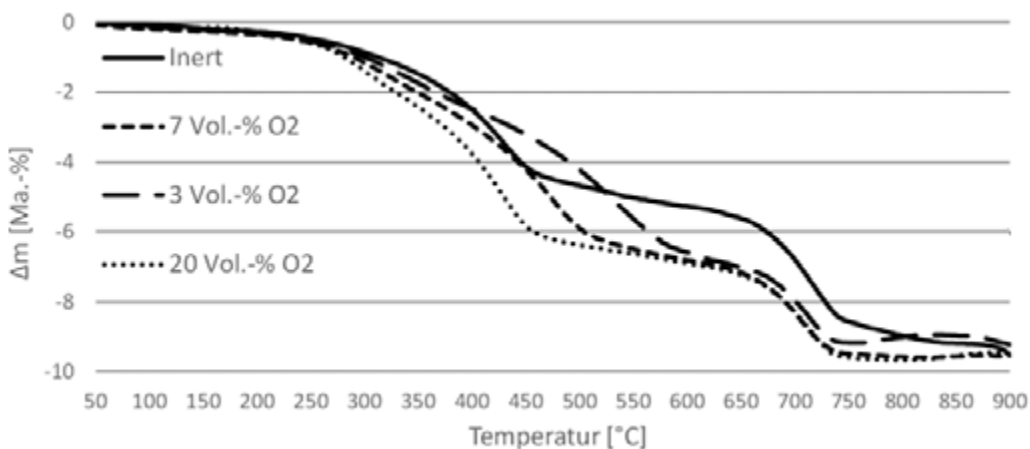
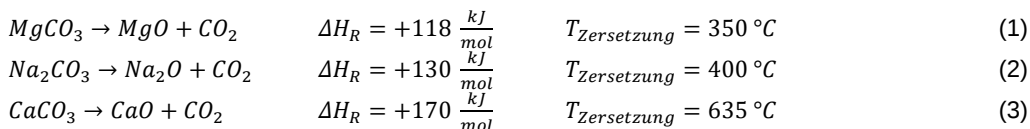


Abb. 1: Ergebnisse TGA Untersuchungen ($n=3$ für alle Kurven)

Ab etwa 600 °C bewegen sich die Messkurven, die unter Sauerstoffatmosphäre aufgenommen wurden, auf vergleichbarem Niveau. Bei inerter Atmosphäre ist aufgrund der ausschließlich stattfindenden pyrolytischen Vorgänge die Massenreduktion niedriger. Unter den oxidativen Bedingungen werden offensichtlich auch nicht flüchtige organische Bestandteile, die dem fixen Kohlenstoff in der Probe entsprechen, vergast. Aufgrund des fehlenden Reaktionspartners kann dies unter inerten Bedingungen nicht stattfinden. Zwischen 630 und 750 °C ist bei allen Messkurven eine weitere Massenreduktion erkennbar. Diese erklärt den Unterschied in den ermittelten Aschegehalten des Materials bei 550 und 815 °C (Vgl. Tabelle 1). In der Literatur wird in diesem Temperaturbereich die thermische Zersetzung von Calciumcarbonatverbindungen unter Freisetzung von Kohlenstoffdioxid beschrieben (Kalzinierung, siehe Formel 3) (Atkins, et al. 2020), (Halikia et al. 2001). Zusätzlich ist die Zersetzung anderer anorganischer Verbindungen, wie z.B. Magnesium- und Natriumcarbonat (Formeln 1 und 2), bei niedrigeren Temperaturen möglich.



Analog zur TGA-Methodik erfolgte die Differenz-Thermoanalyse in Dreifachbestimmung mit einer Aufheizrate von 10 K/min und einer Endtemperatur von 900 °C. Die DTA-Messungen ermöglichen die Zuordnung von endo- und exothermen Vorgängen und sind in Abb. 2 dargestellt. Bei Werten > 0 ist die ablaufende Reaktion als exotherm, bzw. < 0 als endotherm zu beschreiben.

Unter Verwendung von 3 und 20 Vol.-% Sauerstoff zeigte sich eine ausgeprägte exotherme Phase von 150 bis 600 °C. Der Wärmefluss bei Verwendung von Sauerstoff ist deutlich größer als bei inerten Bedingungen. Dies ist auf die exothermen Oxidationsreaktionen zurückzuführen. Die Form der Kurve für 20 Vol.-% Sauerstoff mit zwei klar erkennbaren Maxima zeigt, dass hier verschiedene chemische Regime vorliegen. Es ist zu vermuten, dass das erste Maximum auf Gasphasenreaktionen der flüchtigen Komponenten mit dem vorhandenen Sauerstoff zurückzuführen ist. Der zweite Peak kann heterogenen Gas-Feststoffreaktionen zugeordnet werden, die in diesem Temperaturbereich relevant werden.

Der Pyrolyseversuch unter Stickstoff zeigt drei abgrenzbare Phasen. Zunächst erfolgt zwischen 150 und 300 °C eine leicht endotherme Phase. Anschließend kann oberhalb von 300 °C ein deutlicher ausgeprägter endothermer Peak beobachtet werden. Das Minimum wird bei etwa 480 °C erreicht und flacht bis etwa 600 °C wieder ab.

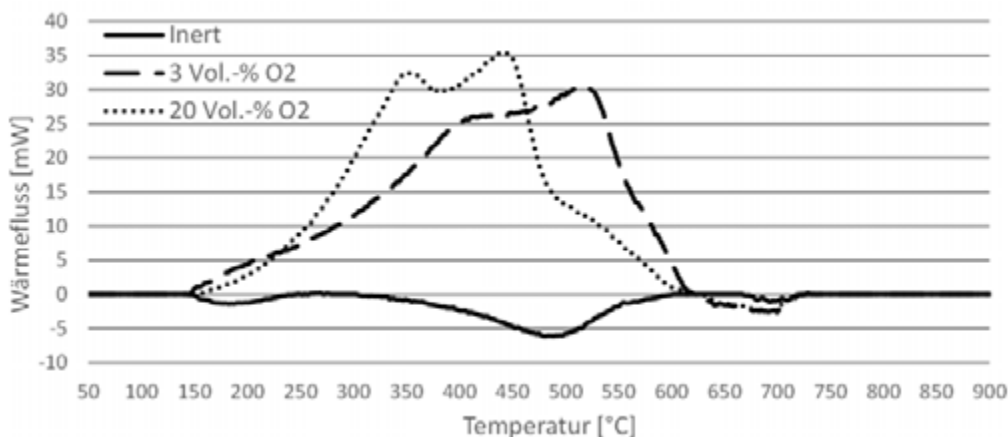


Abb. 2: Wärmefluss im Probenmaterial als Mittelwertkurve (n=3 für O₂-Kurven, n=2 für Inert)

Die endotherme Phase ab etwa 635 °C, die wie oben beschrieben der Kalzinierung (vgl. Gleichung 3) des Kalksteins zugeordnet werden kann, ist auch bei den Versuchen unter Sauerstoffatmosphäre zu beobachten. Dies ist darin begründet, dass die Zersetzung von CaCO₃ eine thermische Zerfallsreaktion und vom Sauerstoffangebot unabhängig ist. Der Verlauf der inerten Kurve unterscheidet sich von den beiden anderen, da bei inerten Bedingungen in diesem Temperaturbereich vermutlich noch (fixer) Kohlenstoff in der Probe vorliegt. Entweder behindern diese organischen Ablagerungen die Kalzinierung des Kalksteins aufgrund von Wärme- und Stofftransportlimitierungen, oder es finden mit den durch die weitere Temperaturerhöhung freigesetzten organischen Bestandteilen exotherme Reaktionen statt, welche die endotherme Wärmetönung des Kalzinierungsvorgangs zunächst kompensieren.

Die Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Korngröße auf das Verbrennungsverhalten wurden in einem Muffelofen durchgeführt. Als Material wurden die zwei Kornklassen 2-4 mm und 31,5-50 mm aus der Klassierung des Mahlguts der Prallmühle verwendet. Die Versuche bei 600

und 650 °C zeigten unabhängig von der Korngröße und der Verweilzeit übereinstimmende Ergebnisse. Wie bereits im Rahmen der TGA-Versuche beobachtet und erläutert, kommt es oberhalb von 650 °C zu Zersetzungsvorgängen anorganischer Bestandteile, die zu einer weiteren Massenreduktion führen. Bei den Versuchen mit der größeren Kornfraktion war dieser Effekt wenig ausgeprägt. Bei 750 °C zeigt die kleinere Körnung von 2-4 mm einen deutlichen Einfluss der Verweilzeit auf die Massenreduktion.

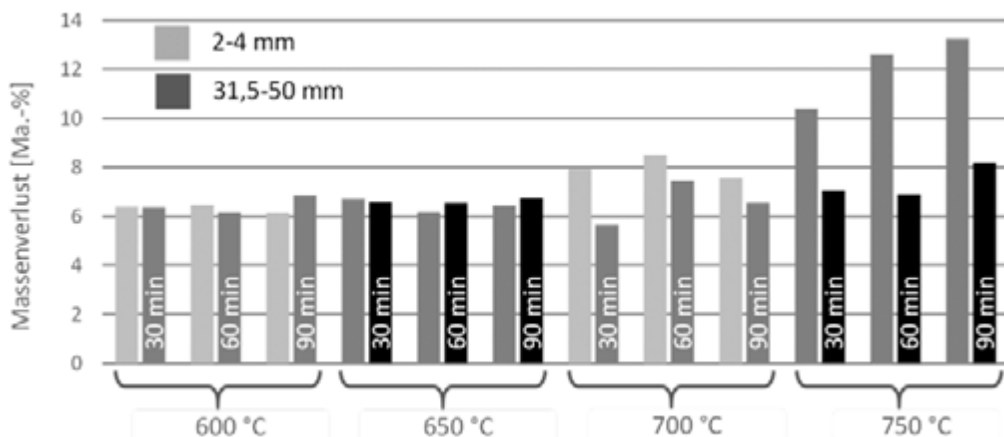


Abb. 3: Massenreduktion der Kornklassen 2-4 und 31,5-50 mm unter 3 Vol.-% Sauerstoff und Verweilzeit von 30 bis 90 Minuten

Auf diesen Ergebnissen aufbauend wurden Versuche mit unklassierten Proben aus der Praxis in einer Retorte im Muffelofen bei Temperaturen von 550, 600 und 650 °C durchgeführt. Die Sauerstoffatmosphäre wurde mit 3 Vol.-% bewusst niedrig angesetzt, um die ungünstigsten Behandlungsbedingungen zu simulieren. Wie in Abb. 4 zu sehen, wurden mit Zunahme von Verweilzeit, Temperatur und Sauerstoffgehalt tendenziell geringere Glühverluste und auch TOC-Gehalte in den Rückständen erreicht. Die Ergebnisse für EPA-16-PAK lagen unterhalb der Nachweisgrenze (Limit of Detection, LOD) oder waren mit 0,3 mg/kg_{TS} sehr niedrig.

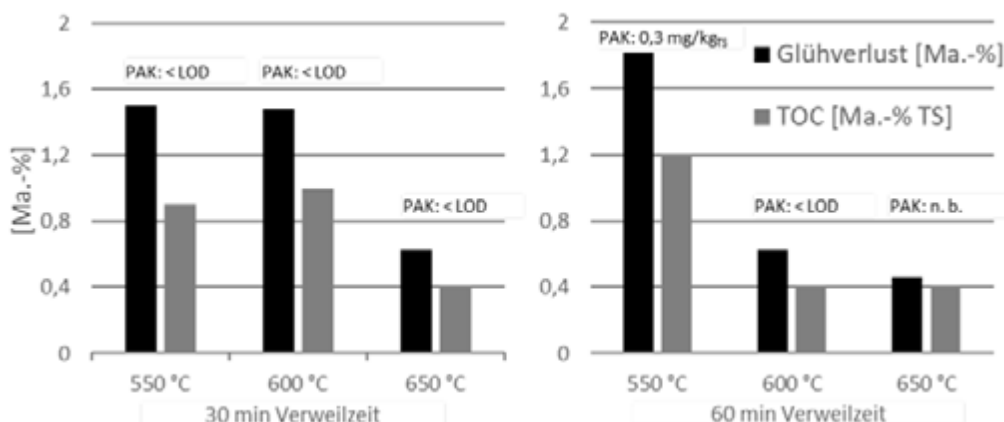


Abb. 4: Glühverlust (n=2), TOC (n=2) und PAK-Gehalt (n=1) der Proben aus den Retortenversuchen

3 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

In den dargestellten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das Austreiben von organischen Schadstoffen aus Straßenaufbruchsmaterial mit teer-/pechhaltigem Bindemittel durch die

thermische Behandlung möglich ist. Eine Temperatur von 600 °C scheint ausreichend, um die enthaltenen EPA-16-PAK auch aus der groben Korngrößenfraktion mit 31,5-50 mm vollständig in die Gasphase zu überführen. Alle Produkte der thermischen Behandlung unterschreiten den Schwellenwert von 25 mg/kg zur Nutzung als Rezyklat deutlich und sind nahezu kohlenstofffrei. Temperaturen oberhalb 650 °C sind bei der Behandlung zu vermeiden, da aufgrund der einsetzenden Kalzinierung die mechanische Stabilität des Materials abnimmt und die Verwertbarkeit negativ beeinflusst wird.

Die Sauerstoffkonzentration spielt eine untergeordnete Rolle, allerdings konnte eine Hemmung/Verzögerung der Reaktionen bei niedrigen Sauerstoffgehalten von 3 Vol.-% beobachtet werden. Der Sauerstoffgehalt hat zumindest einen Einfluss auf die Produktqualität. Eine Erhöhung führt bei gleicher Verweilzeit zu geringerem Glühverlust und TOC-Gehalt. Eine Verweilzeit von 30 Minuten in der heißen Zone bei 600 °C für Korngrößen < 50 mm erscheint für die Behandlung ausreichend. Im Hinblick auf den zu erwartenden Anstieg der Abfallströme von teerhaltigem Straßenaufbruch sind diese Ergebnisse somit eine wichtige Grundlage, um mögliche nachhaltige und wirtschaftliche Behandlungsstrategien zu entwickeln

Bei dem vorliegenden Beitrag handelt es sich um die überarbeitete Fassung der Erstveröffentlichung: Hee, Johann; Quicker, Peter: Thermisches Recycling von teerhaltigem Straßenaufbruch. In: Thiel, Stephanie; Thomé-Kozmiensky, Elisabeth; Senk, Dieter Georg; Wotruba, Hermann, Pomberger, Roland (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 8. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Neuruppin 2021, ISBN: 978-3-944310-54-1, S. 125–135.

LITERATUR

- LAGA, Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (2003). Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen, Abfällen. Technische Regeln. (Reihe: Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), 20). 5., erw. Aufl. Berlin: Schmidt.
- LfU, Bayerisches Landesamt für Umwelt (2019). Umweltfachliche Beurteilung der Lagerung, Aufbereitung und Verwertung von Straßenaufbruch. Merkblatt Nr. 3.4/1. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU).
- Atkins, P. W., Paula, J. d., & Hartmann, C. (2020). Kurzlehrbuch Physikalische Chemie. Für natur- und ingenieurwissenschaftliche Studiengänge. 5. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH.
- Benedix, R. (2011). Bauchemie. Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Halikia I., L. Zoumpoulakis, E. Christodoulou, D. Prattis (2001). Kinetic study of the thermal decomposition of calcium carbonate by isothermal methods of analysis. The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection, S. 89-102.
- Umweltbundesamt. (2016). Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe. Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar? Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt Fachgebiet IV 2.3.
- Wagner, J., Steinmetzer, S., Knappe, F., & Muchow, N. (2018). Untersuchung zur Entsorgung von Ausbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen bei kommunalen Straßenbaumaßnahmen in Sachsen. Sachsen: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.

Ausgangszustandsberichte für IPPC-Anlagen – Erfahrungen aus der Praxis

R. Hummel¹, K. Amort¹ & A.M. Ragoßnig¹

¹) RM Umweltkonsultanten ZT GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Gemäß Industrieemissionsrichtlinie hat der Betreiber einer IPPC-Anlage, in der im Rahmen seiner Tätigkeit relevante gefährliche Stoffe verwendet, erzeugt oder freigesetzt werden, im Zuge der Anlagengenehmigung (oder Änderung) einen Bericht über den Ausgangszustand in Bezug auf die beiden Umweltmedien Grundwasser und Boden vorzulegen. Die Umsetzung der rechtlichen Vorgaben in nationales Recht ist in Österreich in den verschiedenen Rechtsmaterien (AWG, WRG, GewO) bereits erfolgt. Für die Erstellung eines Ausgangszustandsberichtes steht in Österreich ein Leitfaden des BMK zur Verfügung, der als Orientierung herangezogen werden kann. Welche Schritte zu setzen sind und welche Abstimmungen und Recherchen es benötigt, wird in diesem Beitrag beschrieben. Bei endgültiger Einstellung der IPPC-relevanten Tätigkeit ist nochmals der Zustand zu erheben und ein Vergleich mit dem Ausgangszustand vorzunehmen. Im Anlassfall sind anschließend die erforderlichen Maßnahmen zu setzen, um eine verursachte Verschmutzung zu beseitigen und damit den Ausgangszustand wiederherzustellen.

1 RECHTLICHE GRUNDLAGEN

Die Verpflichtung zur Erstellung eines Ausgangszustandsberichtes ergibt sich durch die Vorgaben aus der Industrieemissionsrichtlinie (Europäisches Parlament und Rat, 2010) sowie die erfolgte Umsetzung im österreichischen Recht. Da die genannten IPPC-Tätigkeiten mehrere Branchen betreffen, erfolgte dies in verschiedenen Rechtsmaterien, wobei nachfolgend nur die wichtigsten genannt werden.

1.1 Industrieemissionsrichtlinie (IER)

Gemäß Artikel 22 Abs. 2 IER (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.

Gemäß Artikel 16 IER (Europäisches Parlament und Rat, 2010) ist eine wiederkehrende Überwachung mindestens alle fünf Jahre für das Grundwasser und mindestens alle zehn Jahre für den Boden durchzuführen.

1.2 Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002)

Gemäß § 39 Abs. 3 Z 9 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 verursacht wurden, ist eine Darstellung der erforderlichen Maßnahmen zur Beseitigung dieser Verschmutzung, um das Gelände wieder in jenen Zustand zurückzuführen, anzuschließen. (BMLFUW, 2002)

1.3 Weitere Rechtsmaterien

1.3.1 Wasserrechtsgesetz 1959 (WRG 1959)

Gemäß § 134a Abs. 1 WRG 1959 (BMLFUW, 1959) hat jeder Betreiber einer Anlage, in der eine oder mehrere Tätigkeiten gemäß Anhang I Industrieemissionsrichtlinie (Europäisches Parlament und Rat, 2010) durchgeführt werden, sofern er relevante gefährliche Stoffe verwendet, einsetzt bzw. freisetzt, bevor eine Anlage in Betrieb genommen oder der bestehende Konsens für ein Anlage (bspw. aufgrund der Anpassung an den Stand der Technik) erneuert bzw. aktualisiert wird, einen Bericht über den Ausgangszustand des Anlagengeländes im Hinblick auf eine mögliche Verschmutzung des Grundwasser zu erstellen und der zuständigen Behörde zu übermitteln.

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

Als weitere Rechtsmaterien, die einen Bezug auf die Notwendigkeit zur Erstellung eines Ausgangszustandsberichtes geben, wären im industriellen Kontext insbesondere das Emissionsschutzgesetz für Kesselanlagen (§ 17 Abs. 2 Z 5 EG-K 2013) (Österreichischer Nationalrat, 2013) sowie das Mineralrohstoffgesetz (§ 121d Abs. 3 Z 3 MinroG) (BMLRT, 1999) zu nennen.

2 VORGEHENSWEISE UND ERFAHRUNGEN

2.1 Ermittlung Stoffinventar

Die erforderlichen Inhalte eines Ausgangszustandsberichtes sind die Darstellung des Zustands der beiden Umweltmedien Boden und Grundwasser zum aktuellen Zeitpunkt unter Berücksichtigung der im Rahmen einer Tätigkeit einer IPPC-Behandlungsanlage verwendeten, erzeugten oder freigesetzten relevanten gefährlichen Stoffe, sowie auf Basis der Informationen zum Standort (und dessen Historie). Somit bildet die Ermittlung der relevanten gefährlichen Inhaltsstoffe den ersten Schritt. Die Vorgangsweise soll sich dabei in Anlehnung an den vom BMK herausgegebenen Leitfaden „Bericht über den Ausgangszustand“ (BMLFUW, 2014) orientieren. Hier bieten sich prinzipiell zwei Strategien in Bezug auf das betreffende Stoffinventar des Betriebsstandortes mit IPPC-Tätigkeiten an. Einer „Bottom-Up“-Betrachtung, in der die komplette Liste des am jeweiligen Standort eingesetzten Stoffinventars als Ausgangsbasis verwendet wird, ist vor dem Hintergrund der Rechtssicherheit der Vorzug zu geben, und zwar im Vergleich zur „Top-Down“-Strategie, in der nur jene Stoffe/Gemische Beachtung finden, die entsprechend einer Vorbetrachtung als relevant erachtet werden. Die Gründe liegen hier vermehrt darin, dass bei „Bottom-Up“ infolge der Aggregierung von Inhaltsstoffen einzelner verwendeter Gemische tatsächlich relevante gefährliche Stoffe nicht so leicht „übersehen“ werden und zudem bei der Auswertung der Analysenergebnisse ein besseres Verständnis vor allem in Bezug auf die erforderliche Plausibilisierung der vorliegenden Ergebnisse besteht. Allfällige Verunreinigungen können selbstverständlich auch von anderen (nicht IPPC-)Tätigkeiten oder von bereits im Boden befindlichen Verunreinigungsherden (bspw. kriegsbedingt oder Anschüttungen, die vor der Einführung des Abfallwirtschaftsgesetzes vorgenommen wurden) herrühren. Darüber hinaus können auch für den Ausgangszustand nicht gefährliche Stoffe allfällige Qualitätsbeeinträchtigungen im Grundwasser bzw. Boden bewirken. Dies ist insbesondere dann möglich, wenn zwar der gegenständliche Stoff ein Gefährlichkeitskriterium erfüllt, jedoch für die Betrachtung des Ausgangszustandsberichtes (im Sinne des Leitfadens) als stofflich nicht relevant gilt.

Bei der mengenmäßigen Relevanz ist zu beachten, dass anhand der Daten des Stoffinventars und der aktuellen Sicherheitsdatenblätter jeder Inhaltsstoff über alle Stoffgemische hinweg aggregiert werden muss. So kann es sein, dass der betreffende Inhaltsstoff aus dem ersten Stoffgemisch zunächst nur 80% der Mengenschwelle erreicht, jedoch aufgrund des zweiten Stoffgemisches, bei dem selbiger Stoff ebenfalls enthalten ist, eben diese Mengenschwelle überschreitet, womit dieser Inhaltsstoff für den Ausgangszustand jedenfalls im Rahmen der Ermittlung des Ausgangszustands berücksichtigt werden muss.

2.2 Standortinformationen

Parallel zur Erstellung der Stoffliste zur Ermittlung der relevanten gefährlichen Inhaltsstoffe sind Informationen zum Standort (Bereiche Oberfläche, Boden und Geologie, Hydrogeologie und Grundwasser, Hydrologie, Meteorologie und klimatische Bedingungen, Oberflächengewässer und insbesondere die technischen Maßnahmen zum Schutz von Boden und Grundwasser sowie Altstandort-Abfrage) zu sammeln. Als Informationsquelle eignen sich hier die länderspezifischen GIS-Systeme, deren Daten entweder frei oder nach Registrierung zugänglich sind. Auch vorhandene grundlegende Charakterisierungen gemäß DVO 2008 (BMLFUW, 2008) bzw. BAWP 2017 (BMNT, 2017) oder Grundwasseranalysen können zumindest einen ersten Eindruck über die aktuelle Situation geben, wohingegen spezifische auf die tatsächlich mengenmäßig relevanten gefährlichen Inhaltsstoffe abstellende qualitative Aussagen vielfach nicht möglich sind.

Nachdem die relevanten gefährlichen Stoffe ermittelt wurden sowie die notwendigen Informationen über die örtlichen Gegebenheiten vorliegen, ist der räumliche Bezugsbereich festzulegen. Als Ausgangspunkt bieten sich hier insbesondere bestehende Umweltinspektionsberichte aus früheren Behördenkontrollen an. Darin sind die IPPC-Anlagen (und die zu berücksichtigenden weiteren in direktem Zusammenhang stehenden Anlagenteile) angeführt. Für den räumlichen Bezugsbereich sind neben diesen Anlagenbereichen insbesondere noch die Lagerbereiche der ermittelten relevanten gefährlichen Stoffe hinzuzuzählen sowie die jeweiligen Manipulations- und

Transportflächen. Darüber hinaus ist auch die örtliche Situation (bspw. in Bezug auf befestigte Flächen, Grünflächen, Kanalisation, Brandschutz, etc.) in die Überlegungen miteinzubeziehen.

2.3 Beweissicherungskonzept

Als nächster Schritt ist eine Beweissicherungskonzept zu erstellen, in dem die Untersuchungsstrategie dokumentiert wird. Ob im Rahmen des Beweissicherungskonzeptes tatsächlich beide Umweltmedien (Boden und Grundwasser) einer näheren Betrachtung (d.h. analytischen Untersuchung) unterzogen werden müssen, hängt insbesondere von den örtlichen Gegebenheiten (bspw. Grundwasserflurabstand, Ergiebigkeit, Bodenversiegelung, Messstellenpunkte) ab. Zudem kann im Falle der Verwendung/Erzeugung/Freisetzung von leichtflüchtigen organischen Verbindungen die analytische Betrachtung der Bodenluft als notwendig erachtet werden. Vorrangig sollte im Hinblick auf den zu untersuchenden Parameterumfang darauf geachtet werden, Einzelnachweise (d.h. eines bestimmten Stoffes) nur in letzter Konsequenz und nur, wenn keine anderen Parameter (bspw. Summenparameter) geeignet sind, mitaufzunehmen. Auf Seiten des Anlageninhabers ist in dieser Phase in Bezug auf die Zeitschiene ggf. die Dauer zur Errichtung allfälliger zusätzlicher Messstellen (bspw. Grundwasserpegel) zu beachten. Selbstverständlich ist in den Überlegungen hinsichtlich geeigneter Messstellen bestehenden Aufschlüssen, Brunnen, Grundwasserpegel udgl. der Vorzug zu geben, um insbesondere allfällig notwendige Errichtungskosten neuer Messstellen gering halten zu können.

2.4 Ermittlung des Ausgangszustands

Nach Durchführung der ergänzenden Untersuchungen zur Bestimmung des derzeitigen Ausgangszustands bieten sich zur Bewertung/Einschätzung der Messergebnisse verschiedene Vergleichsmöglichkeiten an, wie bspw. ÖNORM S2088-1 (Austrian Standards International 2018, 2018), DVO 2008 (BMLFUW, 2008), TWV (Mindestuntersuchungsumfang exklusive Biologie) (BMSG, 2017), QZV Chemie Grundwasser (BMLFUW, 2010). Wie umfangreich diese Betrachtung zu erfolgen hat, hängt auch von den örtlichen Gegebenheiten ab. Man denke nur an eine vorhandene im Grundwasser-Abstrom befindliche Grundwasserentnahme, womit ein Vergleich mit der TWV (BMSG, 2017) als obligatorisch angesehen werden muss.

Die Bewertung sollte unter verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Hierunter ist gemeint, dass bei Vorliegen allfälliger Verunreinigungen ein Konnex zur IPPC-Tätigkeit hinterfragt werden muss. Sind diese nicht gegeben, weil sie begründbar auszuschließen sind, und die Verunreinigung als nicht gefährlich anzusehen, ist die Dokumentation dieses Umstands für die Erstellung des Ausgangszustandsberichts ausreichend. Andernfalls sind weitere Betrachtungen im Hinblick auf die Ausbreitung der Kontamination erforderlich, womit mit weiteren chemischen Untersuchungen zu rechnen sein wird mit dem Ziel, eine klare Abgrenzung des Kontaminationsherds (inklusive Kontaminationsgrad) zu erhalten.

2.5 Monitoring / Schließungsbericht

Da nach der Erstellung des Ausgangszustandsberichtes die zu betrachtenden Umweltmedien Boden und Grundwasser in regelmäßigen Abständen (Boden alle 10 Jahre, Grundwasser alle 5 Jahre) im Rahmen eines Monitoringprogramms weiterhin zu überwachen sind, empfiehlt sich bereits mit der Erstellung des Beweissicherungskonzeptes ein Monitoringkonzept mitanzuschließen und dieses ebenfalls mit der zuständigen Behörde abzustimmen.

Bei Stilllegung der IPPC-Anlage ist ebenfalls ein Bericht zu legen, in dem sinngemäß nochmals der Zustand der beiden Umweltmedien Boden und Grundwasser ermittelt und mit dem Stand des Ausgangszustandsberichtes verglichen wird. Sollte sich dadurch ergeben, dass es zu einer Verschlechterung der Qualität von Boden und/oder Grundwasser gekommen ist, hat der Anlageninhaber die Verpflichtung, den damaligen Zustand zum Zeitpunkt der Erstellung des Ausgangszustandsberichtes wiederherzustellen. Dies kann letzten Endes zu der Umsetzung eines Sanierungsvorhabens führen, wobei ein solches Vorhaben in enger Abstimmung mit der zuständigen Behörde erfolgen sollte.

3 SCHLUSSFOLGERUNG

Welche Inhalte ein Ausgangszustandsbericht zu enthalten und wie insbesondere die Ermittlung der relevanten gefährlichen Stoffe zu erfolgen hat, kann aus dem Leitfaden zum Bericht über den Ausgangszustand (BMLFUW, 2014) entnommen werden.

Die Erfahrung zeigt, dass ein „Bottom-Up“-Ansatz bei der Ermittlung der relevanten gefährlichen Stoffe der Vorzug gegeben werden sollte, da betreffende Inhaltsstoffe ggf. auch in auf dem ersten Blick „nicht relevanten“ Stoffgemischen enthalten sein können. Die Einschränkung der stofflich relevanten auf die stofflich und mengenmäßig relevanten gefährlichen Stoffe erfolgt anhand vorhandener Daten des Stoffinventars und der jeweiligen Sicherheitsdatenblätter. Gegebenenfalls sind bei fehlender Datenlage noch weitere Detailrecherchen erforderlich, um letztendlich einen Vergleich mit den Mengenschwellen vornehmen zu können. Eine aktuell gehaltenes Stoffinventar kann zudem auch in anderen Bereichen bei der Behördenkommunikation hilfreich sein.

Angeraten wird, dass nach Festlegung des räumlichen Bezugsbereichs ein Beweissicherungskonzept erstellt und dieses mit der zuständigen Behörde abgestimmt werden sollte, bevor mit den ergänzenden Untersuchungen gestartet wird. Im Rahmen der Überlegungen zu einer allfälligen Grundwasserbeweissicherung ist auch die Betrachtung des Grundwasseranstroms empfehlenswert, um allfällige Einflüsse (Landwirtschaft, Tankstellen, Putzereien, etc.) von außen ebenfalls berücksichtigen zu können.

Bei der Bestimmung des erforderlichen Parameterumfangs sind Einzelnachweise bestimmter Stoffe nur in letzter Konsequenz heranzuziehen. Die Auswertung der Messergebnisse und dessen Plausibilisierung muss in Bezug auf die beiden Umweltmedien Boden und Grundwasser ein nachvollziehbares Bild liefern, um den aktuellen Zustand ausreichend darlegen zu können.

Abschließend kann rückblickend festgehalten werden, dass für die Erstellung eines Ausgangszustandsberichtes Fachwissen aus mehreren Bereichen (bspw. Abfallwirtschaft, Chemie, Geologie, Hydrogeologie, etc.) erforderlich ist und infolge der ggf. erforderlichen Herstellung von Probenahmestellen und der entsprechenden Beprobungen im Regelfall zumindest von einem Jahr Bearbeitungsdauer auszugehen ist.

LITERATUR

- Austrian Standards International 2018. (2018). ÖNORM S 2088-1:2018-05, Kontaminierte Standorte - Teil 1: Standortbezogene Beurteilung von Verunreinigungen des Grundwassers bei Altstandorten und Ablagerungen. Wien.
- Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, U. u. (2002). Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 2002), BGBl. I Nr. 102/2002. 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. 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. Wien.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW). (1959). Wasserrechtsgesetz 1959 - WRG 1959, BGBl. Nr. 215/1959. 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. Wien.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT). (2017). Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 (BAWP 2017). Wien.
- Bundesministerium für soziale Sicherheit und Generationen (BMSG). (2017). Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TWV), BGBl. II Nr. 304/2001 idF BGBl. II Nr. 362/2017. Wien.
- Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (BMBWF). (1994). Gewerbeordnung (GewO 1994), BGBl. Nr. 194/1994. 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) (Neufassung). 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. Wien.

Sensorbasierte Sortierung mineralischer Abfälle und Rohstoffe

S. Müller¹, A. Müller¹ & S. Liebezeit¹

¹⁾ IAB, FB Baustoffe, FaB Baustoffrecycling, Weimar, Deutschland

KURZFASSUNG: Einhergehend mit der rasanten Entwicklung der Computertechnik und den beachtlichen Fortschritten im Bereich der Sensorik ist seit Mitte der 1980er Jahre die Entwicklung von sensorgestützten Sortierv Verfahren zu beobachten. In der Abfallaufbereitung begann die Einführung sensorgestützter Verfahren bei der Sortierung von Altglas mit sogenannten Rinnenmaschinen. Seitdem wurde die Leistungsfähigkeit der Maschinen und Anlagen kontinuierlich ausgebaut. Gegenwärtig reichen die eingesetzten Detektoren von der visuellen Spektroskopie bis zur Röntgenfluoreszenzspektroskopie. Auch der Partikelgrößenbereich, in dem sensorbasierte Verfahren Anwendung finden, entwickelt sich stetig weiter. Die untere Grenze liegt gegenwärtig bei 1 mm für die Aussortierung von Keramik, Porzellan und Steinen aus Altglas (Bayer 1996, Dornauer et al. 2017). Aber auch für die optische Sortierung großer, schwerer Bruchstücke mit Massen von bis zu 2 kg gibt es Beispiele (Coppers & Duddek 2008). In der Kreislaufwirtschaft ist die sensorgestützte Sortierung heute unentbehrlich – z. B. zur Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen aus gemischten Kunststofffraktionen oder zur Abtrennung von rezyklierbaren Fraktionen aus Altpapiergemischen. Sie bildet die Grundlage für die Realisierung von Stoffkreisläufen. Dagegen ist sie bei der Bauabfallaufbereitung noch sehr selten anzutreffen, obwohl sie als einziges Verfahren die Möglichkeit bietet, verschiedene mineralische Baustoffarten voneinander zu trennen. Als ein Akteur im Bereich der sensorbasierten Sortierung hat die OptoSort GmbH den Freifallsortierer Apollo© entwickelt. Die Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Sortierung von Bauabfällen wurde von der IAB Weimar gGmbH in vielfältigen Sortier- und Trennversuchen analysiert.

1 FUNKTIONSPRINZIP UND TECHNISCHE DATEN DES FREIFALLSORTIERERS

Der Freifallsortierer „Apollo“ stellt in Anlehnung an die von Pretz und Julius (Pretz & Julius 2008) eingeführte Einteilung eine „Rinnenmaschine“ dar. Eine Schwingförderrinne dient zunächst der Vereinzelung und gleichmäßigen Verteilung des aufgegebenen Rezyklates über die gesamte Arbeitsbreite des Sortierers von 600 mm. Von dort gelangt das Material in die Ebene „Sortiermaschine“. Die Identifizierung erfolgt am freifallenden Stoffstrom, wobei Farberkennung und hyperspektrale Nahinfrarot (NIR)-Technologie einzeln agieren oder miteinander gekoppelt sind. Beidseitig zum Stoffstrom angeordnete Sensoren erfassen jeweils zwei gegenüberliegende Partikelflächen. In Abhängigkeit vom Ergebnis der Bemusterung werden die Partikel in der Ebene „Materialaustrag“ entweder mittels Druckluft als „Reject“ ausgetragen oder verlassen den Sortierer im freien Fall als „Accept“. Um den Druckluftverbrauch zu minimieren, wird in der Regel der Stoff, der in geringeren Anteilen im Aufgabegemisch vorliegt, „ausgeblasen“ (Abb. 1).

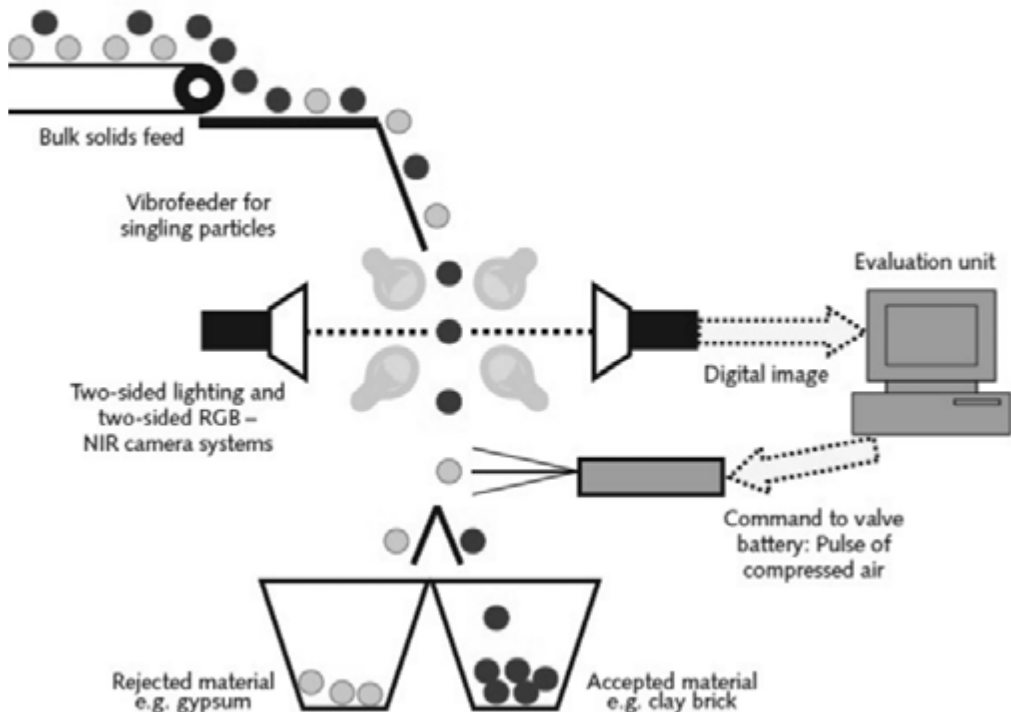


Abb. 1: Prinzip der Sensorgestützten Sortierung im freien Fall OptoSort Apollo©

Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Detektierung der Bestandteile von Bauschuttgemischen mit Hilfe der Nahinfrarot(NIR)- Technik und die darauf aufbauende Trennung der Gemische. Der Sortierer ist für Partikelgrößen von 8 mm bis 75 mm mit einem maximalen Korngrößenverhältnis 1:4 geeignet. Beispielsweise können Fraktionen 8/32 mm oder 16/64 mm sortiert werden (Vgl. Tabelle 1).

Tab. 1: Technische Daten des Freifallsortierers OptoSort Apollo©

Kriterium	Daten
Materialtransport im Sensorbereich	freier Fall
Arbeitsbreite	600 mm
Sensorsystem	zweiseitig, je eine NIR- und eine RGB-Kamera auf jeder Seite
Trennsystem	pneumatisch, 96 Ventildüsen
Druckluftverbrauch	5 m³/min bei 8 bar
Partikelgrößenbereich	10 - 100 mm
Partikelgrößenverhältnis	1:3 bis 1:4

2 ERGEBNISSE AUSGEWÄHLTER SORTIERVERSUCHE IM IAB-TECHNIKUM

Bei der Bauschuttaufbereitung müssen unterschiedliche Sortieraufgaben gelöst werden. Zum einen kann es erforderlich sein, einen Störstoff aus einem Bauschuttgemisch auszusortieren, um das Gemisch für bestimmte Anwendungen brauchbar zu machen. Häufig auftretende mineralische Störstoffe sind Gips oder leichte Baustoffe wie Poren- oder Leichtbeton. Als nichtmineralischer Störstoff kann Holz auftreten, das mit konventionellen trockenen Sortiertechniken in der Regel nicht vollständig entfernt werden kann.

Zum anderen ist die Wertstoffgewinnung aus Bauabfällen ebenfalls gefragt. Beispielsweise ist die Gewinnung von sortenreinen Ziegelkörnungen aus Bauschutt von großem Interesse, weil diese u.a. in der Vegetationstechnik eingesetzt werden können. Für rezyklierte Gesteinskörnungen, die

bei der Herstellung von R-Betonen eine wichtige Rolle spielen, ist eine definierte Zusammensetzung einzuhalten. Mit Hilfe der sensorbasierten Sortierung wird die Zusammensetzung gezielt verändert, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen.

Bei der Gewinnung von Rohstoffen für die Baustoffherstellung wird deren Abbau in der Regel so gesteuert, dass anforderungsgerechte Ausgangsmaterialien erzeugt werden. Wo sich Rohstoffverknappungen wie in der Gipsindustrie abzeichnen, kann die Sortierung helfen, die Zusammensetzung bisher unbrauchbarer Rohstoffe gezielt zu steuern, um sie für die anschließende Baustoffherstellung brauchbar zu machen.

2.1 Beispiel: Abtrennung von Gips aus einem Bauschuttgemisch

Ausgangsmaterial war ein Bauschuttgemisch aus Beton, Ziegel und Gips, das in der Fraktion 22,4/63 mm vorlag. Der Gipsgehalt, der 4,9 M.-% betrug, hätte nicht nur eine Verwertung unmöglich gemacht, sondern auch die Deponierung erschwert. Im Vorfeld der Sortieraufgabe wurden die NIR-Spektren der zu trennenden Baustoffe aufgenommen (Abb. 4) und das Sortierprogramm auf diese Materialien angelernt. Dem so vorbereiteten Sortierer wurden anschließend ca. 60 kg Gemisch zur Trennung zugeführt. Der nach dem Sortierdurchlauf im Produkt verbleibende Gipsgehalt wurde durch eine händische Sortieranalyse nach Augenschein ermittelt. Das Ergebnis der Sortierung – im Abb. 5 als Bilanz dargestellt – zeigt, dass der Gipsgehalt deutlich gesenkt werden konnte. Mit den verbleibenden 0,4 M.-% Gips des akzeptierten, im freien Fall ausgetragenen Produktes, wäre eine Verwertung in ungebundenen Tragschichten im Straßenbau möglich.

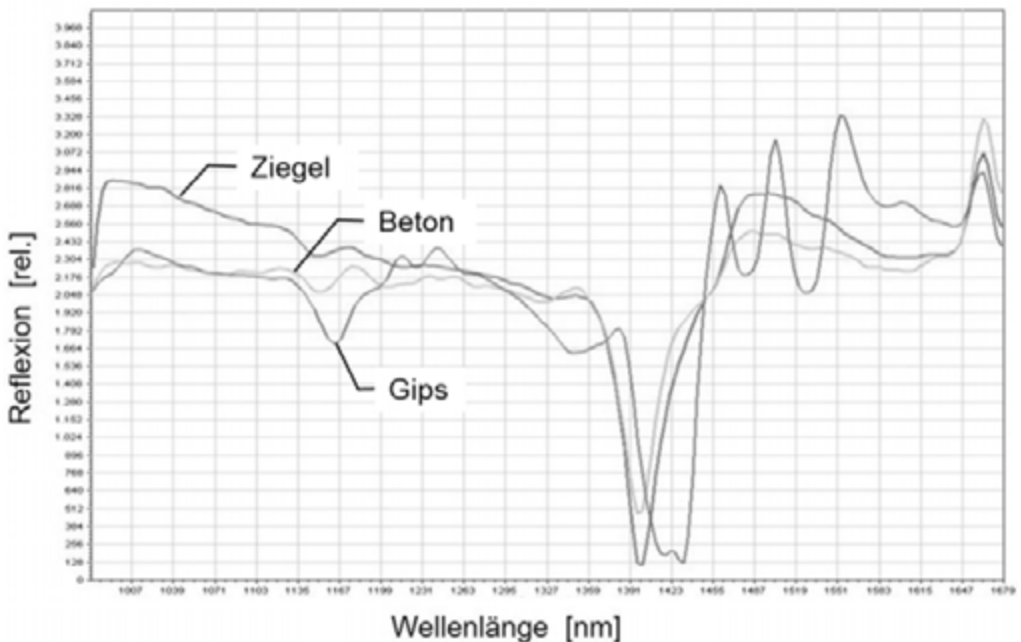


Abb. 2: Erste Ableitung der NIR-Spektren von Ziegel, Beton und Gips

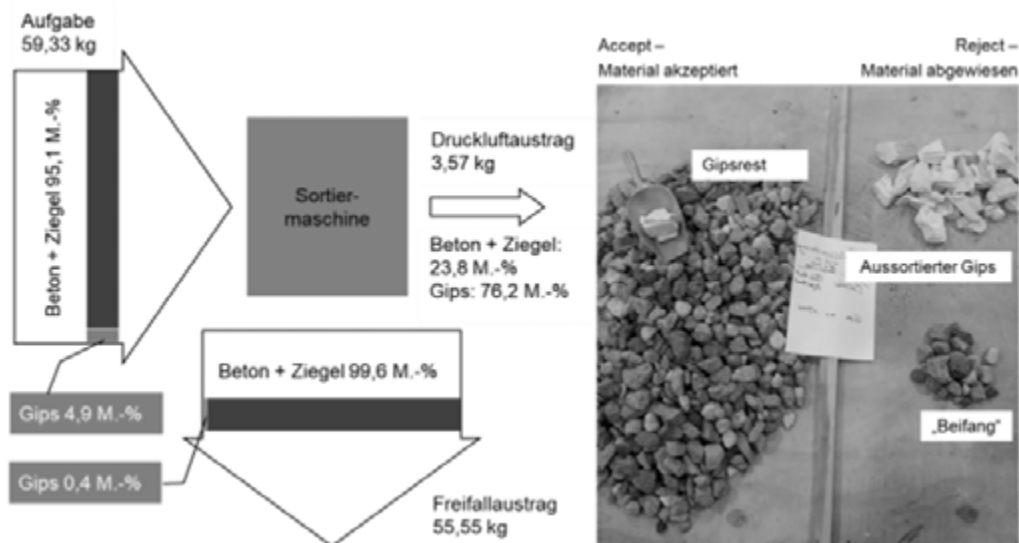


Abb. 3: Sortiерergebnis der Abtrennung von Gips aus einem Bauschuttgemisch

3 ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag wird über einen Sortierversuch an mineralischem Bauschutt mit dem Freifallsortierer „Apollo“ berichtet. Dessen Besonderheit sind die jeweils beidseitig des Materialstroms angeordneten Sensorpaare, mit denen die gegenüberliegenden Partikelflächen erfasst und damit auch Anhaftungen oder Beschichtungen erkannt werden können. Die Identifizierung erfolgt mittels Farberkennung und/oder anhand von NIR-Spektren wie im vorliegenden Fall. Dazu werden die Spektren zunächst von phänotypischen Vertretern der Bestandteile aufgenommen und das Sortierprogramm auf diese Materialien angelemt. Gegenstand des hier dargestellten Sortierversuchs war die Abtrennung von Gips aus einem Bauschuttgemisch. In dem vorgestellten Fall konnte durch die Sortierung Qualitätsverbesserungen erreicht werden, die eine „artgerechte“ Verwertung möglich machen.

LITERATUR

- Bayer, W. (1996) Altglasaufbereitung: Farbsortierung und vollautomatische Qualitätskontrolle in Theorie und Praxis. Glastechnische Berichte. Glass Sci. Technol. Vol. 69, Nr. 1, s. N1–N7.
- Dornauer, R., Pramer, J., Huber, R. (2017) Möglichkeiten und Anwendungen neuester VIS/NIR-Sortierer in der Aufbereitung von Sekundärrohstoffen. www.vivis.de/phocadownload/download/2016.../2016_rur_611-620_dornauer.pdf vom 06.04.2017
- Coppers, M.; Duddek, K. (2008) Optische Sortierung großer und schwerer Teile. Gesteinsperspektiven. Heft 7, 2008, S. 46–49.
- Pretz, T.; Julius, J. (2008) Stand der Technik und Entwicklung bei der berührungslosen Sortierung von Abfällen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. Heft 07–08/2008, s. 105–112.

Smartes Recycling mit dem digitalen Produktpass – Welche Informationen braucht es und welche Herausforderungen gilt es zu meistern in der Abfallbehandlung von Elektro- und Elektronikgeräten?

E. Wagner¹, E. Poppe¹, M. Malzacher², D. Baumgärtel², I. Budde² & M. Jaeger-Erben³

¹⁾ Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

²⁾ Circular Fashion, Berlin, Deutschland

³⁾ BTU Cottbus, Cottbus, Deutschland

KURZFASSUNG: Der von der Europäischen Kommission geplante digitale Produktpass soll ein zentrales Instrument für die Speicherung und den Austausch von Produktinformationen entlang des gesamten Produktlebenszyklus werden. Hierzu gehören insbesondere detaillierte Informationen zu den Material- und Designeigenschaften von Produkten, welche als Schlüsselfaktoren für ein hochwertiges Recycling und die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft gelten. Das Ziel der vorliegenden Kurzstudie ist es, die gesetzlichen Informationsanforderungen im Bereich der Abfallbehandlung zu bewerten und bestehende Informationslücken zu identifizieren, welche eine besonders Relevanz für die Einführung eines digitalen Produktpass aufweisen. Auf Basis eines Screening der wichtigsten gesetzlichen Anforderungen und dem Einbezug von verschiedenen Stakeholdern kann gezeigt werden, dass der Hauptinformationsbedarf derzeit Informationen auf Materialebene (Gefahrstoffe, Materialidentität, Klassifizierung) sowie designbezogene Informationen zur Demontage umfasst. Aufgrund der Komplexität der Lieferketten und steigenden Abfallrelevanz stehen Elektro- und Elektronikprodukte im Fokus der Studie.

1 EINLEITUNG

Die globale Produktion und der Konsum von Elektro- und Elektronikgeräten (EEE) gehören derzeit zu den stärksten wachsenden Wirtschaftsbereichen und Abfallströmen. Im Jahr 2018 wurden rund 10,3 Tonnen EEE in den Europäischen Markt gebracht, wovon 38,9% recycelt wurden. Folgt man den Prognosen wird sich das Marktwachstum und die damit verbundenen Elektroschrottmengen in Zukunft weiterhin massiv steigern, sofern sich die Praktiken aller Wirtschaftsakteure nicht ändern (EC 2019).

Es sind jedoch nicht nur die steigenden Mengen, die Elektronik bisher zum Problemprodukt in der Abfallbehandlung machen, es ist auch deren Vielfalt und komplexe Zusammensetzung. Allein auf der Verkaufsplattform Amazon.com waren im Jahr 2016 rund 29% bzw. 67 Millionen verschiedene Artikel vom Gesamtsortiment im Elektronikbereich gelistet (Statista 2017). Moderne EEE sind heute hochintegriert und enthalten eine Vielzahl an seltenen und kritischen Rohstoffen. Diese liegen oftmals in nur geringfügigen Mengen vor oder sind ein Bestandteil von anderen Stoffmischungen, sodass eine vollständige rohstoffliche Wiedergewinnung aus energetischer, wirtschaftlicher und auch verfahrenstechnischer Sicht oftmals nicht lohnenswert erscheint. Die Integrationsdichte, Miniaturisierung und funktionale Dichte von elektronischen Komponenten wird auch weiterhin zunehmen (Wang et al. 2019) und dieses Recyclingdilemma verschärfen. Erschwerend kommt hinzu, dass viele Elektronikprodukte eine nur verhältnismäßige kurze Nutzungsdauer aufweisen und trotz Funktionsfähigkeit vorzeitig gegen neue Produkte ersetzt werden (Van den Berge 2022).

Mit dem Green Deal hat sich die Europäische Union (EU) im Jahr 2019 ein Rahmenprogramm gegeben, in dem auch durch einen besseren Zugang und höhere Verfügbarkeit von Informationen entlang der Wertschöpfungskette die Vision einer Circular Economy (CE) verwirklicht werden soll. Als ein zentrales Instrument hierfür nennt die EU die Einführung eines digitalen Produktpasses, der sowohl die bereits vorhandenen und zukünftig verpflichtenden Informationen von Produkten digital zusammenführen soll. Der Anwendungsbereich, Inhalt, Umfang und technische Implementierung sind bisher nur in wenigen Grundzügen in dem Entwurf 2022/0095 (COD) zur Ökodesign-Verordnung beschrieben (EC 2022). In den folgenden Abschnitten soll untersucht werden, welche

bestehenden Informationsanforderungen im Bereich der Abfallbehandlung ein Teil des geplanten digitalen Produktpass sein können und welchen zusätzlichen Informationsbedarf es gibt.

Das Europäische Vorhaben eines digitalen Produktpasses setzt voraus, dass die entsprechenden Produktinformationen vorhanden, zugänglich, abrufbar, sowie rechtlich und technisch (interoperabel) nutzbar sind. Eine Analyse zu den bereits vorhandenen gesetzlichen Informationspflichten und -lücken, sowie deren Nutzbarkeit in der Praxis ist bislang nicht erfolgt. Ziel der vorliegenden Analyse sind Informationen die zu Abfallbehandlung bei Elektronikprodukten dienlich sind.

2 STATUS QUO

Zugängliche und leicht auslesbare Produktinformationen (siehe Tabelle 1) sind in der Abfallbehandlung von besonderer Relevanz, um Gefahrstoffe zu identifizieren und eine Exposition solcher auf Mensch und Umwelt zu vermeiden. Sie dienen Sammlern zur separaten Erfassung und Vorsortierung, sowie Sortierern zur Ausleitung von Gefahrstoffen. Außerdem werden schwer prozessierbare und wertvollen Stoffen oder Komponenten gesondert behandelt bzw. wiederverwendet. Die Europäische Gesetzgebung regelt den Umgang mit Gefahrstoffen im Wesentlichen in drei Bereichen: Chemikalien-, Produkt- und Abfallgesetzgebung. Eine Herausforderung für Recyclingbetriebe besteht beim Übergang eines Materials von Abfall zu einem neuen Produkt (bei Ende der Abfalleigenschaft), welcher dann nicht mehr den Anforderungen der Abfall- sondern der Chemikaliengesetzgebung unterliegt:

(1) In der *Chemikaliengesetzgebung* zielt die Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH¹) auf die sichere Verwendung von Gefahrstoffen ab. Erzeugnisse mit entsprechenden Gefahrstoffen müssen registriert und gekennzeichnet werden. Für die Kennzeichnung schreibt die CLP² Verordnung Kennzeichnungspflichten von gefährlichen Stoffen und Gemischen vor. Abfall ist vom Geltungsbereich der REACH-Verordnung durch Artikel 2 Absatz 2 ausgenommen. Aus Abfall zurückgewonnene Stoffe sind bedingt von der Registrierungspflicht ausgenommen, z.B. wenn der zurückgewonnene Stoff bereits registriert ist und die Informationen zu Gefährlichkeitsmerkmalen (aus dem Sicherheitsdatenblatt) vorliegen. Fällt der zurückgewonnene Stoff unter REACH, müssen Recyclingbetriebe zur Bestimmung der Identität des zurückgewonnenen Stoffs unterschiedliche Informationen die Herkunft und Zusammensetzung des Abfalls nachweisen, sofern diese den vorgeschalteten Akteuren vorliegt und weitergereicht wird. Bestenfalls kommen Produktionsabfälle von Stoffhersteller, da diese meist die nötigen Informationen, Analysedaten oder Sicherheitsdatenblätter zu Verfügung stellen können. Abfälle unterschiedlicher Lieferanten und Herkunft hingegen erschweren eine Identifizierung der Stoffidentität.

(2) Zudem müssen diese Informationen digital erfasst werden - die Richtlinie 2008/98/EG (Abfallrahmenrichtlinie, englisch Waste Framework Directive, WFD) verpflichtet zur Registrierung, Überwachung und Kontrolle dieser Gefahrstoffe und stellt dafür eine Datenbank für Informationen zu „Substances of Concern in articles as such or in complex objects“ (SCIP) bereit. Hier müssen die Erzeugnisse identifiziert, die Konzentration sowie der Ort der Gefahrstoffe und die ordnungsgemäße Behandlung als Abfall beschrieben werden. Diese Informationen stehen „den Abfallentsorgungsunternehmen zur Verfügung, um die derzeitige Informationslücke zu schließen“ (ECHA 2022), womit die Identifikation von Gefahrstoffen bei der Sortierung gemeint ist, um diese Stoff aus der Wertschöpfungskette auszuleiten. Die WFD zielt neben anderen Regulierungen in der *Abfallgesetzgebung* auf die Ausschleusung von Stoffen aus dem Abfallstrom, die für Mensch und Umwelt gefährlich sind. Eine besondere Relevanz hat hierfür auch die Richtlinie 2012/19/EU (WEEE), welche die Bereitstellung von Informationen über gefährliche Stoffe sowie deren Ort im Produkt vorschreibt.

1 Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals

2 Classification, labelling and packaging

(3) Die Richtlinie 2009/125/EC (Ökodesign) als *produktbezogene Gesetzgebung* verpflichtet zur Kennzeichnung einzelner Stoffe in bestimmten Produktgruppen (bspw. Piktogramme für Plastikteile, Cadmium und Quecksilber). Außerdem müssen Demontageanleitungen aller Komponenten und Materialien bereitgestellt werden, für welche eine separate Behandlung nach ANNEX VII der Richtlinie 2012/19/EU (WEEE) vorgeschrieben ist (z.B. Batterien, Leiterplatten > 10cm², Polychlorierte Biphenyle). Zudem legt Richtlinie 2011/65/EU (RoHS) Stoffverbote für elektrische und elektronische Geräte fest. Dazu zählt beispielsweise die Verwendung von halogenierten Flamm- schutzmittel. Ältere Monitoren die bei der Herstellung noch nicht von der Regelung betroffen waren können diese Gefahrstoffe beinhalten, welche somit zur Störgröße im Recycling bzw. für die rückgewonnenen Stoffe werden.

3 METHODE

Im ersten Schritt werden Chemikalien-, Produkt- und Abfallgesetzgebung hinsichtlich Barrieren der Nutzbarkeit der Informationen (Identifizierung, Format und Zugänglichkeit) für die jeweilige Zielgruppe analysiert. Im zweiten Schritt wurden im Rahmen von Workshops, Interviews sowie Fachdiskussionen Informationsbedürfnisse und -barrieren aus der Sicht von Akteuren aus der Abfallbehandlung evaluiert. Deren Aussagen zu den Barrieren von gesetzlichen Informationsanforderungen sind in Kapitel 4.1 – 4.3 beschrieben. Kapitel 5. fasst weitere Informationsbedürfnisse der Akteure zusammen, welche über die Gesetzgebung hinausgehen.

4 BARRIEREN ZUR NUTZUNG GESETZLICHER INFORMATIONEN

Die folgenden Ergebnisse sind nach den Informationsanforderungen in den jeweiligen Gesetzes- akten aufgeschlüsselt (Tabelle 1).

Tab. 1: Übersicht der Informationsanforderungen und identifizierten Informationsbarrieren nach jeweiliger Ge- setzgebung

Gesetzesakt	Informationsanforderung	Format	Barriere
Richtlinie (EG) Nr. 1907/2006 REACH	Artikel 33: Kennzeichnung von Erzeugnissen, die besonders besorgniserregende Stoffe mit einem Anteil von mehr als 0,1 % enthalten	SCIP Datenbank	Identifizierung, Format und Zu- gang
Verordnung (EU) 2019/2021 & (EU) No 617/2013 (Ökodesign Displays & Computer)	Anhang II 7. (Ecodesign PC): Kennzeichnung von Quecksilber Anhang II D. 1-5. (Ecodesign Disp): Kenn- zeichnung von Cadmium und Kunststoffkom- ponenten, Informationen über die Entsorgung am Ende des Lebenszyklus	Markierungen, Piktogramme	Zugang
Richtlinie 2012/19/EU WEEE	Artikel 15: Informationen zur Demontage und zum Recycling von Elektro- und Elektronikge- räten und zu den enthaltenen Materialien und gefährlichen Stoffen und Gemischen	nicht definiert	Format und Zu- gang

4.1 Nutzbarkeit von Materialinformationen: REACH Verordnung & Abfallrahmenrichtlinie (SCIP)

Die Informationsbestände zu besonders gefährlichen Stoffen in Erzeugnissen sind in der Euro- päischen SCIP-Datenbank für die Abfallbehandlung nur eingeschränkt nutzbar: Es existieren In- formationslücken, weil Erzeuger aus nicht-EU Ländern bisher nicht in der Pflicht stehen sich an Eintragungen in der SCIP-Datenbank zu beteiligen bzw. ohne weiteres keine Registrierungen vornehmen dürfen. Der Geltungsbereich zur Registrierung der SVHC in SCIP umfassen Erzeug- nisse (article, complex objects) in ihren Bestandteilen als Komponenten, eine Zuordnung einzel- ner Erzeugnisse zum Produkt wie sie letztlich im Abfallstrom vorliegen ist dabei nicht immer ge- geben. Die Identifizierung der Produkte in der SCIP-Datenbank aber auch am Produkt selbst werden als eine der wichtigsten Informationsbarriere genannt – Erzeugnisse lassen sich teils schwer finden, da die Artikelkennung (u.a. EAN, GTIN, GPC, Teilenummer, Katalognummer, etc.)

nicht einheitlich definiert und die Herstelleridentifizierung nicht vorgeschrieben sind. Es wurde festgestellt, dass eine flexible digitale Schnittstelle (API) zum Abruf der Informationen fehlt. In der Praxis muss der Abruf für Informationen aus der SCIP-Datenbank für jede einzelne Komponente im Produkt erfolgen – was im Sortierprozess nicht effektiv ist und die bisherige Lösung bisher untauglich für die Abfallbehandlung macht. Aus Sicht der Abfallbehandlung wären deshalb verschiedene Verbesserungen notwendig. Zum einen braucht es eine gesicherte aggregierte Informationsbereitstellung auf Produktebene, mit dem zugleich ein Zugriff auf alle relevanten Komponenteninformationen erfolgen kann. Die ist innerhalb der SCIP-Datenbank zwar vorgesehen, wird in der Praxis bisher aber unterschiedlich gehandhabt. Die IMDS³ Datenbank der Automobilindustrie könnte hier als Beispiel dienen, bei der eine modulare Zuordnung von Materialien zu Komponenten und Produkten erfolgt. Zum anderen sollte über eine Codierung am Produkt (QR-Code, RFID-Chip etc.) das automatisierte Auslesen von relevanten Produktinformationen wie dem Materialgehalt oder Gefahrenstoffanteil innerhalb des Sortierprozesses möglich sein, was ein wesentliches Ziel des Produktpasses ist (EC 2022).

Weitere Informationslücken ergeben sich durch Kommunikationsbarrieren: Die SVHC-Kandidatenliste der ECHA wird zweimal jährlich aktualisiert, sodass vorhandene Produkte geprüft und teilweise neu registriert werden müssen. Eine heterogene Datenübermittlung der Zulieferer erschweren jedoch die Aktualisierung von Bestandsprodukten und Neuregistrierung. Eine automatisierte Kontrolle und Plausibilitätsprüfungen nach den geltenden Standards können die Datenqualität erhöhen. Die Datenvorbereitung und –änderung stellt bisher eine große Barriere dar, weil vor allen bei komplexen und langlebigen Produkten große Datensätze generiert werden müssen – was zu erheblichen Aufwänden für die Erfassung, Verwaltung und Eingabe bei möglichen Produktänderungen durch den Hersteller oder Zulieferer führt.

4.2 Nutzbarkeit von Material- und Demontageinformationen: WEEE-Richtlinie

Die WEEE-Richtlinie stellt Informationsanforderungen zu gefährlichen Stoffen (und deren Verbleib) sowie Informationen und Demontageanleitungen über verschiedene Elektro- und Elektronikgerätekomponten und -materialien. Die WEEE legt jedoch kein Format oder Kommunikationsmedium fest. Die Informationen sollen lediglich der Abfallbehandlung „zugänglich gemacht werden“. Um Wiederverwendungs-, Behandlungs- und Recyclinganlagen dennoch einen standardisierten Zugang zu gewährleisten, wurde mit der Information for Recycler (I4R) Plattform eine Initiative der Industrie gestartet. Sie stellt Informationen die in der WEEE-Richtlinie geforderten für Abfallbehandler und Recyclingbetrieben zentral bereit. Insbesondere Sortierer und Wiederverwerter argumentiert, dass solche Informationen eher zu Schulungszwecken eingesetzt werden, da sich der Einsatz im Sortierprozess praktisch nicht lohnt. Der zusätzliche Zeitaufwand für die manuelle Sortierung der Produkte nach ihren Merkmalen ist nicht durch den etwas höheren Reinheitsgrad der Abfallströme wirtschaftlich zu rechtfertigen. Für eine automatisierte Sortierung, insbesondere von Kleingeräten, wird ein maschinenlesbares Format der Informationen vorausgesetzt. Diesbezügliche Standardisierungsaktivitäten sind im Rahmen der Revision der Ökodesign-Richtlinie geplant, sodass der Produktpass zum Teil zur Verbesserung der Sortierung beitragen könnte.

4.3 Nutzbarkeit von Materialkennzeichnungen: Ökodesign & WEEE-Richtlinie

Zur Kennzeichnung von Cadmium gibt die Ökodesign-Richtlinie eine grafische Markierung vor. Für Plastikteile ist lediglich eine alphanumerische Kennzeichnungspflicht festgelegt. Dazu ergänzend gibt die Norm ASTM D7611 optische „Resin Identification Codes“ in Form der Dreiecke mit Nummer und Buchstabenkürzel für Kunststoffe vor. Das „crossed-out wheeled bin“, also die durchgestrichene Abfalltonne auf Rändern, ist durch WEEE Richtlinie zur Indikation der getrennten Sammlung von EEE grafisch vorgegeben.

³ International Material Data Space



Abb. 1: Piktogramme für Cadmium, getrennte Sammlung, Plastikteile / "chasing arrows" (Acmeplastics 2022)

In der Abfallpraxis müssen im Rahmen der Behandlung (z.B. Sortierung) Kennzeichen physisch auf Produkten oder Bauteilen identifiziert werden. Dieser Prozess ist zeitintensiv und wird in der Praxis zum Teil durch weitere Faktoren erschwert. Kunststoffmarkierungen auf einzelnen Bauteilen oder Komponenten sind häufig erst nach einer Demontage zugänglich. Außerdem sind die alphanumerischen Kennzeichnungen oder Logos bei starker Abnutzung nicht immer erkennbar und können zu Verwechslungen führen. Eine Digitalisierung der Informationen zur automatisierten Identifizierung würde die Suche ersparen, eine Demontage wäre zur getrennten Behandlung weiterhin nötig. Für Konsumenten sind auf dem Produkt sichtbare Symbole meist zu aggregiert und führen so zu Verwechslung, wie die durchgestrichene Abfalltonne, welche keinen Hinweis auf eine korrekte Entsorgung liefert. Diese Barriere könnte durch zusätzlich digitale verfügbare Informationen geschlossen werden.

5 INFORMATIONSBEDARF IN DER ABFALLBEHANDLUNG

Im Prozess der Sammlung und Sortierung sind die meisten Produkte welche Gefahrstoffe enthalten bekannt und durch das Fachwissen des Sammelpersonals in ausreichendem Maße für die weitere Behandlung und ein hochwertiges Recycling identifizierbar. Daher werden Informationen zur Gefahrstoffen und Demontage eher für Schulungszwecke genutzt. Ein Produktpass würde im manuellen Sortierprozess aus Sicht der Stakeholder aktuell nur für die meisten Produktgruppen keinen Mehrwert bieten, da die benötigte Zeit zur Erfassung von Materialzusammensetzungen oder Gefahrstoffe einzelner Produkte durch den Abruf über einen Produktpass nicht wirtschaftlich erscheint. Davon ausgenommen ist die Identifizierungsmöglichkeit von Produkten welche automatisiert sortiert werden können oder bei denen besondere Materialanforderungen bestehen und eine höhere Reinheit der zurückgewonnenen Materialien für ein Produkt-zu-Produktrecycling nötig ist, wie beispielsweise bei Produkten mit Lebensmittelkontakt (food-contact). Wünschenswert ist zudem eine Meldung von Hersteller zu Abfallbehandler, nicht zu jeder Materialänderung, sondern wenn es zu einer Änderungen im Produkt kommt (Product Change Notification – PCN), die in der Folge eine getrennte Sammlung erforderlich machen würde. Neben anderen Faktoren wird von den betroffenen Stakeholdern in Zukunft bei zunehmenden Wertstoffströmen vor allen die Materialzusammensetzung als wichtige Informationsanforderung gesehen, um die Wirtschaftlichkeit zum Recycling bestimmter Stoffe abschätzen zu können. Für die individuelle Optimierung von Recyclingprozessen, insbesondere im Kunststoffbereich, erwähnt ein Teil der Stakeholder die Notwendigkeit zur Deklaration von Materialart, -menge, -sorten, Zusatzstoffen und Schadstoffen, um bestimmte Kunststoffteile vor der Zerkleinerung auszuweisen, welche in einer gemischten Schredderfraktion bzw. im Mahlgut schwer trennbar und problematisch sind.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die Studie identifiziert und evaluiert die existierenden Informationspflichten in der Chemikalien-, Produkt- und Abfallgesetzgebung hinsichtlich der Informationslücken und Nutzbarkeit für die Abfallbehandlung. Mit dem Ziel der Vermeidung oder Ausschleusung von Gefahrstoffen und persistenten Chemikalien formuliert die Gesetzgebung vor allen Informationspflichten für Hersteller, welche dazu angehalten sind bestimmte Material- und Produktinformationen bereitzustellen: Gefahrstoffe nach der ECHA-Kandidatenliste in Erzeugnissen müssen beispielsweise in der Europäischen SCIP-Datenbank gemeldet werden. Der effektiven Nutzung dieser Informationen stehen

in der Abfallpraxis bisher jedoch Barrieren entgegen. Hierzu zählen insbesondere die korrekte und automatisierte Identifikation von Produkten und Komponenten im Abfallstrom, sowie der hohe Aufwand zur Eingabe, Pflege und Auslesen von Informationen aus den bisher vorhandenen offiziellen Registrierungssystemen. Zur Steigerung der Nutzbarkeit und als Grundvoraussetzung zur Einführung eines Europäischen digitalen Produktpasses muss aus Sicht der Abfallbehandlung deshalb zukünftig vor allem eine einheitliche Identifizierung der Produkte (z.B. GTIN, UUID) sowie Nachverfolgungsmöglichkeit am Produkt (z.B. über QR Code oder RFID Chip) gewährleistet werden. Dies gilt vor allem für Produktgruppen, welche automatisiert sortiert werden. Vorhandene physische Materialkennzeichen, wie die Kennzeichnung für Plastikkomponenten im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie, sind aufgrund des Aufwands zur Identifikation bei der Sortierung bisher nicht effektiv nutzbar. Gleiches gilt für Informationen zu gefährlichen Stoffen sowie deren Lokalisierung im Produkt, welche teilweise über die I4R-Plattform vorliegen. Der von der EU geplante digitale Produktpass stellt hierbei ein potentiell Instrument zur effektiven Informationsbereitstellung dar. Insbesondere können weitere Informationen zu Wertstoffen, Plastikbestandteile, Additiven und weiteren Verunreinigungen bereitgestellt und somit die Sortierung ökonomisch effektiv gesteigert werden. Mit Hinblick auf die bisher bestehenden Informationsbarrieren und Praxisproblemen, wird der wirtschaftliche Nutzen eines digitalen Produktpasses von einigen Stakeholdern vorerst kritisch gesehen. Anreize zur Erhöhung der Recyclingquoten und –qualitäten können eine Erhöhung der gesetzlichen Recyclingquoten sein.

Die Ergebnisse der Studie wurden im Rahmen des Projekts „Produktinformation 4.0“ (ReFoPlan Förderkennzeichen 3720363010) im Auftrag des Umweltbundesamts erarbeitet.

LITERATUR

- Acmeplastics. (2022). *Chasing Arrows*. Retrieved from <https://www.acmeplastics.com/content/your-guide-to-plastic-recycling-symbols/>
- EC. (2019). Retrieved from https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cej_wm050/default/table?lang=en
- EC. (2022). *Proposal for a Regulation establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC*. Retrieved from https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation_en
- ECHA. (2022). *SCIP*. Retrieved from <https://echa.europa.eu/de/scip-suppliers-of-articles>
- Statista. (2017). *Statista*. Retrieved from <https://de.statista.com/infografik/7849/bei-amazon-deutschland-gelistete-produkte/#:~:text=eCommerce&text=Rund%20229%20Millionen%20Produkte%20bietet,Analytics%20mittlerweile%20zum%20Kauf%20an>
- Van den Berge, R. R. (2022). *Premature replacement of well-functioning products and choice for replacement over repair (Deliverable No. 5.2 Nr. 1; Premature Obsolescence Multi-Stakeholder Product Testing Program)*.
- Wang, J., Li, F., Zhu, F., & Schmidt, O. G. (2019). Recent Progress in Micro-Supercapacitor Design, Integration, and Functionalization. *Special Issue: Recent Research Progress for Electrochemical Energy Conversion and Storage in Europe*.

FAQs zum Re-Use von Gebäudekomponenten

M. Meissner¹, Th. Romm², I. Schanda³ & R. Borszki¹

¹⁾ pulswerk GmbH, Wien, Österreich

²⁾ ROMM ZT, Wien, Österreich

³⁾ Re-Use und Reparaturnetzwerk Österreich, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Das Poster behandelt die gängigen Diskussionspunkte bei der Umsetzung von Re-Use von Gebäudekomponenten. Die 14, als FAQs, ausgeführten Punkte kombinieren die Projekterfahrungen mit den Ergebnissen einer Interviewreihe unter österreichischen Stakeholdern des Rückbausektors und einem Quellenstudium. In der Zusammenschau entsteht ein umfassendes Bild der Herausforderungen, die beim Re-Use von Gebäudekomponenten entstehen. Gleichzeitig beleuchten die Autor:innen Optionen zu deren Überwindung.

1 EINLEITUNG

Der verwertungsorientierte Rückbau ist als Standardabbruchmethode über die RecyclingbaustoffVO in Österreich verbindlich vorgegeben und unterstützt EU-weite und nationale Anstrengungen den ressourcenintensiven Bausektor in Richtung Kreislaufwirtschaftlich zu entwickeln. Den Autor:innen begegnen, im Rahmen ihrer Arbeiten rund um BauKarussell, seit 2016 in den Gesprächen zur Umsetzung mit verschiedensten Stakeholdern regelmäßig große Wissenslücken über die gesetzlichen Erfordernisse und die damit verbundenen Möglichkeiten. Die Autor:innen diskutieren mit insbes. Bauherren die immer wieder gleichen, für eine Umsetzung von Re-Use relevanten offenen Fragen. Dabei werden die eigenen Projekterfahrungen sowie nationale und EU-weite Pilotprojekte und Lösungsansätze in die Gespräche eingebracht um mit Bauherren eine, für das jeweilige Entwicklungsprojekt, passende Realisierung zu identifizieren. Mit Unterstützung des Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie fassen wir die Diskussionen in folgenden 14 FAQs zusammen.

2 14 FAQs ZUM RE-USE VON GEBÄUDEKOMPONENTEN

2.1 Warum machen wir Re-Use überhaupt?

In den letzten 100 Jahren haben wir das urbane Rohstofflager kontinuierlich ausgebaut. Diese Urbane Mine in Form von gebrauchten Produkten oder sekundären Rohstoffen weiter zu nutzen, reduziert die Umwelteinwirkungen und vermeidet den weiteren Abbau primärer Lagerstätten. Der ökologische Mehrwert der Wiederverwendung ist in zahlreichen Umweltbilanzierungen belegt.

- Überlegen Sie, ob Sie bestehende Gebäude(teile) weaternutzen können.
- Integrieren Sie den Gedanken des Re-Use in die Planung des Neubaus.
- Arbeiten Sie mit den Funktionalitäten ihres Gebäudes/ihrer Gebäudeteile und gewinnen Sie positive Beträge bei der Umsetzung der EU-Taxonomieverordnung.
- Das höchste Maß an Ressourcenschonung stellen die Lebensdauerverlängerung und die Umnutzung bestehender Gebäude dar. Die Herausforderung besteht nun darin, den Rahmen zu formulieren, um die Umsetzung dieser Ziele zu erleichtern. Auch wenn aus der aktuellen Diskussion um Kreislaufwirtschaft im Bauwesen hervorgeht, dass den relevanten Stakeholdern diese Erkenntnisse bewusst sind, fehlt noch der entscheidende Schritt in die Praxis.

2.2 Gibt es überhaupt Potential für Re-Use?

Ja, Interviewte nennen Produktgruppen und die Literatur gibt eine breite Bandbreite an Gebäudekomponenten an (z.B. Haustechnik, Bodenbeläge, Parkett, Antikes mit baukulturellem Wert). Re-Use kann durch den Einsatz von Systembauteilen mit Standardformaten gestärkt werden. Re-Use ist eine Chance für lokale Unternehmen und bewahrt kulturelles Bauerbe.

- Folgen Sie bei der Einstufung vorhandenen Leitfäden und Checklisten und Ihren beauftragten Expert:innen.
- Beachten Sie, für die Identifikation der Potentiale, dass Abfallrecht, Produktrecht, Handelsrecht und auch rechtliche Inverkehrsetzungsbeschränkungen unterschiedlicher Verwaltungsrechtsmaterien zu berücksichtigen sind.

2.3 Erhöht Re-Use die Komplexität beim Bauen und Rückbauen?

Ja, denn es kommen weitere Planer und Gewerke in ihre Planung und Ausführung von Neu- und Rückbau.

- Wenden Sie sich an kompetente Initiativen, die anhand von Referenzen zeigen, dass sie die Abläufe und Gegebenheiten der Bau- und Abfallwirtschaft kennen und mit ihnen im Abbruch und Neubau umgehen können.
- Takten Sie die Arbeiten in die Phase der Abbruchvorbereitung und der Bauausführung des Neubaus. Ist es möglich, parallel zum maschinellen Abbruch zu arbeiten, kann es insgesamt zu einer Zeitersparnis kommen.
- Ein mittelfristiger Einbau der Aufgaben in die Standardabläufe und Prozessbeschreibungen unterstützt letztlich die effiziente Umsetzung.

2.4 Verzögert Re-Use den Bauprozess bzw. den Rückbau?

Nein, die Bauausführung verzögert sich bei entsprechender Bauzeitplanung nicht.

- Nutzen Sie die Planungszeit ihres Bauvorhabens für Re-Use-Arbeiten im Bestandsobjekt.
- Bringen Sie dieses Thema in einer möglichst frühen Planungsphase in das Entwicklungsteam ein. Ohne vorgesehenes Zeitfenster findet kein Re-Use von Gebäudekomponenten statt. Dieser Faktor, das zeigen die Umsetzungsprojekte, wird als der kritischste und gleichzeitig erfolversprechendste Punkt angesehen.

2.5 Können Kosten für Re-Use-Gebäudekomponenten mit Neuprodukten verglichen werden?

Ja, Re-Use hält dem Vergleich stand. Diese Analysen sind ein Schritt in Richtung verbesserter Kostenwahrheit. Re-Use-Gebäudekomponenten selbst sind meist günstig, aufwendig sind Ausbau, Lagerung, ggf. Prüfungen und Transport. Viele Beispiele zeigen, dass Re-Use-Gebäudekomponenten marktfähig sind. Mit zunehmender Internalisierung der externen Kosten werden mehr und mehr Gruppen wettbewerbsfähig.

- Vergleichen Sie diese Kosten mit jenen des „normalen“ Vorgehens. Die Gegenrechnung muss somit Entsorgungskosten, Beschaffung von Neuprodukten und Transportkosten beinhalten. Diese können im Zuge der Ausschreibungen als Minderkosten abgefragt werden.
- Zusätzlich zeigen gesetzte Re-Use Aktivitäten durch begleitende Öffentlichkeitsarbeit große Mehrwerte für die Rezeption des Projektes und des Themas an sich.

2.6 Wie können Re-Use Gebäudekomponenten den Anforderungen in neuen Bauvorhaben entsprechen?

Viele potentielle Re-Use Gebäudekomponenten erfüllen zum Zeitpunkt des Ausbaus ihre ursprünglichen Funktionen. Ziel der Re-Use-Planung muss es sein, diesen langlebigen Wert zu erhalten, um diesen für einen Wiedereinsatz zu nutzen.

- Definieren Sie in diesem Bereich Ihren Qualitätsanspruch. Formulieren Sie dazu nachvollziehbare, veröffentlichte Kriterien zu Ausbau, Vermittlung sowie Wiedereinbau.
- Organisieren Sie eine hinreichende Dokumentation der ökologischen, ökonomischen und gegebenenfalls sozialen Wirkungen, um sie für die Öffentlichkeitsarbeit zu nutzen.
- Lassen Sie sich Re-Use-Aktivitäten in einer Gebäudezertifizierung anrechnen. Die Kriterienkataloge in verschiedenen Gebäudezertifikaten erlauben dies. Damit trägt eine Umsetzung zur Gesamtbewertung bei und verbessert so das Image gebrauchter Gebäudekomponenten.
- Präsentieren Sie Ihre schon umgesetzten Bau-/Rückbauobjekte, die den heutigen Ansprüchen genügen, um Qualität für die breite Öffentlichkeit und die Stakeholder sichtbar zu machen.

2.7 Wie können Haftung und Gewährleistung bei gebrauchten Gebäudekomponenten gehandhabt werden?

Aus bautechnischer Sicht behalten Gebäudekomponenten bei unveränderter Funktionalität eine CE-Zertifizierung. Die Produkthaftung verbleibt beim Hersteller, solange die ursprüngliche Funktion erhalten bleibt. Für sicherheitsrelevante Komponenten (z.B. statisch tragende Elemente) ist eine Einzelprüfung durch akkreditierte Labore oder Ziviltechniker erforderlich.

- Regeln Sie Haftungen und Gewährleistungen zivilrechtlich durch präzise Leistungsbeschreibung.
- Prüfen Sie, ob ihr Lieferant eine CE-Kennzeichnung vorzuweisen hat, sollten Sie Re-Use-Gebäudekomponenten in einer neuen Funktion einsetzen.
- Ergänzen Sie ihre AGBs und Verträge mit Passagen für B2B und B2C Vermittlungen.

2.8 Wie kann ein funktionierender Markt für Anbieter und Nachfrager geschaffen werden?

Das Thema hat, laut Aussagen der im Projekt Interviewten und der Literatur, in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen und wird weiter boomen. Wesentlich ist eine effiziente Organisation der Wiederverwendung. Derzeit sind noch einzelne Personen die Träger der Entwicklung.

- Verantworten Sie ein großes Entwicklungsprojekt so können Sie KMUs/Initiativen den Start ermöglichen. Ein Geschäftsfeld kann dann neu starten und neue Prozesse/Maschinen/Angebote können etabliert werden.
- Stellen Sie Objekte zur Verfügung und gliedern Sie Angebote und Nachfragen in Ihre Standardabläufe von Planung und Ausführung ein. Damit sorgen Sie für hohes Marktgeschehen und steigern die Attraktivität des Marktplatzes.
- Identifizieren Sie jene Stellen/Abteilung/Personen die Verfügungsgewalt über Ihre Gebäudekomponenten haben und schaffen Sie eigene Expertise zur Realisierung.
- Unterstützen Sie die Ausarbeitung von Curricula zur Wissensvermittlung. Aktuelle Erkenntnisse müssen auf unterschiedlichsten Ebenen in die Aus- und Weiterbildung einfließen.

2.9 Welche Stellung nimmt die Schad- und Störstofferkundung für Re-Use ein?

Die Schad- und Störstofferkundung und das Rückbaukonzept sind integrale und zentrale Grundlagen des Rückbaus und behandeln zusammen u.a. das Thema Re-Use-Potentiale. Diese sind laut RecyclingbaustoffVO ab gewissen Mengenschwellen gesetzlich verpflichtend. Sie liefern darüber hinaus das Mengengerüst für die Ausschreibung des Rückbaus selbst. Führt der Erkunder Re-Use-Potentiale an, dann besteht die Chance, diese als Input für die Rückbauausschreibung zu nutzen.

- Schreiben Sie die Erkundung funktionell aus, lassen Sie sich Re-Use Potentiale ausweisen und fordern Sie diese gegebenenfalls ein. Suchen Sie fachlich Befugte, die in diesem Bereich Referenzen vorweisen können.
- Nutzen Sie bereits verfügbare Vorlagen und Mustertexte.

2.10 Wie kann über die Ausschreibung Einfluss genommen werden?

Die Ausschreibung ist das zentrale Dokument der Leistungsdefinition für den Neu- und Rückbau.

- Schreiben Sie mit beigestellten Re-Use Gebäudekomponenten aus.
- Formulieren Sie Zuschlagskriterien, mit kreislaufwirtschaftlichen Anspruch.
- Fordern Sie Minderkosten der entfallenden Entsorgung von Re-Use-Gebäudekomponenten ein.
- Integrieren Sie die Themen Wiederverwendung und „Vorbereitung zur Wiederverwendung“ in ihre Ausschreibungsprozesse.
- Binden Sie soziale Betriebe in Ihre Re-Use Demontagen ein. Das Bundesvergabegesetz 2018 sieht dies in Form von vorbehaltenen Aufträgen ein.

2.11 Wie kann das Thema Abfallrecht hinreichend behandelt werden?

Ein klares Schema für die Freigabe von potentiellen Re-Use Gebäudekomponenten für die Wiederverwendung ist unerlässlich. Ein durchdachter Zugang zum Abfallrecht erlaubt Handlungsoptionen zu mehr Wiederverwendung von Gebäudekomponenten.

- Prüfen Sie die behördlichen Bewilligungen der von Ihnen beauftragten Unternehmen.
- Dokumentieren Sie die Arbeitsabläufe (inkl. Sicherheitshinweisen und Handlungsanordnungen) für die unterschiedlichen Abfallfraktionen (Schlüsselnummern).
- Nutzen Sie Leitfäden und Richtlinien für die Risikominimierung bei Ihrem Rückbau.

2.12 Verändert Re-Use den Planungsprozess?

Ja, Kreislaufwirtschaft findet in einer integralen Planung des Neubaus und Abbruchs bereits Berücksichtigung. Baustoffwahl und die Bauweise entscheiden über die spätere Rückbaubarkeit und sind im Sinne des Ecodesign in der Planung mitzudenken. Je einfacher der Zugang zu den jeweiligen Informationen für z.B. Architekt:innen ist, desto leichter werden Planungen damit.

- Prüfen Sie Möglichkeiten der Wiederverwendung im eigenen Entwicklungsprojekt und/oder von anderen Projekten in Ihrem Unternehmen.
- Wenden Sie sich an kompetente Initiativen, die mit dem Thema vertraut sind und die Kompetenz in Abfall- und Bauwirtschaft in Referenzen nachweisen können.
- Setzen Sie Building Information Modeling (BIM) ein, um Re-Use Gebäudekomponenten zu erfassen und den Prozess zu unterstützen. BIM erleichtert die „Übergabe“ vom Abbruchobjekt in ein Neubauprojekt.
- Nutzen Sie die jeweiligen Kriterienkataloge von Gebäudezertifizierungssystemen, um für die Bewertung Punkte zu sammeln und so für Re-Use Mehrwert zu generieren.
- Lassen Sie sich auf die Prozesse ein und integrieren Sie diese in Ihre Planung.
- Wickeln Sie ein Pilotprojekt ab, um die Anpassungen für Ihre Organisation zu identifizieren.
- Suchen Sie Kooperationen und den fachlichen Austausch. Im Sinn der Entwicklung profitieren alle von den Erfahrungen.

2.13 Wie unterstützen Good Practice Beispiele weitere Umsetzung?

Zahlreiche Umsetzungen zeigen, dass der Bau mit Re-Use Komponenten vorteilhaft ist. Der gezielte Rückbau mit vorheriger Entnahme aller noch gebräuchlichen Bauteile ist möglich. Der gegenseitige Know-How Austausch erlaubt allen Beteiligten ein effizienteres Vorankommen.

- Veröffentlichen Sie die nachweislich eingetretenen ökologischen, ökonomischen und gegebenenfalls sozialen Wirkungen, um auf Ihre Leistungen hinzuweisen. Das schafft eine positive Wahrnehmung Ihres „Leuchtturmprojektes“ und motiviert andere zum Handeln.
- Nehmen Sie das Thema in Ihre Bauwettbewerbe und arbeiten Sie am künftigen Leuchtturmprojekt.
- Analysieren Sie Europäische Re-Use-Projekte und suchen sie Lösungen, die Ihnen Ihre Planung erleichtert.
- Setzen Sie gezielte Öffentlichkeitsmaßnahmen für Ihre relevanten Zielgruppen.

2.14 Welche Rolle kann die öffentliche Hand einnehmen?

Die verschiedenen Ebenen der öffentlichen Hand sind in mehreren Aspekten wesentliche Akteure bei der Umsetzung. Ihr Handlungsspielraum umfasst...

- ... als Entwickler:in, Nutzer:in und künftig im Rückbau Verantwortliche:r, das Umsetzen von Beispielen im eigenen Objektbestand.
- ...als Bauherr eine gestaltende Rolle bei der Formulierung von Ausschreibungskriterien.
- ...als auslobende Stelle von Bauwettbewerben die Integration des Themas Re-Use.
- ...als Beschaffende Re-Use in Systeme zur ökologischen Beschaffung zu integrieren.
- ...als (Ko)Finanzier die Förderung von Pilotprojekten.
- ...als Gesetzgeber die Weiterentwicklung und Kontrolle des Rechtsrahmens.

Re-Use Aktivitäten des Landes Steiermark als Motor für die Kreislaufwirtschaft

U. Kabosch¹, U. Gungl¹ & I. Winter¹

¹⁾ Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14, Referat Abfall- und Ressourcenwirtschaft, Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Die Einführung und Förderung der Wiederverwendung ist ein wichtiger Schritt in Richtung Kreislaufwirtschaft. In der Steiermark ist die Wiederverwendung seit einigen Jahren ein Schwerpunkt der kommunalen Abfallwirtschaft. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Initiativen und Projekte durchgeführt, um das ökologische und soziale Potenzial der Wiederverwendung im Bewusstsein der Bevölkerung zu verankern. Seit 2019 ist das Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14 - Wasserwirtschaft, Ressourcen und Nachhaltigkeit, Partner im Interreg Europe Projekt SUBTRACT. Ziel des Projekts ist die Stärkung des Re-Use-Sektors und der Re-Use-Akteure (vor allem KMUs und sozialwirtschaftliche Unternehmen) in der Steiermark auf Basis eines europaweiten Best-Practice-Austauschs und eines steirischen Stakeholder-Prozesses, der in den vergangenen zwei Jahren durchgeführt wurde. Der folgende Artikel berichtet über die im Rahmen des SUBTRACT-Projekts identifizierten und umgesetzten Maßnahmen, wie z.B. die digitale Re-Use-Landkarte Steiermark.

1 EINFÜHRUNG

„Re-Use“, der umgangssprachlich genutzte, englische Begriff sowohl für die Wiederverwendung von Produkten als auch für die Vorbereitung zur Wiederverwendung von Abfällen, trägt wesentlich zu Abfallvermeidung und Ressourcenschonung bei. Re-Use wird daher zu Recht als Motor für die Kreislaufwirtschaft betrachtet. Die Wiederverwendung sowie alle dazu notwendigen Prozesse (z.B. Sammlung, Transport, Vorbereitung und Vertrieb), welche die wiederholte Nutzung von Produkten ermöglichen, sollten daher verstärkt in den Fokus der Kreislaufwirtschaft gerückt werden.

Die Vielfalt der Sammlung (über Spenden an karikative Einrichtungen, Altkleidercontainer, Entrümpelungs-Services, Sammlungen im ASZ, etc.), der Produktkategorien, aber auch der Verkaufskanäle (Shops, Online-Shops, Tauschportale im Internet...) im Re-Use Sektor machen es schwer, ein gesamtheitliches Bild darzustellen.

Das Land Steiermark investiert seit über zehn Jahren in Kampagnen und Pilotprojekte zur Stärkung von Re-Use in den unterschiedlichen Bereichen. Seit 2019 ist das Land Steiermark Partner im Interreg Europe Projekt SUBTRACT. Ziel des Projektes ist es, den Re-Use-Sektor (überwiegend KMU, häufig auch sozialökonomische Betriebe oder Vereine) in der eigenen Region zu stärken, Erfahrungen mit anderen Regionen auszutauschen und von den Best Practices zu lernen.

2 RECHTLICHER HINTERGRUND VON RE-USE

Mit der Novelle des Abfallwirtschaftsgesetzes 2002 in der AWG-Novelle 2010 wurde die neue fünfstufige Abfallhierarchie gemäß der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG in Österreich gesetzlich verankert. Die Hierarchie ist folgendermaßen aufgebaut:

1. Abfallvermeidung
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung
3. Stoffliche Verwertung
4. Sonstige (thermische) Verwertung
5. Beseitigung/Deponierung

Neben der Einführung der „Vorbereitung zur Wiederverwendung“ (Re-Use) beinhaltet die AWG-Novelle 2010 (AWG- Novelle 2010) auch die Verpflichtung zur Erstellung eines bundesweiten Abfallvermeidungsprogramms. Die ersten beiden österreichischen Abfallvermeidungsprogramme aus 2011 (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft 2011) und 2017 (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2017) enthielten "Re-Use" als eines von fünf Handlungsfeldern. Im aktuell vorliegenden Entwurf zum Abfallvermeidungsprogramm 2022 (Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie 2022) heißt dieses Handlungsfeld „Re-Use & Reparatur“. Die Wiederverwendung von Bauteilen aus Bau- und Abbruchabfällen ist unter bestimmten Voraussetzungen verpflichtend, wie 2015 in der Recycling-Baustoff-Verordnung (Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft 2015) festgelegt wurde. Nach der Abfallbehandlungspflichtenverordnung 2017 (Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft 2017) müssen Elektro- und Elektronik-Altgeräte, die für die Wiederverwendung bestimmt sind, so gesammelt, gelagert und befördert werden, dass die anschließende Vorbereitung zur Wiederverwendung nicht erschwert oder unmöglich gemacht wird. Nach der Altfahrzeugverordnung (Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft 2002) sollen Hersteller und Importeure wiederverwendbare Bauteile von Altfahrzeugen so weit wie möglich wiederverwenden.

Die Bewirtschaftung der nicht gefährlichen Siedlungsabfälle fällt in Österreich in die Zuständigkeit der Bundesländer. Das Steiermärkische Abfallwirtschaftsgesetz 2004, kurz StAWG, (Steiermärkische Landesregierung 2004) enthält ebenfalls die fünfstufige Abfallhierarchie. Bereits vor der Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie 2008 (Europäisches Parlament und Europäischer Rat 2008) in österreichisches Recht wurde die neue Abfallhierarchie und somit die „Vorbereitung zur Wiederverwendung“ als wesentliches Prinzip der Abfallwirtschaft in den Steirischen Abfallwirtschaftsplan 2010 (Winter 2010) aufgenommen (Beschluss der Steiermärkischen Landesregierung vom Mai 2010). Wesentliche Maßnahmen zur verstärkten Umsetzung der Wiederverwendung wurden in diesem Sinne geplant und in den Folgejahren umgesetzt.

3 NACHHALTIGE WIRKUNG VON RE-USE

Re-Use trägt zu Klima- und Umweltschutz bei. Die Einsparung von CO₂-Äquivalenten durch Re-Use wird für Österreich auf rund 272.000 t geschätzt (RepaNet - Re-Use- und Reparaturnetzwerk Österreich 2020). Darüber hinaus werden durch die Wiederverwendung und die damit verbundene Nutzungsdauerverlängerung eines Produktes sämtliche Schadstoffemissionen und der Ressourcenverbrauch (Rohstoffe, Energie, Wasser, Flächen etc.) vermieden, welche mit der Sammlung und Behandlung des benutzten Produktes als Abfall und der erforderlichen Erzeugung eines neuen Produktes (inkl. Produktion, Distribution, Infrastruktur etc.) anfallen würden. Durch Re-Use bleibt die in das Produkt investierte Wertschöpfung erhalten, während Recycling nur die darin enthaltenen Rohstoffe zurückgewinnt.

Re-Use ist aber nicht nur ein Beitrag zum nachhaltigen Konsum, sondern auch ein arbeitsintensiver Wirtschaftssektor, der zur Stärkung der regionalen Wirtschaftskreisläufe beiträgt. Die Sammlung und Behandlung (z.B. Transport, Sortierung, Reinigung, Reparatur, Sicherheitschecks, Feststellung des Abfallendes, etc.), sowie der Verkauf von Re-Use Gütern eignet sich daher hervorragend zur Schaffung von Beschäftigung in den steirischen Regionen.

Mit Re-Use können somit Ressourcen geschont, Abfälle vermieden, Arbeitsplätze geschaffen, Armut verringert und regionale Wertschöpfung erhalten werden.

4 RE-USE IN DER STEIERMARK

Zur Umsetzung der 5-stufigen Abfallhierarchie und Beschleunigung des Wandels zur Kreislaufwirtschaft wurden in der Steiermark zahlreiche Kampagnen und Projekte zur Stärkung und Forcierung der Wiederverwendung umgesetzt. Die wichtigsten sind im Folgenden kurz dargestellt.

4.1 G'scheit feiern

Im Jahr 2001 wurde "G'scheit Feiern" als Initiative für abfallarme Veranstaltungen mit regionalen Lebensmitteln und sanfter Mobilität eingeführt. Die strengen Kriterien für „G'scheit Feiern“-Veranstaltungen (z.B. ausschließliche Verwendung von Mehrweg-Geschirr, -Besteck, -Tischdecken und -verpackungen) führen zu einer Reduktion des Abfallaufkommens um 90 % im Vergleich mit herkömmlichen Festen. Durch die Verwendung regionaler Lebensmittel werden außerdem Transportwege kurz gehalten. Die größte konsequent nach „G'scheit Feiern“-Kriterien umgesetzte Veranstaltung ist das jährliche Filmfestival Diagonale in Graz mit mehr als 30.000 Besucher:innen. Unterstützt werden „G'scheit Feiern“-Veranstalter:innen vom Land Steiermark und den Regionalbetreuer:innen in den steirischen Abfallwirtschaftsverbänden. Infos unter www.gscheitfeiern.at.

4.2 Retourmöbel Steiermark

Ziel dieses vom Land Steiermark initiierten einjährigen Pilotprojekts (2012) war es, gebrauchte Möbel von Kund:innen des Möbelhandels einer zweiten Nutzung zuzuführen, indem diese Waren von sozialen Integrationsunternehmen erneut zum Verkauf in deren Shops zu sozial fairen Preisen vorbereitet wurden. In sieben großen Möbelhäusern in der Steiermark konnten die Kund:innen ihre gebrauchten Möbel in der Projektphase zurückgeben. Infos unter: <https://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/11643363/134988588/>.

4.3 Reparaturführer Steiermark

Die Reparatur von Gebrauchsgegenständen trägt zur Nutzungsverlängerung bei und stellt einen wichtigen Beitrag zu Re-Use dar. Um den Steirer:innen den Zugang zu Reparaturmöglichkeiten zu erleichtern, steht ein Online-Suchportal für Reparaturbetriebe unter <http://www.reparaturfuehrer.at/Steiermark> zur Verfügung.

So können im Schadensfall einfach und rasch kompetente Betriebe für die Reparatur gefunden werden. Reparaturbetriebe können sich kostenlos eintragen und auch die Benutzung des Portals ist für die Bevölkerung kostenlos. Am Steiermark-Portal des Reparaturführers sind 1.923 (Stand Juni 2022) Reparaturbetriebe in insgesamt elf verschiedenen Kategorien gelistet – von „Bekleidung und Accessoires“ über „Haushaltsgeräte und Maschinen“ bis zu „Wohnungseinrichtung und Heimtextilien“.

4.4 Steiermark-Weinflasche

Die Steiermarkflasche ist eine Weinflasche mit dem ins Glas eingepprägten, steirischen Wappentier, dem steirischen Panther. Sie wurde ursprünglich zum besseren Marketing des steirischen Weins eingeführt. 2011 wurde ein Pilotprojekt zur Wiederbefüllung dieser eigentlichen Einwegflasche gestartet. Ziel war, ein möglichst breites Angebot an Rücknahmestellen bei Weinbauern und dem Einzelhandel zu schaffen.

Obwohl es sich bei der Steiermarkflasche nicht um eine Pfandflasche handelt, konnte eine Rücklaufquote von annähernd 40 % erreicht werden. Im Rahmen des Projekt-Relaunches 2021/22 konnte die Anzahl der Rücknahmestellen auf fast 450 (darunter über 190 steirische Weinbauern und ca. 250 Märkte der Fa. SPAR in Steiermark und Südburgenland) gesteigert werden. Sie sind nun übersichtlich in einer kostenlosen GIS-basierten Karte online abrufbar. Infos unter www.steiermarkflasche.at

4.5 Interreg Europe SUBTRACT

Seit 2019 ist das Amt der Steiermärkischen Landesregierung (A14Referat Abfall- und Ressourcenwirtschaft) Partner im Interreg Europe Projekt SUBTRACT (<https://projects2014-2020.interregeurope.eu/subtract/> und <https://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/12766481/155890317>

Nach einer intensiven Phase des Erfahrungsaustausches auf europäischer Ebene und der Durchführung eines Stakeholder-Prozesses in der Steiermark wurden in Rahmen eines Aktionsplans (Winter 2021) Maßnahmen zur Stärkung des Sektors formuliert:

1. Erhöhung der Sichtbarkeit und Digitalisierung des Sektors durch die Bereitstellung einer kostenlosen digitalen Re-Use-Landkarte für die steirische Bevölkerung
2. Erstellung eines Leitfadens mit den rechtlichen und fachlichen Rahmenbedingungen für Re-Use Betriebe
3. Bewusstseinsbildung und Verbesserung des Images von Re-Use in der Bevölkerung. Dazu wurde 2022 der „Re-Use-Herbst Steiermark“ als Zeitraum mit Re-Use-Hotspots in allen steirischen Regionen konzipiert.



Abb. 1: Projekt-Logo Interreg EUROPE SUBTRACT

4.5.1 Re-Use-Landkarte Steiermark

Um der steirischen Bevölkerung das Auffinden von Re-Use-, Second-Hand- und Upcycling-Shops zu erleichtern und das Thema „Re-Use“ bekannter zu machen, hat das Referat Abfall- und Ressourcenwirtschaft die „Re-Use Landkarte Steiermark“ als kostenloses Online-Angebot ins Leben gerufen (www.abfallwirtschaft.steiermark.at/reuselandkarte). In der Re-Use-Landkarte Steiermark sind steirische Re-Use-Einrichtungen mit ihrem umfangreichen und vielfältigen Angebot abrufbar. Beim Anklicken eines Icons in der Karte öffnet sich ein Pop-Up-Fenster mit Detailinformationen zu Sortiment, Öffnungszeiten und Kontaktdaten der betreffenden Einrichtung.

In den meisten auf der Re-Use Landkarte verorteten Einrichtungen kann die Bevölkerung auch nicht mehr benötigte, aber funktionstüchtige Gegenstände für die Wiederverwendung abgeben/spenden. Darüber hinaus gibt es Re-Use Sammelecken in zahlreichen Abfallsammelzentren in der Steiermark. Die entgegen genommenen Re-Use Spenden werden dann entweder im Re-Use Shop vor Ort zum Verkauf angeboten oder an einen sozialwirtschaftlichen Betrieb zur Vorbereitung zur Wiederverwendung und zum Verkauf weitergegeben.

4.5.2 Re-Use Herbst Steiermark

Der „Re-Use-Herbst Steiermark“ fand zum ersten Mal von 21. bis 25. September 2022 statt. Auftakt war der erste Umweltkirtag des Abfallwirtschaftsverbandes Leoben, bei dem neben weiteren Themen wie Abfall, Umwelt, Nachhaltigkeit, Klima und Regionalität auch Re-Use, Reparatur und Upcycling Schwerpunkte bildeten.

In Zusammenarbeit mit dem steirischen Re-Use-Sektor (Betriebe, sozialökonomische Einrichtungen, Vereine und Privatinitiativen) und den steirischen Abfallwirtschaftsverbänden konnten mittels öffentlichkeitswirksamer Events in der ganzen Steiermark die Bekanntheit des Re-Use-Sektors gesteigert, das Image der Re-Use-Waren verbessert und wertvolle Vernetzungsaktivitäten initiiert werden. Eindrücke und Ergebnisse der Veranstaltungen werden am Posterbeitrag präsentiert.



Abb. 2: Re-Use Landkarte Steiermark, © Land Steiermark/A14

5 SCHLUSSFOLGERUNG

Der ambitionierte Weg der Steiermark zur Kreislaufwirtschaft lässt sich nur unter konsequenter Anwendung der Abfallhierarchie erreichen. Re-Use ist daher auch einer der aktuellen Schwerpunkte der Abfallwirtschaft im Land Steiermark. Im Rahmen des Interreg-Europe Projektes SUBTRACT konnten mit der Re-Use-Landkarte und dem Re-Use-Herbst Steiermark wesentliche Initiativen entwickelt und gestartet werden. Die Evaluierung beider Initiativen konnte erst im Herbst 2022 erfolgen und daher erst am Posterbeitrag abgebildet werden. Schon vorab lässt sich sagen, dass Re-Use mehr Aufmerksamkeit und Bewusstseinsbildung braucht, um breit in der Bevölkerung verankert zu werden. Das im Zuge des Projektes etablierte Stakeholder-Netzwerk erweist sich hier als besonders wertvoll und ermöglicht auch in Zukunft ein abgestimmtes Verfolgen dieses Zieles.

LITERATUR

- AWG- Novelle (2010) Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002), BGBl. I Nr. 102, geändert durch das Bundesgesetz BGBl. I Nr. 115/2009. Wien, Österreich.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2011) Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011 - Band 1. Wien, Österreich.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2017) Bundesabfallwirtschaftsplan 2017 - Teil 1. Wien, Österreich .
- Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2022) Abfallvermeidungsprogramm 2022. Wien, Österreich.
- Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2002) Altfahrzeugeverordnung i.d.g.F.: BGBl. II Nr. 407/2002 . Wien, Österreich.
- Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2015) Recycling-Baustoffverordnung – RBV i.d.g.F.: BGBl. II Nr. 181/2015. Wien, Österreich.
- Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2017) Abfallbehandlungspflichtenverordnung i.d.g.F.: BGBl. II Nr. 459/2004 . Wien, Österreich.
- Europäisches Parlament und Europäischer Rat (2008) Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union 2008/98/EG. Brüssel , Belgien .

RepaNet - Re-Use- und Reparaturnetzwerk Österreich (2020) Re-Use Markterhebung 2020 . Wien , Österreich .

Steiermärkische Landesregierung (2004) Steiermärkisches Abfallwirtschaftsgesetz 2004 (StAWG) i.d.g.F.: LGBl. Nr. 65/2004 (XIV. GPStLT RV EZ 1421/1 AB EZ 1421/14). Graz, Steiermark, Österreich.

Winter I. - Amt der Steiermärkischen Landesregierung, A14 (2010) Landes-Abfallwirtschaftsplan 2010. Graz, Steiermark, Österreich.

Winter I. - Amt der Steiermärkischen Landesregierung, A14 (2021) SUBTRACT Action Plan. Graz, Steiermark, Österreich.

The AHOY-Project: Waste Wood Sorting with X-ray Technology

R. Wagner¹, C. Bauer¹ & J. Leisner¹

¹⁾ Fraunhofer IIS, Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS, Division Development Center X-Ray Technology, Application-specific Methods and Systems, Fuerth, Germany

ABSTRACT: In the context of circular economy, waste wood is an important resource. However, according to the German waste wood ordinance, sorting into four categories is necessary before recycling. These categories describe the purity of waste wood based on possible contamination, like paint, foreign bodies, or wood preservatives. Only the purest two categories are allowed to be recycled. For categorization, manual sorting is currently used. This is not only time-consuming and expensive, but also relatively inaccurate. An automated, sensor-based solution would lead to cost savings for recycling companies and also support a sustainable use of resources. For this purpose, a non-contact measuring system, which can examine waste wood chips, will be developed within the project AHOY. As a proof of concept, this paper presents dual energy X-ray transmission (DE-XRT) for the discrimination between clean wood and the most common contaminants polyvinyl chloride and white lead paint. The results show that even thin layers of contaminants can be detected. The DE-XRT data are intended for a later fusion with near-infrared spectroscopy, which is sensitive to organic contaminants hard to detect by DE-XRT. Artificial neural networks will be applied to the fused data to achieve a sorting process that yields waste wood chips of the purest two categories.

1 INTRODUCTION

Waste wood is a valuable resource, but is hardly recycled despite increasing demand, predicted supply gaps (Mantau et al. 2010), and galloping wood prices since 2020 (Trading Economics 2022). In Germany alone around 10 million tons of waste wood accumulated in 2016. Only a minor part (1.7 million tons) is substantially reused in the production of chipboards. The majority (7.7 million tons) is fed into energy recovery, i.e., burned in one of the 80 German waste wood power plants (BMUV 2021), and is thus lost, while the supply of fresh wood is limited by slow growth cycles and finite acreage. In view of current environmental regulations, climate change and massive tree mortality, waste wood should be kept permanently in the circular economy as a high-quality raw material in the future.

In Germany, a waste wood ordinance (AltholzV 2020) differentiates between four classes of the material and regulates its further use. While waste wood of classes I and II (e.g., uncontaminated, glued, painted without halogen organic compounds) can be recycled, classes III and IV (e.g., contaminated with halogen organic compounds, wood preservation agents) are burned. In addition, other countries have similar regulations (RHV 2022, BAFU 2019, Besserer et al. 2021). The further use of waste wood requires a sorting process. Before recycling, waste wood of classes III and IV, as well as foreign objects like glass, metal or rocks, have to be removed. Recycling of waste wood often means that it is shredded and used to produce chipboards. Therefore, sorting after shredding makes sense. This allows, for instance, the recycling of uncontaminated material from the inside of a wooden beam, while removing parts from the surface.

The project AHOY will attempt to develop a sorting procedure for individual wood chips by combining different methods. The outcome of this sorting process will be waste wood chips of the first two categories, which can be recycled and materially reused without health concerns.

One method used in the project is dual energy X-ray transmission (DE-XRT), a technique suitable for various sorting tasks (Firsching et al. 2019, Bauer et al. 2021a). It allows to distinguish different chemical elements or compounds and works the better, the more the materials' mass attenuation coefficients differ. For instance, bone fragments or metal can be found in food (Bauer et al. 2021b). Given the chemical composition of the materials, this task is similar to the detection of metal or stone in wood.

However, it is challenging to discriminate chemically similar materials like wood and some organic wood preservation agents like neonicotinoids and benzoylureas. Therefore, during the project, DE-XRT will be combined with near-infrared spectroscopy, which has shown the ability for the detection of wood preservation agents and other organic compounds (Mauruschat et al. 2016, Asbach et al. 2013). Also, multi energy XRT will be used to overcome the limitation of DE-XRT to the discrimination of only two materials. For optimized object classification and evaluation of the large number of spectral channels in this sensor fusion, real-time capable artificial neural networks will also be used. While this is future work, the present paper is restricted to a first proof of concept for the differentiation between waste wood with and without polyvinyl chloride (PVC) and white lead by DE-XRT.

2 DUAL ENERGY X-RAY TRANSMISSION

2.1 Method

For XRT measurements, samples are transported between an X-ray source and a line detector by a manipulation system like a conveyor belt or, on a laboratory scale, a drawer system (Figure 1).

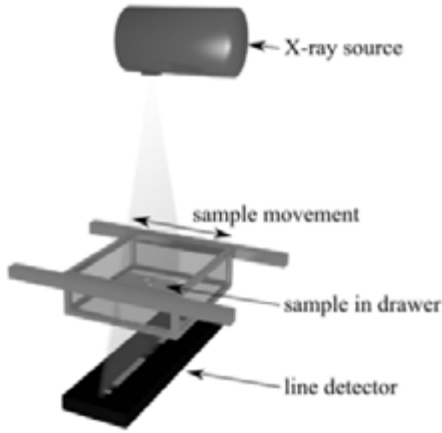


Fig. 1: Schematic of the used drawer system equipped with an X-ray source and a line detector (Wagner et al. 2022)

The signal in the obtained grey scale images is proportional to the intensity I transmitted through the sample. It is given by the Lambert-Beer-law:

$$I = I_0 e^{-p\mu'}, \quad (1)$$

with the unattenuated intensity I_0 and the areal density

$$p = \rho d, \quad (2)$$

where ρ and d are the sample's density and thickness, respectively. The mass attenuation coefficient μ' depends on the atomic number Z of the sample material. It is tabulated for chemical elements and can be calculated for other substances from their chemical composition (NIST 2004).

As a consequence of equation (1), the same grey value can be obtained by measuring thick samples of a material with low mass attenuation μ' or thin samples with high μ' . Thus, XRT does not allow material differentiation.

To achieve a distinction of objects based on material characteristics, one can use the energy dependence of the mass attenuation. Taking two measurements with different X-ray energy transforms equation (1) into an equation system. It can be solved by basis material decomposition (BMD). This method results in a new set of two images showing the areal densities of two chosen basis materials (for details see Firsching et al. 2011, Wagner et al. 2022, Bauer et al. 2021b).

2.2 Measurement Setup

For the DE-XRT measurements, a Hamamatsu C11800-08U dual energy line detector with 0.4 mm pixel pitch was used. It is made of two detection layers. While the first layer mainly detects low energy X-ray photons, it also acts as a prefilter for the second layer, which records photons of higher energy. Samples were moved with approximately 170 mm/s and the image was recorded with an exposure time of 2.67 ms per line. The X-ray source (Comet MXR-225HP/11) was operated at a tube voltage of 70 kV and a current of 6.8 mA. The image magnification was $M \approx 1$.

3 SAMPLES

Two kinds of samples were examined. The first were old waste chipboards (ca. 1.7 cm thickness) with thin layers of PVC. These layers could easily be removed to obtain samples without coating. Further, thicker PVC could be produced by stacking pieces of coating.

The second kind of samples were parts cut from old window sashes painted with a white colour. Thin boards of 2 mm and 3 mm thickness as well as a part with 2.3 cm thickness were measured. Paint was removed from some parts to allow the investigation of clean wood samples. Some of the window sash samples also contained putty.

For the purpose of this paper, the mass attenuation coefficients μ' of the samples were approximated by using basis materials with effective atomic number Z_{eff} 7.3 for chipboard and wood and 11.5 for the white paint. The mass attenuation coefficient of PVC was calculated from its chemical composition.

4 RESULTS

4.1 PVC

Figure 2 shows DE-XRT measurements of the chipboard with PVC. The coating of two samples was (partially) removed to obtain samples with no or thicker PVC. Chipboard and PVC cannot be distinguished based on their grey values in the low and high energy XRT images (Figure 2 (b) and (c)).

However, after BMD a clear discrimination of the two materials is possible. The different thicknesses of the PVC are visible in Figure 2 (e). On the upper right sample, one of the PVC layers had unfolded during the measurement and stood nearly perpendicular to the sample surface, creating a strong signal in the areal density image. Even the density fluctuations in the chipboards can be perceived (Figure 2 (d)).

The results show that even thin coatings of PVC are visible. Another problem in waste wood recycling are the thicker PVC edge bands. It can be expected that those can be found even more easily as they would create a stronger signal in the corresponding areal density image.

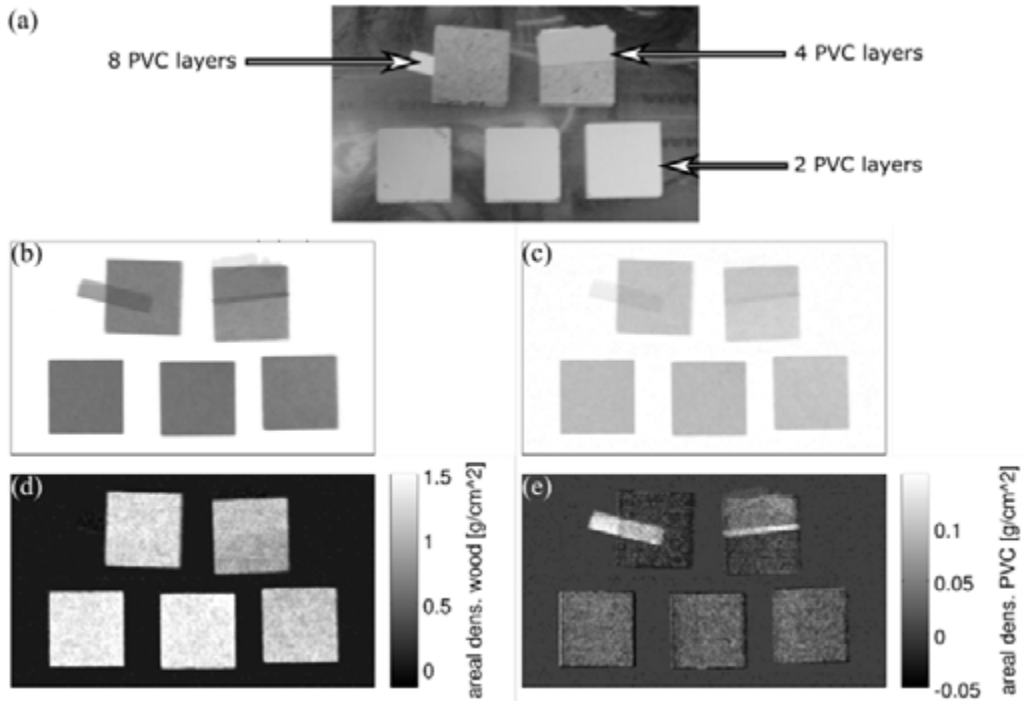


Fig. 2: DE-XRT measurements of chipboards with PVC coating on the upper and lower surfaces. (a) Photograph of the samples. The coating of the top left sample has been removed completely from both surfaces and folded to form an eightfold layer. The coating of the top right sample has been removed partially from both surfaces and folded to form a fourfold layer. (b) Low energy DE-XRT image. (c) High energy DE-XRT image. (d) Areal density of wood obtained by BMD. (e) Areal density of PVC

4.2 White Lead Paint

Figure 3 shows DE-XRT measurements of waste wood painted with a white colour. To allow a comparison of painted and clean wood, the colour coat had been removed from the surfaces of the thicker sample. It also was scraped off the edge from one of the thinner boards.

X-ray fluorescence (XRF) measurements on the paint showed between 0 ppm and near 6,000 ppm of lead. It may be concluded that it contains white lead as a pigment. Only a very small amount of Pb (in Germany 30 mg per 1 kg of wood) is allowed for recycling (AltholzV 2020). Thus, the detection of the paint is required.

The BMD analysis produces an image showing the areal density of the paint (Figure 3 (d)). This image shows a signal for the thin boards as well as for the edges of the thicker part. No signal is observed for the areas without paint. The paint scraped off from the sample's surface was placed into a plastic bag next to the sample. While it can be seen on the areal density image corresponding to the paint, the unpainted patch left on the sample shows up only on the areal density image of wood. The latter image also shows the height differences of the wood.

These results suggest that it is possible to distinguish painted from unpainted wood by DE-XRT. However, also the putty appears in the same areal density image as the paint. These two contaminants cannot be distinguished.

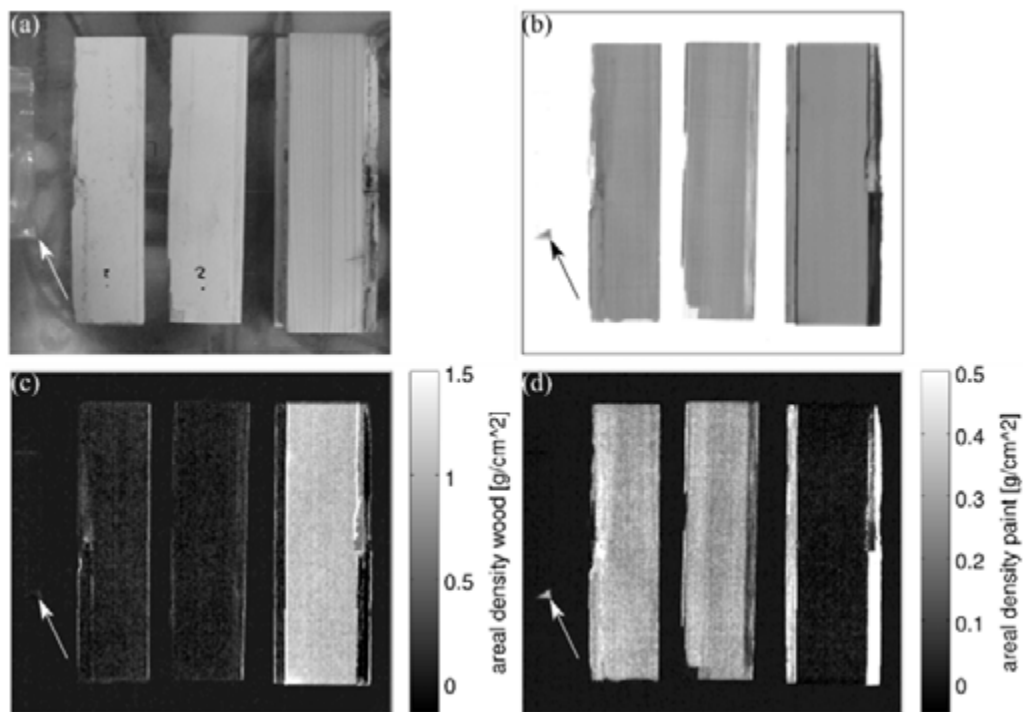


Fig. 3: DE-XRT measurements of wood painted with white lead paint. (a) Photograph of the samples. Thickness from left to right 3 mm, 2 mm, 23 mm (b) Low energy DE-XRT image. (c) Areal density of wood obtained by BMD. (d) Areal density of colour coat. Arrows indicate paint scraped off the wood

5 CONCLUSION & OUTLOOK

The results presented in this paper show that it is possible to detect contaminations on wood. Due to the differences in chemical composition, there is a sufficient difference in the mass attenuation coefficients of wood on the one side and white lead paint as well as PVC on the other side. This allows to detect even thin layers of contaminants. As DE-XRT is a method working in transmission, it is not important whether the unwanted substance is on the surface or below.

While it is possible to achieve a discrimination between wood and other material classes, DE-XRT cannot identify materials. Thus, it is not always possible to distinguish harmless from problematic contaminations. For instance, white paint with and without Pb cannot be distinguished. In a sorting process this would lead to the removal of waste wood chips that could be recycled. This is, however, better than to recycle chips with problematic contaminations. Further, DE-XRT reaches its limits when the chemical composition and thus the mass attenuation coefficients of the materials, that should be distinguished, are too similar.

To address these problems, an extension of DE-XRT to multi energy (ME-) XRT is possible. This method allows the discrimination of more than two materials if one of them has a K-absorption edge in the detected energy range. This is the case for Pb, which could permit the distinction of white lead paint from harmless paint. Also, the combination with near-infrared spectroscopy is of advantage. This method enables material identification and is especially successful for organic materials with low effective atomic number, for which a differentiation from wood by DE-XRT is challenging. Its disadvantage is the limitation to surface measurements. The data obtained by the different methods can be fused and analysed by neural networks. These can be trained to recognise patterns in the spectral data that indicate problematic substances.

6 ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the AHOY project partner Fraunhofer Institute for Wood Research Wilhelm-Klauditz-Institut WKI for the samples with PVC and white lead paint and the XRF measurements.

REFERENCES

- AltholzV (2020, 06. 19) Altholzverordnung vom 15. August 2002 (BGBl. I S. 3302), die zuletzt durch Artikel 120 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist. Retrieved 07. 05, 2022, from <https://www.gesetze-im-internet.de/altholzv/AltholzV.pdf>.
- Asbach, M., Mauruschat, D., Plinke, B. (2013) Understanding multi-spectral images of wood particles with matrix factorization. *Optical Characterization of Materials (OCM)* (pp. 191–201). Karlsruhe: Karlsruhe Institute for Technology KIT.
- BAFU (2019, 10. 01) Umweltverträgliche Entsorgung von Holzabfällen. Retrieved 07. 07, 2022, from <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/fachinformationen/abfallpolitik-und-massnahmen/vollzugshilfe-ueber-den-verkehr-mit-sonderabfaellen-und-anderen-/umweltvertraegliche-entsorgung-von-sonderabfaellen-und-anderen-k/umweltvertraegliche-entsorgung-von-holzabfaellen.html>
- Bauer, C., Wagner, R., Leisner, J. (2021b, 11.) Foreign Body Detection in Frozen Food by Dual Energy X-Ray Transmission. *Sensors and Transducers*, 253(6), pp. 23-30.
- Bauer, C., Wagner, R., Orberger, B., Firsching, M., Ennen, A., Garcia Pina, C., Wagner, C., Honarmand, M., Nabatian, G., Monsef, I. (2021a) Potential of Dual and Multi Energy XRT and CT Analyses on Iron Formations. *Sensors*, 21(7), 2455.
- Besserer, A., Troilo, S., Girods, P., Rogaume, Y., Brosse, N. (2021) Cascading Recycling of Wood Waste: A Review. *Polymers*, 13(11), 1752.
- BMUV (2021, 07. 26) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Retrieved 07. 07, 2022, from <https://www.bmuv.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/kreislaufwirtschaft/abfallarten-abfallstroeme/altholz>.
- Firsching, M., Bauer, C., Wagner, R., Ennen, A., Ahsan, A., Kampmann, T. C., Tiu, G., Valencia, A., Casali, A., Montes Atenas, G. (2019) REWO-SORT Sensor Fusion for Enhanced Ore Sorting: a Project Overview. *Procemin-Geomet Conference 2019*, 20-22 november 2019, Santiago de Chile, Chile.
- Firsching, M., Nachtrab, F., Uhlmann, N., Hanke, R. (2011) Multi-Energy X-ray Imaging as a Quantitative Method for Materials Characterization. *Advanced Materials*, 23(22-23), pp. 2655-2656. doi:10.1002/adma.201004111.
- Mantau, U., Saal, U., Prins, K., Steierer, F., Lindner, M., Verkerk, H., Eggers, J., Leek, N.; Oldenburger, J.; Asikainen, A.; Anttila, P. (2010) Final Report - Real potential for changes in growth and use of EU forests. EUwood.
- Mauruschat, D., Plinke, B., Aderhold, J., Gunschera, J., Meinschmidt, P., Salthammer, T. (2016) Application of near-infrared spectroscopy for the fast detection and sorting of wood-plastic composites and waste wood treated with wood preservatives. *Wood Sci Technol*(50), pp. 313–331.
- NIST (2004, 07.) X-Ray Mass Attenuation Coefficients. Retrieved 07. 06, 2022, from <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>.
- RHV (2022, 07. 07) Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über das Recycling von Altholz in der Holzwerkstoffindustrie (Recyclingholzverordnung – RHV). Retrieved 07. 07, 2022, from <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20007830>.
- Trading Economics (2022, Juli 7) Trading Economics. Retrieved from <https://tradingeconomics.com/commodity/lumber>.
- Wagner, R., Bauer, C., Firsching, M., Leisner, J. (accepted, publication in summer 2022). From food to mining: dual energy xrt applications. In *advances in sensors: reviews* (vol. 8).

Closed-loop recycling of packaging waste at the food manufacturer Freiburger

K. Plevová¹, M. Feuchter¹, M. Wellacher², A. Jamnik², N. Wild¹, H. Pichorner³ & K. Resch-Fauster¹

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Chair of Materials Science and Testing of Plastics, Leoben, Austria

²⁾ Ingenieurbüro Wellacher e.U., Graz, Austria

³⁾ PrimAs Tiefkühlprodukte GmbH, Oberhofen, Austria

ABSTRACT: This work describes different approaches which lead to more environmentally friendly plastic waste management. Plastic waste was analysed using light microscopy, Raman spectroscopy, and differential scanning analysis. Afterward, the waste was sorted by polymer content and mechanically recycled. Recycled material was used to produce films for tertiary packaging (shrinkage films). One possibility is recycling only single-layer films from polyethylene (PE), another possibility is to recycle multilayer films consisting of PE, polyamide 6 (PA6), and ethylene vinyl alcohol copolymer (EVOH). Due to mixing films, and thus polymers, in a certain ratio, both approaches lead to recycled films with sufficient mechanical properties even without using any compatibilizers.

Two different kinds of films - (i) lightweight films from PE and (ii) biopolymers films – were tested as a replacement for stretch wraps (quaternary packaging). Due to their design, lightweight films don't fulfill the requirements for the packaging in the company. Out of seven different biopolymer films, three reached the required strength and toughness for the stretch wrap used in the company.

Recycled films can replace films used as tertiary packaging and reduce significantly the amount of plastic waste. Also using biopolymers films instead of conventional films can cut down the amount of non-degradable plastic waste.

1 INTRODUCTION

Packaging makes up an important part of food production both on side of suppliers and the manufacturer. Different kinds of packaging assure safe transport of goods as well as high quality of food products such as taste, smell, and colour. Therefore, plastic packaging provides a broad variety of properties, and their use in multilayer films enables tailoring properties, for example, films with desired medium barrier properties within excellent mechanical strength. However, the service life of plastic packaging is very short and at the end of it arises the problem of how to reuse or recycle such material to reduce plastic waste (Alipour et al. 2015), (Cenci-Goga et al. 2020).

Packing materials from ingredients become waste at the moment when ingredients are used in the manufacturing process. At the same time, new products need to be packed before transportation. A four-step packaging system is used for products in this study. Primary packaging is in direct contact with food, secondary packaging consists of cardboard boxes for food products, tertiary packaging is used for packing more boxes together, and quaternary packaging for wrapping goods on pallets to secure them during transportation. All of those packaging materials have a short service life and become waste before any degradation of their properties can occur. Using packing material that comes with the supplies as material for packaging manufactured products seems like a suitable way to reduce plastic waste.

The PizzaPack project aims to reduce the amount of plastic waste in PrimAs Tiefkühlprodukte GmbH. The main goal was to find a way to replace tertiary and quaternary packaging films with films containing a high amount of post-consumer recyclates (PCR). In order to fulfill this goal, the recycling process must be developed, or the existing system of packaging should be analysed and transformed into a closed-loop system.

The closed-loop system in waste management requires the cooperation of involved parties. Recycled packaging films should be returned to the PrimAs company to be reused or recycled again.

Such a system helps to considerably reduce the amount of waste because the material can be used as long as it has eligible properties. Not only does it reduce the amount of waste but also the amount of virgin polymers in packaging.

2 EXPERIMENTAL PART

A combination of light microscopy, Raman spectroscopy, and differential scanning calorimetry (DSC) was used to analyse plastic waste films. At first, the macrostructure was analysed with light microscopy. Secondly, the chemical composition of films was determined with spectroscopy methods and DSC. After analysis, films were chosen for recycling according to their recycling potential and also according to the make-up of plastic waste in PrimAs company (Scheuerer & Jesdinszki 2012).

Lab-scale recycling was done in the measuring mixer (Typ 350 E, Brabender GmbH) at 240 °C and 80 rpm. Before kneading, the material was washed in warm water (60 °C) with detergent and dried in an oven at 60 °C for at least 24 hours. Films from kneaded material were prepared in a vacuum press Type P200PV (Dr. Collin GmbH) at a maximal temperature of 210 °C and 190 bar. The two most promising recyclates were used for the upscaled recycling process.

Upscaled recycling was done in a compounder ZSE 18HP-48D (Leitzritzt Extrusionstechnik GmbH) with a screw speed of 350 rpm and maximal temperature of 150 °C and 270 °C for PE films and multilayer films with PA6, respectively. Films from compounded material were produced by film casting (Flachfolien-Laboranlage 400, Plastik Maschinenbau) at 265 °C and speed 16,8 m·min⁻¹ in TCKT GmbH, Wels.

Mechanical properties like tensile strength and elongation at break were measured on a universal testing machine (Zwick Z001, Zwick GmbH). Shrinkage tests were conducted according to ASTM-D 2732-03 in a silicon oil bath. To evaluate the transparency of the bar code scanner, the films were put on the bar code and tested if the universal bar code scanner, if it is possible to scan the code.

To test if the selected biopolymers could be used as stretch wraps tests on a stretch wrap machine (Flyer VA; Pamminer Verpackungstechnik GmbH, Linz) have been performed. Within the tests, the strain and the thickness of the films as well as the force on the packed goods have been measured.

3 WASTE ANALYSIS

Annual production of approximately 88 t of plastic waste was recorded as the actual state of the waste situation in PrimAs. The PizzaPack project started with the current state analysis of the waste, especially plastic waste.

The plastic waste in PrimAs can be in principle divided into two fractions: (i) transparent white films, i.e. composed of single-layer film from polyethylene (PE), and (ii) blue films, i.e. multilayer films composed mainly from polyethylene (PE), polyamide (PA) and ethylene vinyl alcohol copolymer (EVOH) with a different weight ratio of materials. On one hand, single-layer films are easily recyclable in a mechanical way, on the other hand, multilayer films are mostly considered unrecyclable because they are made of different immiscible polymers. Therefore, part of this project is to find a way how to mechanically recycle multilayer films and return them to the packaging process.

4 REPLACEMENT OF TERTIARY PACKAGING FILMS

4.1 *Single-layer films*

Films from low-density polyethylene (LDPE) are used as thermal biaxial shrink films (tertiary packaging).

The first step was a literature study of commercially available shrink films with high content of PCR. A practical test of those films proved that there were no obstacles to using shrink films containing PCR in the manufacturing process.

The next step was the implementation of mechanical recycling of plastic waste to produce shrink films and return the plastic waste to the packaging chain. The easiest way is to recycle only single-layer films composed of polyethylene. The recycled shrink film was produced from the PE single-layer films by compounding and blown film extrusion in collaboration with a recycling company.

As a result of mentioned tests, a shrink film with 65 % PCR is used in PrimAs as a standard shrink film at the present. The recycled part of the shrink film is made strictly from single-layer transparent PE films. However, the transparent white films are only one-fifth of the plastic waste and to reduce plastic waste significantly, the blue part of waste - multilayer films - has to be recycled too.

4.2 *Multilayer films*

The main problem with the recycling of multilayer films is their composition of immiscible polymers. Mixing immiscible polymers leads to material with worse properties than the original material. Properties of recycled materials can be improved by one of two approaches. One way is to find the best ratio of different polymers, and the other way is using a compatibilizer. Adequate compatibilizer should provide "bonding" between two immiscible polymers and thus improve the mechanical properties of a blend. The second approach becomes more challenging with more than two materials in the blend.

The whole recycling process was simulated in a lab. The films were cut into small pieces and washed afterward to remove any food remains. Paper labels were also removed during cutting. The cleaning process is necessary to obtain the transparency of the recycled film. Shrink film has to be transparent for scanning bar codes of packed products, and each impurity of films deteriorates the optical properties of recycled films, which are already not ideal since the input films are already coloured.

After washing, the films were dried in an oven before kneading. Blends with different ratios of packaging films and also some blends with different compatibilizers were prepared. Two multilayer films made of PA, PE, and EVOH and two different transparent PE films were used as input for the recycling process. Three compatibilizers were chosen, namely (i) conventional poly(ethylene-co-acrylic acid) and poly(ethylene-co-maleic acid) and (ii) unconventional 1,3-phenylene-bis-oxazoline and (iii) 1,4-phenylene-bis-oxazoline (La Mantia et al. 2001), (Scaffaro et al. 2003). After kneading, films were prepared in the vacuum press. The thickness of the films was between 300 and 500 μm . Mechanical properties of these films, such as tensile strength and elongation at break, were tested. Two blends, with the best properties and composition close to the make-up of plastic waste in the company, were prepared for upscaling to semi-industry scale. For upscaled recycling, a compounder was used. Blends for compounding were prepared from four films. From each film was prepared granule in compounder and these granules were mixed in the desired ratio for final compounding. Pre-preparation of granules enabled getting a more homogenous blend than with unprocessed films. This kind of recycling produces approximately 25 μm thick films, which are closer to the commercial shrink film than pressed films. The mechanical properties of thin films were tested again and compared with the standard shrink film.

4.2.1 Shrinkage test

A shrinkage test was carried out with thin films as well as with standard shrink film. Shrinkage test in oil bath caused the maximal shrinkage both in machine directions and perpendicular to the machine direction. To simulate the shrinkage process in the company, the shrinkage of thin films was tested in an oven at elevated temperatures. During the test in the oven, the time-shrinkage dependency was measured. A simulation, where the film was shrunk around a box at raised temperature, was supposed to prove its usability. Also, transparency for bar code reading was tested after the shrinkage test.

Test on a small scale showed that it is possible to recycle multilayer film into shrink film with requested mechanical and optical properties. The next step is finding an industry partner to up-scale recycling on an industry level. After that, recycling can be contemplated as feasible on an industrial scale.

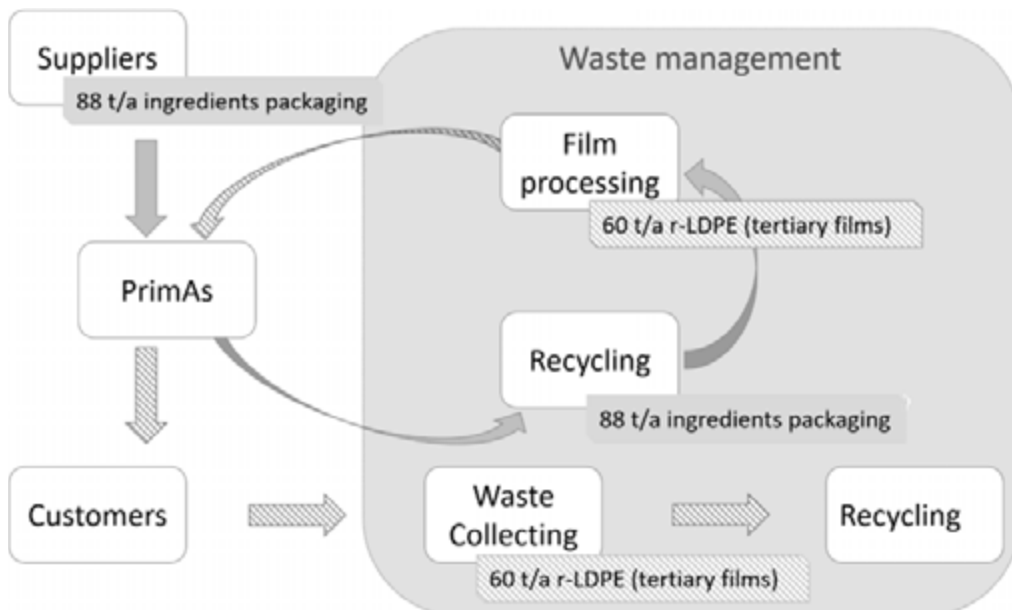


Fig. 1: Diagram of planned waste circulation in PrimAs company

5 REPLACEMENT OF QUATERNARY PACKAGING FILMS

Films from linear low-density polyethylene (LLDPE) are used as stretch films (quaternary packaging). These films are used for wrapping the goods on pallets for transportation. In this project, three possibilities for the replacement of LLDPE films were studied: (i) lightweight stretch films, (ii) biopolymer films, and (iii) stretch films containing PCR.

5.1 Lightweight stretch films

The lightweight stretch film is a commercially available variant of a stretch film. Its design allows using less raw material to produce the same amount of film. Lightweight stretch films contain regularly distributed perforations to reduce their mass. Such alternative stretch film was tested directly in the PrimAs company. The holes in the material allowed water to penetrate the goods, which could lead to damage to secondary packaging (cardboard). Also, the final reduction of material was smaller than expected.

5.2 Bio-films

Biopolymers are a more sustainable variant of conventional fossil-based plastics. Biodegradable polymers especially can help greatly with packaging sustainability. After the end of service life, biopolymers do not need to be incinerated but instead can be placed into the compost, where they degrade to harmless components (Yadav et al. 2018).

Seven different biopolymers were tested in the small-scale wrapping tests simulating wrapping pallets with stretch films. Chosen polymers were polybutylene adipate terephthalate (PBAT), starch and polylactic acid copolymer (starch-PLA), polyamide, starch polymer, and polylactic acid (PLA), and polybutylene succinate (PBS).

Films from PBAT, starch-PLA, and PLA had good strength and toughness and also good performance during the wrapping test. The next step is to upscale the test to the industry level, to prove the feasibility of bio-wrapping films.

5.3 Stretch films with PCR content

As with the tertiary packaging, there is also a possibility to use commercially available stretch films with PCR content. This alternative will be tested in the PrimAs and compared with formers.

6 FUTURE RESEARCH

The goal to create closed-loop packaging also incorporates the primary packaging films. These films are in direct contact with food. Therefore, there are high demands on them to keep quality and safety standards. Implementing recycling material, such as primary packaging, is a great challenge, and should be a focus of future research.

During the recycling arose a problem with labels on packaging film. For a manufacturer, labels are essential for recognizing materials and ingredients within, but create problems with recycling, since labels are commonly made out of paper that causes contamination of recycled material if not removed. To prevent impurities from paper labels in recycled films, the possibilities of reducing their size and switching to plastic labels are discussed.

7 CONCLUSION

In this study, the possibilities of reducing plastic waste by replacing virgin material with high PCR content material and by in-house waste recycling were presented. The following conclusions were drawn:

- Analysis of plastic waste is necessary for subsequent recycling. Information about each layer of films has to be obtained. This can be achieved by a combination of DSC and Raman spectroscopy.
- Replacement of tertiary packaging with commercially available films with high PCR content is possible without decreasing the quality of packaging, and it may be easily implemented.
- According to small-scale tests, it is feasible to produce shrink film from recycled single-layer as well as multilayer films with desired mechanical and optical properties.
- Lightweight stretch films didn't prove themselves as a sufficient replacement for the standard stretch films. Stretch films from biopolymers (PLA, PBAT, and a mixture of PLA with starch) showed good packaging properties in small-scale tests. Upscaling is needed to confirm its sufficiency as wrapping films.

REFERENCES

- Alipour, N., Gedde, U. W., Hedenqvist, M. S., Yu, S., Roth, S., Brüning, K., . . . Schneider, K. (2015). Structure and properties of polyethylene-based and EVOH-based multilayered films with layer thicknesses of 150nm and greater. *European Polymer Journal*, pp. 36-51.
- Cenci-Goga, B. I., Borgogni, E., Karama, M., & Grispoldi, L. (2020). New Trends in Meat Packaging. *Microbiology Research*, pp. 56-67.
- La Mantia, F., Scaffaro, R., Colletti, C., Dimitrova, T., Magagnini, P., Paci, M., & Filippi, S. (2001). Oxazoline functionalization of polyethylenes and their blends with polyamides and polyesters. *Macromolecular symposia*, 265-278.
- Scaffaro, R., La Mantia, F. P., Canfora, L., Polacco, G., Filippi, S., & Magagnini, P. (2003). Reactive compatibilization of PA6/LDPE blends with an ethylene–acrylic acid copolymer and a low molar mass bis-oxazoline. *Polymer*, 6951-6957.
- Scheuerer, Z., & Jesdinszki, M. (2012). Identifizierung von Packstoffen. *Forum Wissenschaft TWB*, (pp. 58-59). Freising.
- Yadav, A., Mangaraj, S., Singh, R., Das, K., Kumar, N., & Arora, S. (2018). Biopolymers as packaging material in food and allied industry. *International Journal of Chemical Studies*, 2411-2418.

Der Einsatz digitaler Werkzeuge zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen – ein Umweltvergleich

S. Scherhauser¹, S. Gollnow¹, M. Eriksson², D. Orth³, K. Abeliotis⁴ & G. Obersteiner¹

¹) Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Abfallwirtschaft, Wien, Österreich

²) SLU Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala, Schweden

³) Österreichisches Ökologie-Institut, Wien, Österreich

⁴) Harokopio University, Kallithea, Griechenland

KURZFASSUNG: Die Vermeidung und Reduktion von Lebensmittelabfällen gehören zu den von der EU gesetzten Prioritäten. Digitale Lösungen, die einen positiven Beitrag zu Umwelt- und Klimazielen leisten, bergen ein anerkanntes Potenzial für die Umsetzung des europäischen Green Deals. Ziel dieses Manuskripts ist die Darstellung der Umwelteffekte der Nutzung digitaler Werkzeuge zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen mittels Ökobilanz. Die negativen Umweltauswirkungen der Umsetzung der Maßnahme (Verwendung von digitalen Werkzeugen) werden mit den erzielten Einsparungen bei der Lebensmittelproduktion und der Abfallbehandlung verglichen. Die vorläufigen Ergebnisse unserer Analyse deuten darauf hin, dass die Umweltbelastung durch den Einsatz digitaler Tools die gewonnene Umweltentlastung durch Lebensmittelabfallvermeidung nicht übersteigt, vorausgesetzt es kann mindestens 5% Abfall eingespart werden.

1 EINLEITUNG

In diesem Konferenzbeitrag werden die Auswirkungen der Vermeidung von Lebensmittelabfällen den Auswirkungen der Nutzung digitaler Werkzeuge gegenübergestellt, wobei Umweltkategorien wie Klimawandel, Versauerung, Eutrophierung, Landnutzung, Wasser und Ressourcennutzung berücksichtigt werden. Die Umweltbilanz wird anhand von Beispielen zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen aus der Praxis erläutert. Die zugrundeliegende Forschungsarbeit wird im Rahmen des Horizon 2020-Projekts LOWINFOOD durchgeführt, das darauf abzielt, abfallarme Lebensmittelwertschöpfungsketten durch die Demonstration innovativer Lösungen zur Reduzierung von Lebensmittelverlusten und -abfällen in einem Multi-Akteur-Ansatz zu entwickeln.

1.1 Vermeidung von Lebensmittelabfällen

Abfallvermeidung kann durch verschiedene Maßnahmen erfolgen; von der direkten Wiederverwendung, Reparatur, Wartung oder anderen Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von Produkten bis hin zur Verringerung oder sogar zum Verzicht auf den Verbrauch von Produkten. Im Falle von Lebensmittelabfällen können im Wesentlichen zwei Gruppen an Vermeidungsmaßnahmen unterschieden werden: 1) die Umverteilung von Lebensmitteln (z. B. Spenden an Lebensmittelbanken, Verarbeitung zu anderen Lebensmittelzutaten) und 2) die Vermeidung von Lebensmittelabfällen an der Quelle (z. B. durch Steigerung der Effizienz der Lieferkette, Änderung des Verbraucherverhaltens). In der Praxis werden viele dieser Maßnahmen unter Verwendung von digitalen Instrumenten umgesetzt, wie z. B. Prognose-Tools zur besseren Vorhersage von Angebot und Nachfrage im Handel oder in der Gastronomie, digitale Marktplätze zum Aufbau neuer Geschäftsfelder und Netzwerke zur Umverteilung von Lebensmittelnebenprodukten oder -resten aus der Produktion sowie der verarbeitenden Industrie sowie Apps zur effizienten und intelligenten Verwaltung von Lebensmitteln in Haushalten.

1.2 Verwendung von digitalen Werkzeugen

In einer digitalisierten Gesellschaft werden digitale Systeme verstärkt genutzt oder benötigt. Es stellt sich die Frage, wie viele Lebensmittelabfälle mit Hilfe digitaler Tools tatsächlich vermieden werden können, welche positiven Auswirkungen davon zu erwarten sind und ob dieser Effekt die Umweltbelastungen durch die verstärkte Nutzung von IT-Geräten oder Mobiltelefonen aufwiegen kann. Positive Auswirkungen der Vermeidung von Lebensmittelabfällen ergeben sich dadurch, dass Emissionen in der gesamten Wertschöpfungskette (Landwirtschaft, Industrie, Handel, Verbraucher inkl. Transport) verringert werden können, da Lebensmittel besser verteilt und eingesetzt werden. Negative Auswirkungen ergeben sich aus der verstärkten Nutzung von Computern und Mobiltelefonen (Abbau von Edel- und Sondermetallen, energieintensive Produktion, geringe Recyclingraten), aber auch aus der Nutzung professioneller Datenzentren (Server). Die Anzahl und der Energieverbrauch von Servern liegen in einem stetig wachsenden Trend mit entsprechendem Anstieg des Materialbedarfs.

2 METHODE

Die Umweltauswirkungen werden mit Hilfe der Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz, engl. Life Cycle Assessment) berechnet. Die Ökobilanz ist eine systematische Methode zur Bewertung der potenziellen Umweltauswirkungen von Produkten und Produktsystemen, die durch die Nutzung von Ressourcen und die Freisetzung von Emissionen in allen Phasen der Lieferkette verursacht werden, von der Beschaffung von Rohstoffen bis zur Abfallentsorgung am Ende des Lebenszyklus (cradle-to-grave).

Die Hauptanwendungsbereiche sind die Identifizierung von Hotspots zwischen Lebenszyklusphasen oder Umweltauswirkungskategorien, und der Vergleich von Systemen oder Szenarien, um Alternativen mit den geringsten Umweltauswirkungen zu finden. Beim Vergleich eines „No Action Szenarios“ (es werden Lebensmittelabfälle produziert) mit einem alternativen Szenario (es werden Lebensmittelabfälle vermieden, im Folgenden als „Prevention Action Szenario“ bezeichnet) werden Netto-Umweltemissionen erzielt, die entweder eine Belastung (positive Netto-Emissionen) oder Entlastung (negative Netto-Emissionen) für der Umwelt zufolge haben. Im Falle der Vermeidung von Lebensmittelabfällen können die folgenden Elemente berücksichtigt werden, basierend auf Caldeira et al. (2019):

1. die Umweltauswirkungen, die mit der Produktion der nicht mehr gekauften Lebensmittel verbunden sind,
2. die Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit den Abfallbehandlungsverfahren, die stattgefunden hätten, wenn die Lebensmittel verschwendet worden wären, und
3. die Umweltauswirkungen, die durch die Durchführung der Maßnahme verursacht werden.

Die ersten beiden Komponenten stellen eine Einsparung dar, während die letzte eine Belastung ist; die algebraische Summe der drei Komponenten ergibt daher die Netto-Emissionen. Die funktionelle Einheit des Systems ist 1 kg (essbare) Lebensmittel, die nicht verschwendet werden.

2.1 Szenario

Das Szenario für die Bewertung umfasst die Vermeidung von Lebensmittelabfällen durch den Einsatz digitaler Systeme. In diesem Fall wird eine App verwendet, die ein System zur Verwaltung von Lebensmitteln zu Hause anbietet, das auf die Reduzierung von Lebensmittelabfällen in Haushalten abzielt. Wir vergleichen das „No Action Szenario“ mit dem „Prevention Action Szenario“ (siehe Abb. 1). Das „Prevention Action Szenario“ beinhaltet die Nutzung von IT für die Entwicklung und Wartung der App, den Betrieb der App und der Speicherung der Anwender-Daten. Für den Betrieb dieser IT-Ausrüstung wird der EU-Strommix berücksichtigt.

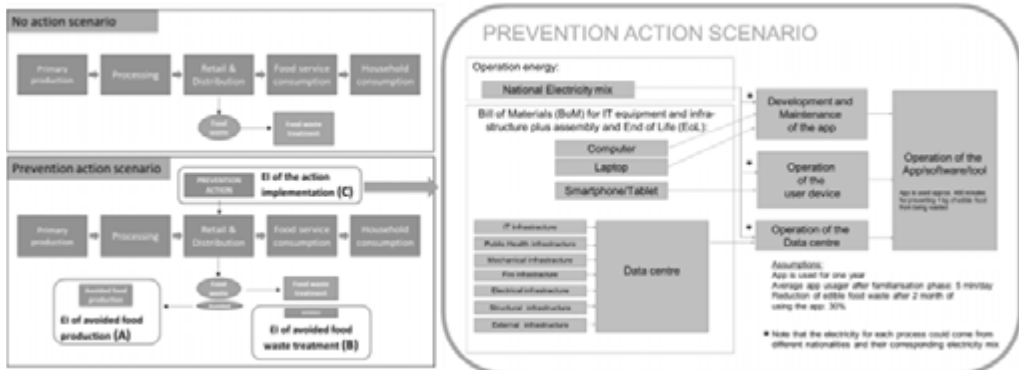


Abb. 1: Illustratives Beispiel für die Bewertung der Vermeidung von Lebensmittelabfällen auf der Grundlage von Caldeira et al. (2019) (links), erweitert um das "Action Scenario" (rechts)

2.2 Life Cycle Inventory

Es wird davon ausgegangen, dass die App ein Jahr lang genutzt wird und erst nach 2-monatiger Verwendung eine Veränderung des Verbrauchers hinsichtlich eines besseren Lebensmittelmanagements (und damit weniger Abfallproduktion) stattgefunden hat. Die durchschnittliche Menge an essbaren Lebensmittelabfällen von 51,6 g/pro Person und Tag kann im ersten Szenario um 30% reduziert werden. Weiters wird ein weiteres Szenario von 5% sowie von 50% angenommen. In der ersten Woche wird davon ausgegangen, dass die App länger pro Tag genutzt wird (20 min/Tag), um die App besser kennen zu lernen. Nach der zweiten Woche sinkt die tägliche Nutzung auf 10 Min./Tag und nach der 3. Woche werden im Basisszenario 5 Min./Tag angenommen mit folgenden Varianten: 2 und 10 min pro Tag.

In der Studie von Christensen et al. (2016) ergab eine Gesamtbildschirmzeit von über 30 Tagen einen Median von 38,4 Stunden (1,28 Stunden pro Tag). Dies ergibt eine Smartphone-Bildschirmzeit von insgesamt 467,2 Stunden pro Jahr. Wir haben die Ergebnisse des Carbon Footprints von Cordella et al. (2021) auf die Referenzeinheit von einem Jahr heruntergebrochen. Wenn man davon ausgeht, dass 413 Minuten benötigt werden, um 1 kg Lebensmittelabfälle im Basisszenario zu vermeiden, entspricht dies 1,47 % der jährlichen Bildschirmzeit bzw. 0,68% und 2,79% bei den Varianten. Das bedeutet, dass im „Prevention Action Szenario“ 1,47 % der mit der Smartphone-Nutzung verbundenen Emissionen (42,8 kg CO₂e Äquivalente pro Jahr, kg CO₂e/a) der Maßnahme zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen zugerechnet werden, d. h. 0,63 kg CO₂e/a in der Baseline, sowie 0,29 und 1,19 kg CO₂e/a in den Varianten.

Weitere Annahmen und Proxy Daten sowie die Quellen werden in Tab. 1 angeführt.

Tab. 1: Zusammenfassung der bei der Umweltbewertung verwendeten Proxy-Daten und der jeweiligen Datenquellen

Component	Process data collected within LOWINFOOD (so-called proxy data)	Inventory data to model background system (data sources)
TYPE A DATA SUBSTITUTED PRODUCT		
Food waste at household level	Method: First results of waste audits made by students in Austria, March to May 2022 (N = 83) Proxy data: 26% vegetables, 12% fruits, 12% bread, 11% drinks (bottled water, wine, beer, coffee, tea), 10% dairy products, 9 % dishes, 10% sides, 10% other	JRC (n.y.) Food Waste prevention calculator
TYPE B DATA: BASELINE SYSTEM REPLACED		
FLW treatment options	Method: First results from a survey among students in Austria, March 2022, (N = 123) : Proxy data : 36% Municipal solid waste collection system (residual waste bin), 34% Organic waste bin (assumed : composting and anaerobic digestion), 30% other unknown	JRC (n.y.) Food Waste prevention calculator
TYPE C DATA: INNOVATION ACTION		
Development and Maintenance of the app	Method: Estimation by authors Proxy data: Type of device: laptop App development: 3000 h App maintenance: 2408 h Operating life time of the app: 5 years Average yearly No of app users: 1000	Laptop: 30-150 Wh EU Electricity-Mix: 295 g CO ₂ /kWh 8.85-44.25 (average 26.55) g CO ₂ /hour
Operation of the user device	Method: Estimation by authors Proxy data: Type of device: smartphone Operating of the app per electronic device: (Baseline), Variants: 2, 5 and 10 min/day (HIGH), 2 min/day (LOW)	Cordella et al. (2021) (16,36 kg CO ₂ -eq./year can be attributed to raw material and parts, device assembly, distribution, use and recycling of smartphones)
Operation of the data centre	Calculated from the total smartphone screen time	Cordella et al. (2021) (26,4 kg CO ₂ -eq./year can be attributed to communication networks)

3 ERGEBNISSE

Abb. 2 veranschaulicht die Ergebnisse der Folgenabschätzung für die Aktion zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen in Haushalten („Prevention Action Szenario“), bei der es sich um eine App für die Verwaltung von Lebensmitteln zu Hause handelt. In diesem Fall ist die Wirkungskategorie Klimawandel als Beispiel dargestellt. Das Szenario ohne Maßnahmen führt zu einer Gesamtmenge von 3,86 kg CO₂ Äquivalente (CO₂e) pro kg Lebensmittel, die nicht verschwendet werden. Das Szenario mit Vermeidungsmaßnahmen führt zu Einsparungen von insgesamt -3,15 CO₂e pro kg vermiedener Lebensmittelabfälle. Die Auswirkungen der Lebensmittelverschwendung bzw. der Vermeidung von Lebensmittelabfällen haben in allen Szenarien die größten Auswirkungen. Der Betrieb des Nutzergeräts, auf dem die App läuft, sowie der Betrieb des Rechenzentrums einschließlich aller Kommunikationsdienste und -netze hat nur einen geringen Beitrag (0,3 bis 1,2 kg CO₂e pro kg vermiedene Lebensmittelabfälle), außer im letzten Szenario. Wenn die Haushalte, die die App nutzen, eine Abfallreduzierung von nur 5 % erreichen, werden die Umwelteinsparungen, die durch die Lebensmittelabfallvermeidung erzielt werden, deutlich verringert bzw. fast

ausgeglichen. Die Auswirkungen der App-Entwicklung und – Wartung sind aber- zumindest unter den Annahmen der Autoren – nur von geringem Beitrag (weniger als 0,1 kg CO₂e pro kg vermiedene Lebensmittelabfälle). Reale Daten zur Dauer der App-Nutzung und Abfalleinsparpotenzial werden noch im Laufe des Projekts erhoben.

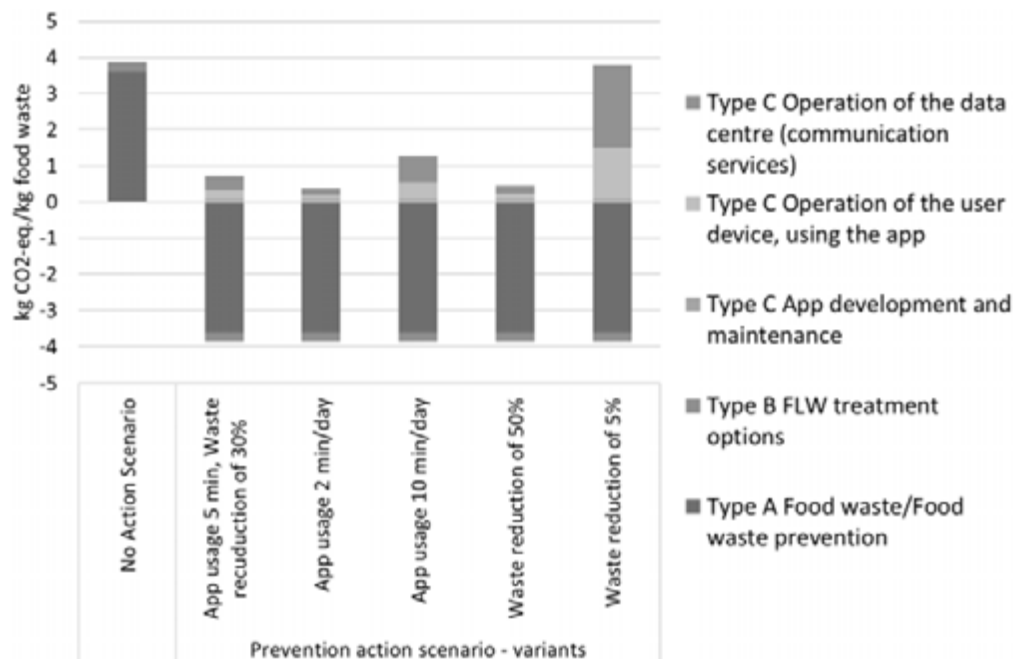


Abb. 2: Ergebnisse der Auswirkungen der Aktion zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen in Haushalten durch den Einsatz einer App für die Verwaltung von Lebensmitteln zu Hause – Wirkungskategorie: Klimawandel

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Diese Ökobilanz unter vereinfachten Annahmen zeigt einen schnellen Überblick über die Einflussparameter der Bewertung der Vermeidung von Lebensmittelabfällen durch den Einsatz digitaler Werkzeuge. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Auswirkungen digitaler Tools – zumindest wenn man den Klimawandel als Wirkungskategorie betrachtet – die Wirkung der Lebensmittelabfallvermeidung nicht unbedingt aufheben müssen. Voraussetzung ist jedoch, dass die Wirksamkeit der Maßnahme verbessert werden kann (Abfallreduzierungspotenzial von mindestens 5%). Außerdem werden reale Daten, die während der Demonstrationsphase der Vermeidungsmaßnahme im Rahmen des LOWINFOOD-Projekts gesammelt werden, genauere Analysen ermöglichen, um die Ergebnisse detaillierter und mit mehr Wirkungskategorien zu interpretieren, so dass jegliche Verschiebungen der Umweltbelastungen (z.B. auf einen möglichen erhöhten Ressourcenverbrauch) vermieden werden können.

5 DANKSAGUNG

LOWINFOOD (www.lowinfood.eu) has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 101000439. The views and opinions expressed in this document are the sole responsibility of the author and do not necessarily reflect the views of the European Commission.

LITERATUR

- Caldeira, C., De Laurentiis, V., Sala, S. (2019) *Assessment of food waste prevention actions*, EUR 29901 EN. Retrieved from Luxembourg:
- Christensen, M.A., Bettencourt, L., Kaye, L., Moturu, S.T., Nguyen, K.T., Olgin, J.E., Marcus, G.M. (2016). *Direct Measurements of Smartphone Screen-Time: Relationships with Demographics and Sleep*. PLoS One, 11(11), e0165331. doi:10.1371/journal.pone.0165331
- Cordella, M., Alfieri, F., Sanfelix, J. (2021) *Reducing the carbon footprint of ICT products through material efficiency strategies: A life cycle analysis of smartphones*. Journal of Industrial Ecology, 25(2), 448-464. doi:10.1111/jiec.13119
- JRC (n.y.) *Food Waste Prevention Calculator*. Joint Research Centre. Accessible at https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/valeria/prevention_action_calculator.xlsm

Ist die europäische Abfallwirtschaft bereit für Biokunststoffabfälle?

N. Mhaddolkar¹ & A. Tischberger-Aldrian¹

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: European Bioplastics definiert Biokunststoffe als biobasiert und/oder biologisch abbaubar und unterteilt sie in drei Typen: biobasierte biologisch abbaubare Kunststoffe, biobasierte nicht biologisch abbaubare Kunststoffe und fossil basierte biologisch abbaubare Kunststoffe. Es wird davon ausgegangen, dass ihre Menge in Zukunft stetig anwachsen wird. Dafür ist es jedoch von entscheidender Bedeutung, ob die derzeitigen abfallwirtschaftlichen Systeme in Europa mit dieser neuen Art von Kunststoffabfällen umgehen und in welcher Art und Weise, das erfolgen kann. Die biobasierten, nicht biologisch abbaubaren Kunststoffe könnten im jeweiligen konventionellen Kunststoff-Recyclingstrom recycelt werden. Bei biologisch abbaubaren Kunststoffen hingegen ist das nicht so einfach, da sie als mögliche Verunreinigungen der konventionellen Kunststoffe angesehen werden. Auch bei kompostierbaren Biokunststoffen gibt in Bezug auf die Entsorgung erhebliche Bedenken.

1 FRAGESTELLUNG UND METHODIK

Biokunststoffe werden in drei Arten unterteilt (European Bioplastics 2020): biobasierte, biologisch abbaubare Kunststoffe (Gruppe 1), biobasierte, nicht biologisch abbaubare Kunststoffe (Gruppe 2) und fossil basierte, biologisch abbaubare Kunststoffe (Gruppe 3) und werden oft als umweltfreundlicher Ersatz für fossil basierte, nicht biologisch abbaubare Kunststoffe angesehen (Meeks et al. 2015), (Nandakumar et al. 2021). Sie machen derzeit etwa 1 % der gesamten weltweit produzierten Kunststoffe aus (European Bioplastics, 2020). Es wird jedoch erwartet, dass ihr Anteil in den kommenden Jahren stark ansteigen wird (Briassoulis et al. 2020), (European Bioplastics e.V. 2021). Biokunststoffe werden in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, insbesondere in der Verpackungsindustrie, der Automobilindustrie, der Landwirtschaft, der Gastronomie, der Elektronik, der Medizin und der Pharmazie (Ciriminna & Pagliaro 2020), (Moshood et al. 2022), (Rujnić-Sokele & Pilipović 2017), wobei der größte Anteil (ca. 48 %) auf Verpackungsanwendungen entfällt (European Bioplastics e.V. 2021). Daher ist es zwingend erforderlich zu verstehen, ob die Infrastruktur der bestehenden abfallwirtschaftlichen Systeme für die Handhabung eines möglichen Zustroms dieser neuen Art von Kunststoffen geeignet ist.

Zur Beantwortung der vorliegenden Fragestellung wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Basis dieser Recherche waren Papers, die definierte Schlagworte enthielten (z.B. Bioplastics, Recycling) und für den Review-Artikel wurden alle Papers inkludiert, die sich mit Biokunststoffen im Abfallbereich beschäftigen. Der vorliegende Artikel ist eine Zusammenfassung des Review-Artikels, der in einer Peer Review-Zeitschrift veröffentlicht werden soll.

2 WESENTLICHE ERKENNTNISSE

2.1 Biokunststoffe der Gruppen 2

Biobasierte, nicht biologisch abbaubare Kunststoffe sind teilweise oder vollständig biobasiert (European Bioplastics 2020). In Europa gibt es keine gemeinsame Vereinbarung über die Mindestanforderungen an den biobasierten Anteil. In Japan wird in der gesamten Branche ein Biomasseanteil von 25 % eingehalten (USDA Foreign Agricultural Service 2022). Laut USDA Bio-preferred Programme ist der Anteil an nachwachsenden Rohstoffen produktabhängig und beträgt zwischen 7 und 95 % (ASTM Standardization News 2016). Diese Gruppe an Biokunststoffen wird auch als sogenannte „Drop-in“-Kunststoffe bezeichnet (Meeks et al. 2015). Sie sind in ihren Eigenschaften chemisch und physikalisch identisch mit den jeweiligen herkömmlichen Kunststoffen (Meeks et al. 2015), (Nandakumar et al. 2021), (Niaounakis 2019). Daher können sie in der Leichtverpackungsfraction mitgesammelt und in den Sortieranlagen theoretisch über dieselbe Infrastruktur

aus dem Abfallstrom aussortiert werden. Die Gruppe 2 der Biokunststoffe wird auch von den Recyclern akzeptiert. Das bedeutet in Folge, dass - wenngleich sie biobasiert sind - ihr Recycling von der verfügbaren Infrastruktur der Abfallwirtschaft abhängt (Niaounakis 2019), (Rahman & Bhoi 2021). Wenn sie jedoch ordnungsgemäß recycelt werden, führen sie zu einer Verringerung des Kohlenstoff-Fußabdrucks (Lamberti et al. 2021). Da sie die gleiche Struktur wie herkömmliche Kunststoffe haben, hängt ihr Umweltnutzen nur von ihrer ordnungsgemäßen Entsorgung ab (Niaounakis 2019).

2.2 Biokunststoffe der Gruppen 1 und 3

Für diese Gruppen gibt es aufgrund ihres geringen Volumens und ihrer unterschiedlichen Arten keinen eigenen Abfallstrom (Rahman & Bhoi 2021), (Sitaloppi & Jähi 2021). Idealerweise könnten sie mit der bestehenden Infrastruktur in Abfallbehandlungsanlagen aussortiert werden, was jedoch aufgrund ihres geringen Volumens wirtschaftlich nicht sinnvoll ist (Kabir et al. 2020), (Sustainable Biomaterials Collaborative 2007). Außerdem wird aufgrund ihres Einsatzes in Produkten und ihrer biologischen Abbaubarkeit die Kompostierung gefördert. Grundsätzlich ist jedoch zu beobachten, dass sie in der Praxis meist verbrannt werden (Lorber et al. 2015). Die anderen Recyclingoptionen sind zwar auf theoretischer Ebene machbar, werden aber auf industrieller Ebene noch nicht angewendet (Lamberti et al. 2021).

Biologisch abbaubare Kunststoffe im konventionellen Kunststoffstrom führen zu einer Verunreinigung der Recyclingströme, denn sie führen zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften und zu einem vorzeitigen Ausfall der Produkte (Moshood et al. 2022), (Shamsuddin et al. 2017). Åkesson et al. (Åkesson et al. 2021) kamen zu dem Schluss, dass die Erhöhung des Anteils von Polymilchsäure (PLA) und weichmachender Stärkemischungen im konventionellen Kunststoffstrom zu einer Verringerung der Dehnung von Polyethylen hoher Dichte (HDPE) bei einem Zusatz von 5 % führte, die Schlagzähigkeit wurde jedoch nicht wesentlich beeinträchtigt. Bei Polypropylen (PP) kam es zu einer signifikanten Verringerung der Schlagzähigkeit bei einem Zusatz von 1 % des Gemisches. Bei einem Zusatz von 5 % sank die Schlagzähigkeit jedoch auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes. Polyethylenterephthalat (PET) hingegen reagiert sehr empfindlich auf artfremde Zusätze und verlor den größten Teil seiner Schlagzähigkeit bereits bei einer Zugabe von 1 %. Diese Beispiele zeigen, dass eine akkurate Trennung der Biokunststoff-Gruppen 1 und 3 vom konventionellen Kunststoffstrom unbedingt erforderlich ist.

Grundsätzlich werden Biokunststoffe als umweltfreundliche Alternative zu konventionellen Kunststoffen angesehen (Nandakumar et al. 2021), (Pathak et al. 2014), wobei die biologische Abbaubarkeit die Hauptattraktion ist (Calabrò & Grosso 2018). Biologisch abbaubar ist jedoch nicht gleichzusetzen mit Kompostierbarkeit (Meeks et al. 2015), was zu der bestehenden Verwirrung beiträgt. Der Begriff Kompostierbarkeit ist auf europäischer Ebene klar über die verfügbaren Normen (z. B. EN 13432) definiert. Obwohl sich einige Länder oder Regionen bewusst für biologisch abbaubare Produkte in bestimmten Anwendungsbereichen (z.B. Bioabfall-Sammeltüten) entscheiden (Calabrò & Grosso 2018), (Kakadellis et al. 2021), gibt es immer noch erhebliche Bedenken hinsichtlich der Entsorgung der kompostierbaren Biokunststoffe.

3 FAZIT

Obwohl Biokunststoffe als umweltfreundliche Alternative zu konventionellen Kunststoffen angesehen werden, muss ihre Vereinbarkeit mit den bestehenden abfallwirtschaftlichen Entsorgungslösungen unbedingt gegeben sein. Während die biobasierten, nicht biologisch abbaubaren Kunststoffe im jeweiligen konventionellen Kunststoff-Recyclingstrom recycelt werden können, die biologisch abbaubaren Kunststoffe sind eher als Störstoffe sehen (z.B. Verunreinigungen für konventionelle Kunststoffrezyklate, Bedenken zur Kompostierbarkeit). Aus derzeitiger abfallwirtschaftlicher Sicht ist daher der derzeitige Einsatz von biologisch abbaubaren Kunststoffen zu überdenken bzw. wäre es sinnvoll, die Anwendung auf bestimmte Bereiche einzuschränken (z.B. landwirtschaftlich genutzte Folien). Bei steigender Anfallmenge der biologisch abbaubaren Kunststoffe ist die erforderliche abfallwirtschaftliche Infrastruktur auf jeden Fall anzupassen.

4 DANKSAGUNG

Das Projekt C-PlaNeT wurde von der Europäischen Union im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizont 2020 unter der Marie-Skłodowska-Curie-Vereinbarung Nr. 859885 gefördert.



LITERATUR

- Åkesson, D., Kuzhanthaivelu, G., & Bohlén, M. (2021). Effect of a Small Amount of Thermoplastic Starch Blend on the Mechanical Recycling of Conventional Plastics. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(3), 985–991. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01933-2>
- ASTM Standardization News. (2016). Biobased Labeling Connects in ASTM Certification. <https://sn.astm.org/?q=features/biobased-labeling-connects-astm-certification-mj11.html>
- Brassoulis, D., Pikasi, A., & Hiskakis, M. (2020). Recirculation potential of post-consumer /industrial bio-based plastics through mechanical recycling - Techno-economic sustainability criteria and indicators. *Polymer Degradation and Stability*, 109217. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109217>
- Calabrò, P. S., & Grosso, M. (2018). Bioplastics and waste management. *Waste Management* (New York, N.Y.), 78, 800–801. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.054>
- Ciriminna, R., & Pagliaro, M. (2020). Biodegradable and Compostable Plastics: A Critical Perspective on the Dawn of their Global Adoption. *ChemistryOpen*, 9(1), 8–13. <https://doi.org/10.1002/open.201900272>
- European Bioplastics. (2020). FREQUENTLY ASKED QUESTIONS ON BIOPLASTICS. European Bioplastics. https://docs.european-bioplastics.org/publications/EUBP_FAQ_on_bioplastics.pdf
- European Bioplastics e.V. (2021). Bioplastics market data. European Bioplastics. <https://www.european-bioplastics.org/market/>
- Kabir, E., Kaur, R., Lee, J., Kim, K.-H., & Kwon, E. E. (2020). Prospects of biopolymer technology as an alternative option for non-degradable plastics and sustainable management of plastic wastes. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120536. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120536>
- Kakadellis, S., Woods, J., & Harris, Z. M. (2021). Friend or foe: Stakeholder attitudes towards bio-degradable plastic packaging in food waste anaerobic digestion. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105529. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105529>
- Lamberti, F. M., Ingram, A., & Wood, J. (2021). Synergistic Dual Catalytic System and Kinetics for the Alcoholysis of Poly(Lactic Acid). *Processes*, 9(6), 921. <https://doi.org/10.3390/pr9060921>
- Lorber, K., Kreindl, G., Erdin, E., & Sarptaş, H. (2015). Waste Management Options for Biobased Polymeric Composites. In
- Meeks, D., Hottle, T., Bilec, M. M., & Landis, A. E. (2015). Compostable biopolymer use in the real world: Stakeholder interviews to better understand the motivations and realities of use and disposal in the US. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.022>
- Moshood, T. D., Nawani, G., Mahmud, F., Mohamad, F., Ahmad, M. H., & AbdulGhani, A. (2022). Biodegradable plastic applications towards sustainability: A recent innovations in the green product. *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100404. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100404>
- Nandakumar, A., Chuah, J.-A., & Sudesh, K. (2021). Bioplastics: A boon or bane? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147, 111237. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111237>
- Niaounakis, M. (2019). Recycling of biopolymers – The patent perspective. *European Polymer Journal*, 114, 464–475. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.02.027>
- Pathak, S., CLR Sneha, & Mathew, B. B. (2014). Bioplastics: its timeline based scenario & challenges. <http://pubs.sciepub.com/jpbpc/2/4/5/>. <https://doi.org/10.12691/jpbpc-2-4-5>
- Rahman, M. H., & Bhoi, P. R. (2021). An overview of non-biodegradable bioplastics. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126218. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126218>
- Rujnić-Sokele, M., & Pilipović, A. (2017). Challenges and opportunities of biodegradable plastics: A mini review. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 35(2), 132–140. <https://doi.org/10.1177/0734242X16683272>
- Shamsuddin, I., Jafar, J., Shawai, A., Yusuf, S., Lateefah, M., & Aminu, I. (2017). Bioplastics as Better Alternative to Petroplastics and Their Role in National Sustainability: A Review. *Advances in Bioscience and Bioengineering*, 5(4), 63. <https://doi.org/10.11648/j.abb.20170504.13>

- Siltaloppi, J., & Jähi, M. (2021). Toward a sustainable plastics value chain: Core conundrums and emerging solution mechanisms for a systemic transition. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128113>
- Sustainable Biomaterials Collaborative. (2007). Sustainable bioplastic guidelines (Version 7). <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.175.740&rep=rep1&type=pdf>
- USDA Foreign Agricultural Service. (2022). Japan: Introduction of Mandatory Plastic Bag Fee Creates Opportunities for Bioplastic. <https://www.fas.usda.gov/data/japan-introduction-mandatory-plastic-bag-fee-creates-opportunities-bioplastic>

Lebensmitteldrehscheibe: Weitergabe von Speisen aus der Außer-Haus-Verpflegung an soziale Einrichtungen

C. Pladerer¹ & D. Orth¹

¹⁾ Österreichisches Ökologie-Institut, Abteilung Ressourcenmanagement, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: In Österreich fallen jährlich 175.000 t Lebensmittelabfälle (Wien 35.000 t) in der Außer-Haus-Verpflegung wie Betriebskantinen, Restaurants und Caterings aufgrund von Planungsunsicherheiten und hohen Kundenansprüchen punkto Vielfalt und Verfügbarkeit an (Pladerer & Hietler 2015). Vor allem die Eventgastronomie steht hier vor großen Herausforderungen. Hauptziel des Projekts ist die Reduzierung der Menge an zu entsorgenden und zum Zeitpunkt der Entsorgung noch genießbaren Speisen, die durch Faktoren wie Fehlkalkulation und fluktuierende Gästezahlen in der Außer-Haus-Verpflegung anfallen. Durch die Weitergabe an soziale Einrichtungen werden ökonomische, ökologische und soziale Aspekte adressiert.

1 EINLEITUNG

In Betrieben der Außer-Haus-Verpflegung sollen die angebotenen Speisen allen Gästen in ausreichender Menge in Top-Qualität zur Verfügung stehen. Mit Hilfsmitteln wie einer rezeptbasierten Datenbank werden Mengen so kalkuliert, dass möglichst nicht zu wenig, aber auch nicht zu viel produziert wird. Wenn allerdings nicht alle Menschen, die sich zu einer Veranstaltung angekündigt haben, tatsächlich kommen, es Zeitverzögerungen bei einem Kongress gibt und die Pausen deshalb kürzer ausfallen oder die Gäste unmittelbar nach dem Vortrag das Event verlassen, bleibt regelmäßig Essen übrig. Ebenso in Verpflegungsbetrieben wie öffentlichen oder Betriebskantinen wo in großen Mengen gekocht wird, gibt es durch fluktuierende Gästezahlen ein Aufkommen an genießbaren Speisen und Lebensmitteln, die nicht im Betrieb verwertet werden können.

Eine Studie des Österreichischen Ökologie-Instituts im Auftrag der Wiener Umweltschutzabteilung ergab 2015, dass in Wien in der Außer-Haus-Verpflegung pro Jahr rund 35.000 t vermeidbare Lebensmittelabfälle anfallen. Durch Überproduktion, ineffiziente Lieferketten, und nicht zukunftsfähige Konsummuster wächst dieser Abfallstrom stetig (Canali et al. 2016). Die Kosten für den Einkauf und die Entsorgung dieser Lebensmittel belaufen sich auf rund 67,5 Mio. Euro pro Jahr (Pladerer & Hietler 2015; Pladerer & Hietler 2017).

Die Stadt Wien hat bereits vor einigen Jahren die Problematik der Lebensmittelverschwendung erkannt. Mittlerweile wurden zahlreiche Projekte initiiert und umfangreiche Maßnahmen ins Wiener Abfallvermeidungsprogramm aufgenommen. Wesentlich ist dabei die Weiterleitung von Lebensmittelspenden an soziale Einrichtungen.

In Österreich wurde die Weitergabe von frischen oder verpackten, aber nicht verarbeiteten Lebensmitteln in den vergangenen Jahren bereits sehr erfolgreich etabliert. Die Weitergabe von zubereiteten Speisen aus der (Event-)Gastronomie und Außer-Haus-Verpflegung ist hingegen eine große Herausforderung für alle beteiligten Akteure. Das Potenzial ist groß, ebenso die Unsicherheit bezüglich der rechtlichen Situation („Darf ich das überhaupt?“) und der notwendigen Maßnahmen zur Einhaltung der hygienerechtlichen Bestimmungen („Was muss ich tun?“).

2 DAS PROJEKT

Dieser Thematik stellt sich seit 2019 das Team des Projekts „Lebensmitteldrehscheibe in Wien“ unter der Leitung des Österreichischen Ökologie-Instituts. Gemeinsam mit dem Arbeiter-Samariterbund-Österreich, impacts Cateringsolutions GmbH und Social Food Vienna wurde an der Entwicklung eines Dienstleistungskonzepts zur Weitergabe von Speisen aus der Außer-Haus-Verpflegung an soziale Einrichtungen gearbeitet. In Kooperation mit einem Referenten im Bereich Küchenhygiene der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien wurden Leitlinien zur sicheren und hygienischen Speisenweitergabe erarbeitet, die konkrete Hinweise für die praktische Abwicklung auf Seiten der abgebenden Betriebe sowie der abnehmenden Institutionen geben. In den Jahren 2021 und 2022 wurde die Lebensmitteldrehscheibe ausgeweitet und versucht eine möglichst effiziente Abhol- und Weitergabelogistik zu entwickeln. Die Kooperationen mit Betrieben werden stetig ausgeweitet und neue Spender*innen gewonnen.

Ziel der Lebensmitteldrehscheibe ist die Reduzierung der Menge an Lebensmitteln und Speisen, die zu entsorgen, aber noch genießbar sind, und die aufgrund von Fehlinformation, Überproduktion oder aus anderen Gründen bei Speiseausgaben, Buffets oder Caterings in Wien anfallen. Die Weitergabe erfolgt an soziale sowie sozio-ökonomische Einrichtungen in Wien und wurde in einer Testphase mit den Projektpartnern erfolgreich einem Praxistest unterzogen. Der Samariterbund holte von impacts 6.700 Portionen (rund 1.600 kg verzehrfertiger Speisen) ab, um diese an Menschen mit Unterstützungsbedarf weiterzugeben. Aufgrund der sehr gut etablierten Kooperation zwischen impacts und dem Samariterbund wurde die Zusammenarbeit nach Projektabschluss Ende Jänner 2020 weitergeführt, was eines der schönsten Ergebnisse darstellt. Damit können allein im Zuge dieses Projekts jährlich rund 2.000 kg Lebensmittel vor der Mülltonne gerettet und weit über 8.000 Portionen einwandfreier Speisen in sozialen Einrichtungen ausgegeben werden.



Abb. 1: Speisenabholung durch den Arbeiter-Samariter-Bund Wien © Arbeiter-Samariter-Bund Wien

Eine weitere Option der Speisenweitergabe – die Abholung von Speisen, die bei Veranstaltungen noch nicht ausgegeben wurden, konnte ebenfalls erfolgreich demonstriert werden. Für diese Variante konnten weitere Akteure aus der Veranstaltungsgastronomie zur Kooperation gewonnen und es konnten bei vier Abholungen rd. 1.500 Portionen (rd. 360 kg Speisen) gerettet werden. Jährliches Potential dieser erfolgreichen Kooperation des Samariterbunds sind rd. 6.000 weitere Portionen.

3 DIENSTLEISTUNGSKONZEPT

Die anfängliche Skepsis der Betriebe hinsichtlich Lebensmittelsicherheit und Qualitätserhalt nach Verlassen des eigenen Einflussbereichs konnte mit überzeugenden Maßnahmen zum Einhalten der hygienerechtlichen Anforderungen und praktischen Hinweisen zur Abwicklung der Weitergabe in Motivation zur weiteren Weitergabe umgewandelt werden. Neben der vorausgehenden Organisation und Koordinierung der Speisenweitergabe vor Ort stellt die Etablierung und Einhaltung eines neuen Qualitätskriteriums zum Erhalt der Speisenqualität bis über Veranstaltungs- bzw. ursprünglichem Verabreichungsende hinaus eine wichtige Maßnahme für eine erfolgreiche Umsetzung der Speisenweitergabe dar. Verschiedene Catering- und Verpflegungsbetriebe wurden zur Ausgestaltung des Konzeptes involviert. Wesentlicher Bestandteil des Dienstleistungskonzeptes sind die vier erarbeiteten Optionen zur Speisenweitergabe und empfohlene Maßnahmen zur Minimierung des Kontaminations- und damit Gesundheitsrisikos.

Das Dienstleistungskonzept stellt einen Rahmen für einen optimalen Ablauf der Speisenweitergabe dar und beinhaltet folgende Eckpfeiler:

- Leitfaden für eine hygienerechtliche Absicherung: Welche Maßnahmen sind nötig und geeignet? Was ist bei den einzelnen Speisegruppen zu beachten?
- Speisegruppen: Welche Speisen dürfen nicht weitergegeben werden? Welche Speisen dürfen unter bestimmten Bedingungen weitergegeben werden?
- Optionen zur Weitergabe: Welche Möglichkeiten sind praktikabel?
- Qualitätskriterien für einen optimalen Ablauf: Was ist – inklusive optimierter Logistik und Kommunikation – für eine sichere und erfolgreiche Weitergabe zu beachten?
- Vorlage für einen Rahmenvertrag und Beiblatt für Abholungen

Das Konzept soll eine Struktur für Betriebe und Großküchen geben, um die Kommunikation zwischen den Kooperationspartner*innen zu erleichtern und einen effizienten Ablauf zu fördern. Eine Weiterentwicklung der Inhalte des Dienstleistungskonzept und Erweiterung in ein Schulungskonzept für die Akteur*innen der Lebensmittelweitergabe ist im laufenden Projektteil geplant.

4 ERGEBNISSE

Folgende Ergebnisse liegen nach Abschluss des Ersten Projektteils vor:

- Kenntnis über das Potential an Lebensmitteln und Speisen, die für die Weitergabe geeignet sind - Reduktion der Menge an zu entsorgenden Speisen und Lebensmitteln von ausgewählten Kooperationsbetrieben durch Abnahme des Samariterbundes und Weitergabe an bedürftige Menschen und gemeinnützige Organisationen: Abholung von insgesamt rund 8.200 Portionen, das sind rund 1.960 kg verzehrfertiger Speisen vom Samariterbund und Ausgabe an Menschen mit Unterstützungsbedarf.
- Dienstleistungskonzept für einen optimalen Ablauf und Handlungsanweisungen zu Logistik und Kommunikation inklusive Speisengruppen, Leitlinien zur sicheren und hygienischen Weitergabe und Qualitätskriterien zur erfolgreichen Weitergabe
- Ein funktionierendes Netzwerk an Akteuren (Caterer, Gastronomen, soziale Einrichtungen, gemeinnützige Organisationen) aus den Pilotanwendungen. Auslotung des Interesses und der Bereitschaft sich an der Lebensmitteldrehscheibe zu beteiligen und in Zukunft Speisen an soziale Einrichtungen weiterzugeben.

Die Ausweitung wird im laufenden Nachfolgeprojekt durchgeführt, in dem ein Netzwerk an Wiener Akteuren inklusive Basisinfrastruktur zur Abwicklung etabliert werden soll. Zudem

sollen verschiedene Finanzierungsmöglichkeiten entwickelt und das Potenzial an Speisen, die sich zur Weitergabe und zum Verzehr eignen, weiter ausgeschöpft werden.

LITERATUR

- Canali, M., Amani, P., Aramyan, L., Gheoldus, M., Moates, G., Östergren, K., Vittuari, M. (2016) Food waste drivers in Europe, from identification to possible interventions. *Sustainability*, 9(1), 37.
- Pladerer, C., Hietler, P. (2015) Lebensmittelabfälle in der Wiener Gastronomie. Wien, Österreich. Abrufbar unter: https://ecology.at/files/bericht_studie_lebensmittelabfaelle_in_der_wiener_gastronomie_2015_04_23.pdf; Zugriff: 08.07.2022
- Pladerer, C., Hietler, P. (2017) Abfallvermeidung in der österreichischen Lebensmittelproduktion. Österreichisches Ökologie-Institut, Wien, Österreich. Abrufbar unter: http://www.ecology.at/files/pr886_6.Pdf; Zugriff: 08.07.2022

Papier oder Bioplastik? Gegenüberstellung zweier Vorsammelhilfen für biogene Abfälle

P.P.J. Demschar¹ & J. Adam¹

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Im Rahmen der Arbeit von Paul Demschar und Josef Adam wurden zwei Versuche durchgeführt. Eine häusliche Projektstudie zur Erhebung subjektiver Sichtweisen und daraus ein Vergleich von Vorsammelhilfen aus Papier und kompostierbarem Kunststoff aus Sicht der Konsumenten. Den zweiten Versuch stellte ein Verdunstungsversuch dar. Dieser lieferte objektive Werte darüber, bei welcher Vorsammelhilfe der größte Gewichtsverlust in Folge von Verdunstung auftritt. Zusätzlich wurde eine Marktrecherche durchgeführt, um das Angebot an Vorsammelhilfen für biogene Abfälle im lokalen Handel abzubilden und die Preisstruktur der verschiedenen Bioabfallsäcke herauszuarbeiten.

1 MARKTRECHERCHE

Für die Marktrecherche wurden im Juni 2021 in Leoben 8 Supermärkte besucht, um das Angebot an Säcken für die Sammlung von Bioabfällen zu erfassen. Ein Hauptaugenmerk lag auf kompostierbaren Kunststoff- und Papiersäcken. Um einen belastbaren Preisvergleich anstellen zu können, wurden auch Beutel aus konventionellem Kunststoff in den Vergleich miteinbezogen. Das Angebot an biologisch abbaubaren Vorsammelhilfen im besuchten Einzelhandel präsentierte sich als sehr unterschiedlich. Während jeder der 8 besuchten Supermärkte nach ÖNORM EN 13432 zertifizierte Biomüllbeutel aus kompostierbarem Kunststoff im Sortiment hatte, boten nur drei davon zusätzlich Beutel aus Papier an. Die Volumina der Säcke reichten von 10 Liter (l) bis 120 l und die Preise von 0,12 € bis 0,30 € pro Stück. Die Verfügbarkeit an Abfallsäcken aus Bio-Kunststoffen war höher als jene von Papiersäcken. Die Stückpreise betrachtet ergab sich, dass die konventionellen Kunststoffsäcke deutlich am billigsten waren, gefolgt von den Papiersäcken. Die abbaubaren Kunststoffsäcke waren in allen besuchten Geschäften die Teuersten. Um einen belastbaren Preisvergleich anzustellen, wurde der Preis aller Vorsammelhilfen auf 1 l Füllvolumen heruntergerechnet. Dabei ergaben sich für konventionelle Kunststoffsäcke Kosten von 0,001 €/l, für Papiersäcke 0,017 €/l und für abbaubare Kunststoffsäcke 0,018 €/l (Demschar 2021).

2 HÄUSLICHE PROJEKTSTUDIE

2.1 Zielsetzung und Konzeption

In einem vierwöchigen Versuch im Oktober und November 2021 wurde insgesamt 17 Haushalten im Raum Kapfenberg ein gelochter Vorsammelbehälter *Biomat Airbox* sowie jeweils eine ausreichende Menge an 8 l fassenden Papiersäcken und an 10 l fassenden abbaubaren Kunststoffsäcken zur Verfügung gestellt. Es ging darum, subjektive und möglichst unvoreingenommene Sichtweisen von Konsumenten einzufangen. Aus diesem Grund war die Versuchserklärung auf das Wesentliche beschränkt und enthielt lediglich die folgenden Anweisungen:

- Verwendung des bereitgestellten Vorsammelbehälters *Biomat AirBox* für einen Monat,
- Umstellung von Papier auf Bio-Kunststoffsäcke nach 2 Wochen,
- Sammlung der biogenen Abfälle aus dem eigenen Haushalt nach den normalen Gewohnheiten im bereitgestellten System,
- Ausfüllen und Retournieren des bereitgestellten Fragebogens nach Ablauf der Versuchslaufzeit.

Ziel dieser häuslichen Projektstudie war es, neben einer reinen Bedarfserhebung, Fragen zu den Gründen für den Wechsel eines Sackes, zu Handling, Füllvolumen und Reißfestigkeit zu beantworten. Diese Ergebnisse wurden im Zuge der Versuchsauswertung in Abhängigkeit der Anzahl der in den jeweiligen Haushalten lebenden Personen gestellt (Demschar 2021).

2.2 Ergebnisse

Der Verbrauch pro Kopf an Papiersäcken unterscheidet sich nicht signifikant von jenem an abbaubaren Kunststoffsäcken. Ein Durchschnittswert über alle Teilnehmer des Versuches ergibt einen Verbrauch an Papiersäcken von 0,70 Stück pro Kopf und Woche und einen Verbrauch an abbaubaren Kunststoffsäcken von 0,69 Stück pro Kopf und Woche (Demschar 2021).

Es wurden auch die Motive für den Wechsel der Vorsammelhilfe im Vorsammelbehälter abgefragt. Dabei gaben bei den Papiersäcken 53 % der Befragten (9 Haushalte) und bei den abbaubaren Kunststoffsäcken 47 % (8 Haushalte) an, dass diese gewechselt wurden, weil sie voll waren. Die Größe beider Vorsammelhilfen für die häusliche Sammelaufgabe stellte sich als ausreichend heraus. Bei den übrigen Wechselmotiven, wie dem Auftreten einer unangenehmen Geruchsbelästigung oder der Befürchtung, die Säcke könnten bei vollständiger Befüllung reißen, kam es zu keinen Häufungen (Demschar 2021).

Als entscheidender Parameter für die Wahl einer Vorsammelhilfe stellten sich Reißfestigkeit und Dichtheit heraus. Kommt es beim Herausnehmen einer Vorsammelhilfe aus dem Vorsammelbehälter zu einem Flüssigkeitsaustritt aus dem Sack oder zu einem Durchbruch des Bodens, ist die Funktionsfähigkeit einer Vorsammelhilfe nicht mehr gegeben. Die Abfrage der Reißfestigkeit erfolgte im Schulnotensystem, wobei „1“ eine ausreichende Reißfestigkeit zum Ausdruck brachte und ein mit „5“ bewerteter Sack als unzureichend reißfest galt. Es schnitten beide Produkte ähnlich gut ab. Der Papiersack erhielt eine Bewertung von 1,12 und lag damit sogar noch vor dem abbaubaren Kunststoffsack. Dieser schnitt mit 1,29 ab. Es kam bei keinem Probanden zu einem Riss bzw. Durchbruch eines Sackes (Demschar 2021).

Die Problematik des Flüssigkeitsaustritts aus den Säcken betreffend hat sich gezeigt, dass der Papiersack sehr gut abschnitt und nur ein Proband (5,88 %) leichte Probleme mit Flüssigkeitsaustritt beim Transport des Sackes in die Biomülltonne hatte. Der abbaubare Kunststoffsack hingegen verursachte in 7 von 17 Fällen (41,78 %) Probleme. Es kam bereits bei der Vorsammlung in den Haushalten zum Flüssigkeitsaustritt und zu Pfützenbildung in den Vorsammelbehältern. Die abbaubaren Kunststoffsäcke wurden von den Probanden entsprechend schlechter bewertet (Demschar 2021).

3 VERDUNSTUNGSLEISTUNG

3.1 Zielsetzung und Konzeption

Ziel dieser Versuche war zu ermitteln, inwieweit der Gewichtsverlust infolge Verdunstung des im Bioabfall gebundenen Wassers von der Art der verwendeten Vorsammelhilfe abhängt.

Es wurden dazu 5 parallele Versuche durchgeführt (vgl. Abbildung 1). Der Versuchszeitraum betrug jeweils drei Tage, also 72 Stunden. Sowohl Papier- als auch biologisch abbaubare Kunststoffsäcke wurden in offenen bzw. gelochten und geschlossenen Vorsammelbehältern dem Test unterzogen. Der verwendete Bioabfallsack aus Papier ist ein Modell das als freistehend angeboten wird. Deshalb wurde dieser auch ohne Vorsammelbehälter untersucht. Als Versuchsmaterial dienten Biertreber, die als Rückstand im Bierbrauprozess anfallen. Diese wurden vor der Versuchsdurchführung einer Trockensubstanzmessung unterzogen und es zeigte sich, dass das Material im Feuchtegehalt für kommunalen Bio-Abfall repräsentativ ist (Barth 2016).



Abb. 1: Der gesamte Versuchsaufbau im Überblick (Demschar 2021)

Ein Versuch in einem offenen Kübel ohne Beutel wurde ebenfalls durchgeführt, da ein solcher im Umleerverfahren häufig zur Sammlung von biogenen Abfällen im Haushalt eingesetzt wird. Der 5. Parallelversuch wurde als Placebo-Versuch in einem luftdicht abgeschlossenen Eimer durchgeführt. Dabei war aufgrund der Tatsache, dass keine Luft Zutreten kann und sich somit keine Verdunstung einstellt, mit keinem Gewichtsverlust zu rechnen. Eventuelle Gewichtsveränderungen dabei hätten im Zuge der Auswertung bei allen Proben berücksichtigt werden müssen (Demschar 2021).

3.2 Ergebnisse

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Verdunstungsversuche grafisch dargestellt.

Die Verdunstungsleistungen der verschiedenen Vorsammelhilfen und Vorsammelbehälter unterscheiden sich stark. Es ist aus dem Verdunstungsversuch klar hervorgegangen, dass der Einsatz von Vorsammelhilfen in Kombination mit einem teilweise offenen bzw. Luftzirkulation zulassenden Vorsammelbehälter die Verdunstungsleistung positiv beeinflusst. In diesem Fall ist dann auch ein Vergleich zwischen den Vorsammelhilfen aus Papier und abbaubarem Kunststoff möglich. Der Placebo-Versuch bestätigte, dass es unter Luftabschluss zu keiner Verdunstung kommt. Obwohl der geschlossene Vorsammelbehälter *Sulo BioBoy* im Bereich des Deckels Undichtheiten aufweist, hielt sich die Verdunstung sehr in Grenzen. Es kam bei diesem Behälter zwar zu starker Bildung von Kondenswasser, ein signifikanter Gewichtsverlust ergab sich daraus aber nicht. Während bei allen offenen Vorsammelhilfen ein deutlicher Gewichtsverlust festgestellt werden konnte, war dies bei den geschlossenen Vorsammelbehältern nicht der Fall. Die folgenden Ausführungen beziehen sich aus diesem Grund nur mehr auf die Versuche mit dem gelochten Vorsammelbehälter *Biomat AirBox* (Demschar 2021).

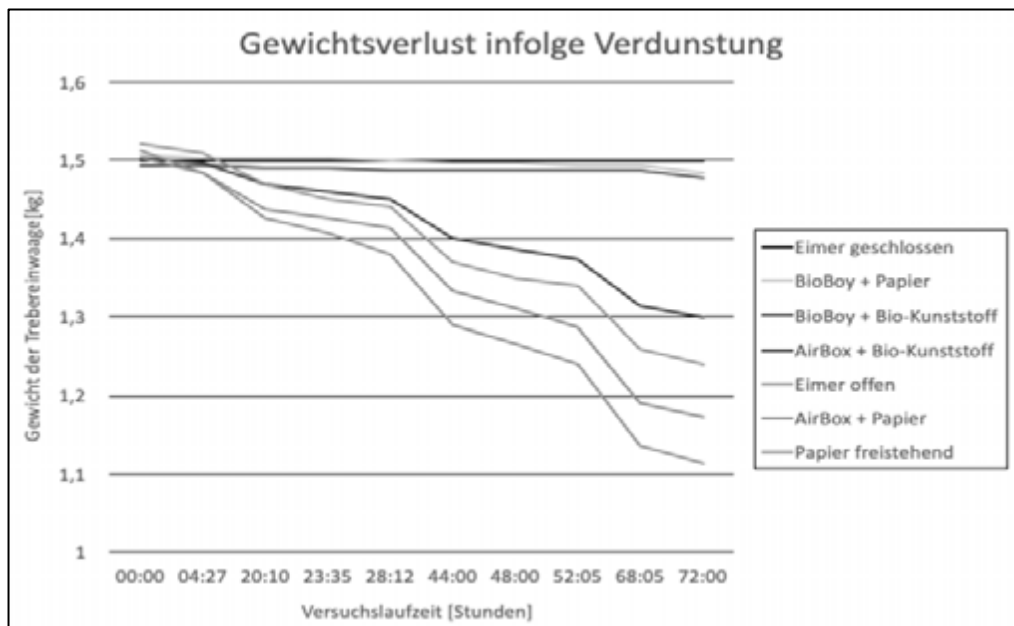


Abb. 2: Gewichtsverlust infolge Verdunstung über die gesamte Versuchslaufzeit hinweg (Demschar 2021)

Wird die Ebene der Vorsammelhilfen in Kombination mit offenen bzw. gelochten Vorsammelbehältern separat betrachtet, schneidet der Papiersack besser ab. Einem prozentuellen Gewichtsverlust von 17,90 % binnen 72:00 Stunden stehen beim abbaubaren Kunststoffsack unter identen Bedingungen 11,15 % entgegen. Der Unterschied von 6,75 % mag auf den ersten Blick zwar marginal klingen, ergibt bei der Aufrechnung auf die jährliche Bioabfallmenge in großen Sammelbezirken aber beträchtliche Gewichtseinsparungen (Demschar 2021).

Die Möglichkeit, die Papiersäcke auch freistehend zu verwenden, ist ein weiterer großer Vorteil dieser Produkte. In diesem Fall ist sogar eine Verdunstungsleistung von 26,09 % möglich, was den höchsten Wert der gesamten Versuchsreihe darstellt. Weiters als für die häusliche Sammlung von biogenen Abfällen im Umleerverfahren sehr gut geeignet, hat sich die Verwendung von offenen Haushaltseimern erwiesen (Krieger 2018). Dabei kann ein Gewichtsverlust von 15,82 % erreicht werden und es besteht kein Bedarf an Einweg-Vorsammelhilfen (Demschar 2021).

LITERATUR

- Barth, M. (2016). Charakterisierung von Abfällen aus dem Handelsketenbereich. 93. (M. L. Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Hrsg.)
- Demschar, P. (Jänner 2021). Papier oder Bioplastik? *Gegenüberstellung zweier Vorsammelhilfen für biogene Abfälle*. (M. L. Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Hrsg.) Leoben.
- Krieger, W. (15. Februar 2018). *Gabler Wirtschaftslexikon*. (S.-G. Verlag, Produzent) Abgerufen am 28. Juni 2021 von Definition: Sammel- und Trennverfahren : <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/sammel-und-trennverfahren-43269/version-266600>

Wieviel Recycling steckt in einer Tonne Zement?

M.J. Enengel¹, S.A. Viczek¹ & R. Sarc¹

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Abfälle und industrielle Nebenprodukte werden in zunehmendem Maße bei der Herstellung von Zementklinker eingesetzt, da sie sowohl als sekundäre Brennstoffe, als auch als alternative Rohstoffquelle verwendet werden. Zu letzteren gehören Sekundärrohstoffe, die als Teil des Rohmehls in den Klinkerbrennprozess gelangen und sekundäre Zumahlstoffe, die dem Klinker für die Zementherstellung zugesetzt werden. Der Hauptzweck der Sekundärrohstoffe besteht darin, die chemischen Verbindungen zu liefern, die für die Herstellung von Zementklinker erforderlich sind, d.h. CaO , SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 . Diese chemischen Verbindungen sind auch die Hauptbestandteile der Asche aus der Verbrennung von Siedlungsabfällen (Viczek, 2020). Daher werden Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie aus technischer Sicht nicht nur thermisch, sondern auch stofflich verwertet, da die Asche in das Produkt, den Zementklinker, eingebunden wird. In der vorliegenden Arbeit wird eine Massenbilanz eines österreichischen Zementwerks erstellt, um zu ermitteln, wie viel des Zementklinkers und des fertigen Zements aus recyceltem Material besteht. Die Bilanz wird auf der Grundlage der Massen und chemischen Analysen der Input- und Outputströme erstellt. Es wird gezeigt, dass eine Tonne Zement aus 322 kg sekundären Materialien besteht.

1 EINLEITUNG

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, welches in Kombination mit Wasser infolge einer chemischen Reaktion selbstständig erhärtet und raumbeständig bleibt. Daher ist Zement ein essentieller Bestandteil von Mörtel und Beton, da er die dauerhafte Bindung zwischen natürlichen oder künstlichen Zuschlagsstoffen zu einem festen Baumaterial ermöglicht (Locher 2000). Beton ist nach Wasser das am zweithäufigsten verbrauchte Material der Welt und das am häufigsten verwendete Baumaterial, wobei Beton neben seinen hervorragenden bautechnischen Eigenschaften auch ökologische Nachteile mit sich bringt (Makul 2020). Einigen Schätzungen zufolge trägt die Zementindustrie mit bis zu 5 % zu den gesamten weltweiten CO_2 Emissionen bei (Gartner 2004). Somit ist die Zementindustrie bemüht, ihren CO_2 Ausstoß zu verringern und die Zementproduktion nachhaltiger zu gestalten. Folglich hat die Zementindustrie begonnen, neben den herkömmlichen Primärressourcen wie Kalkstein, Ton, Eisenerzen und Primärbrennstoffen zunehmend sekundäre Rohstoffquellen wie industrielle Nebenprodukte oder Abfälle zu nutzen. Diese Nebenprodukte oder Abfälle können in verschiedenen Bereichen (Abb.1) des Herstellungsprozesses zugegeben werden und ersetzen dort Rohstoffe aus primären Quellen.

Grundsätzlich können folgende drei Gruppen nach Anwendungsgebieten unterschieden werden:

- Sekundärrohstoffe, die dem Rohmehl vor dem Brennprozess beigemengt werden;
- Sekundärbrennstoffe, die zum Brennen des Klinkers eingesetzt werden;
- Sekundäre Zumahlstoffe, die dem gebrannten Klinker zugegeben werden, um die gewünschten Zementeigenschaften zu erzielen.

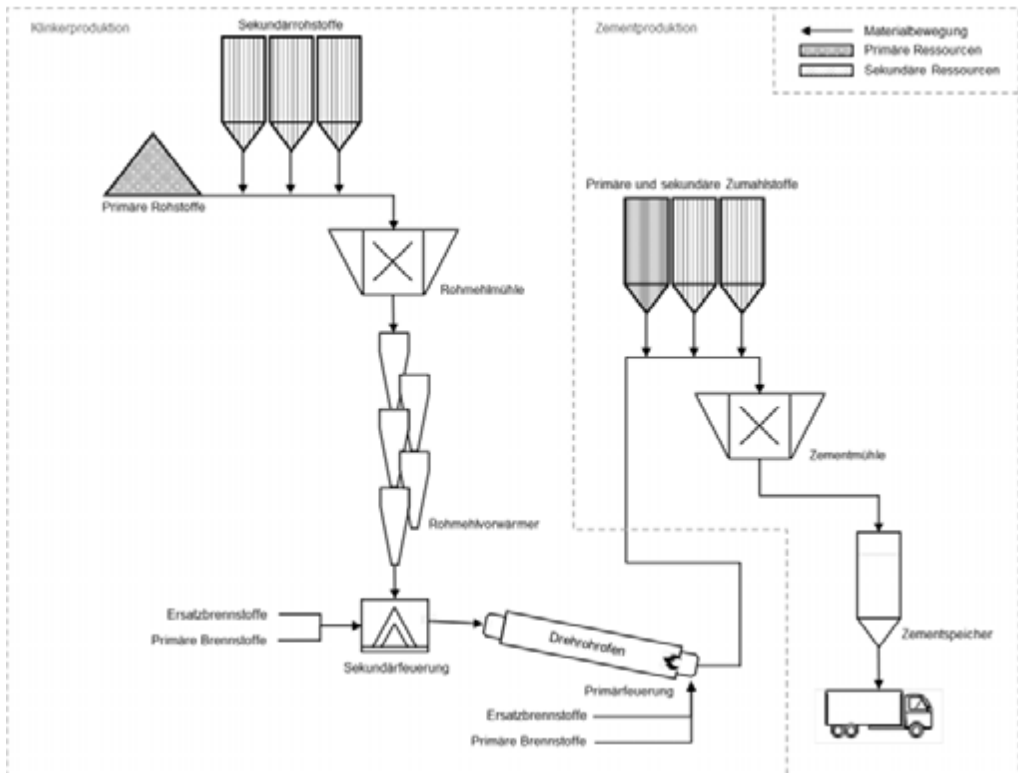


Abb. 1: Schematische Darstellung der Zementherstellung

Der Einsatz von Sekundärbrennstoffen und alternativen Rohstoffen in der österreichischen Zementindustrie von 1988 bis 2020 ist in Abb. 2 dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass sich der Einsatz von sekundären Rohstoffen über diesen Zeitraum fast verdreifacht hat. Es kann also davon ausgegangen werden, dass durch das Einbringen von Abfällen in den Zementherstellungsprozess und die Nutzung der in diesen Abfallströmen enthaltenen chemischen Komponenten ein gewisser Anteil des produzierten Zementklinkers bzw. Zements aus Recyclingmaterial besteht. Dieser Anteil an Recyclingmaterial in Zementklinker und Zement entspricht jedoch nicht vollständig den in Abb.2 angegebenen Daten, da die chemische Zusammensetzung der Materialien und Verluste im thermischen Prozess (z. B. CO_2 aus organischen Verbindungen oder Karbonaten) berücksichtigt werden müssen. Ziel dieser Arbeit ist es, anhand einer Massenbilanz der Input- und Output-Stoffströme und deren chemischen Analysen eines österreichischen Zementwerkes zu ermitteln, wie viel recyceltes Material, bezogen auf die für den Zement notwendigen Oxide, in einer Tonne Zementklinker bzw. einer Tonne Zement enthalten ist. Dabei werden alternative Rohstoffquellen im Allgemeinen betrachtet, ohne zwischen Abfall und Nebenprodukt zu unterscheiden.

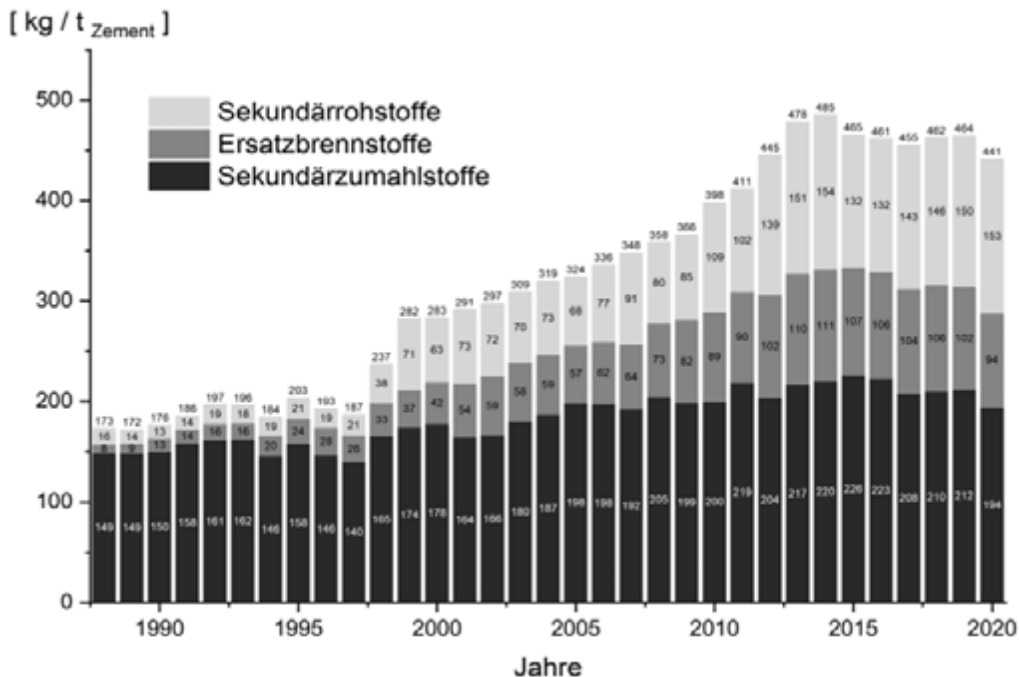


Abb. 2: Einsatz von sekundären Brennstoffen, Sekundärrohstoffen und sekundären Zumahlstoffen bezogen auf eine Tonne hergestellten Zement in der österreichischen Zementindustrie von 1988 bis 2020. Daten aus Hackl & Mausitz (1995, 1997, 2001, 2003, 2007, 2010) und Mausitz (2016, 2021)

2 METHODIK

Um zu ermitteln, wie viel Recyclingmaterial in einer Tonne Zement enthalten ist, wurde eine oxid-bezogene Massenbilanz eines gesamten Zementwerks unter Berücksichtigung der für die Zementklinkerherstellung relevanten Oxide SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O und SO_3 durchgeführt. Zur Erstellung der Massenbilanz dieser Oxide wurden die Daten der Massenströme und deren chemische Analysen für ganze Kalenderjahr 2019 verwendet. Um den Massenstrom der Oxide bestimmen zu können, wurde der Mittelwert aus den chemischen Analysen gebildet und mit den jeweiligen Massenströmen verrechnet. Zudem ist zu beachten, dass sämtliche Massen auf ihre Trockensubstanz bezogen wurden.

2.1 Chemische Analyse

Die Ergebnisse der chemischen Analysen aller Eingangsströme (Roh- und Brennstoffe) und des Zementklinkers sowie die emittierten CO_2 -Mengen wurden freundlicherweise vom Zementwerk zur Verfügung gestellt. Die Analysen umfassten den Wassergehalt, den Aschegehalt bei 950°C und die Elementaranalyse mittels XRF.

2.2 Massenbilanz

Zunächst wurden alle Input- und Outputströme, die für die Klinker- und Zementherstellung notwendig sind, erhoben und deren Massen an Trockensubstanz ermittelt.

Beginnend mit dem Klinkerbrennprozess wurde für alle relevanten Massenströme der Masseverlust mit Hilfe des jeweiligen Aschegehaltes bestimmt. Außerdem wurde die Gesamtmasse an Gas berechnet, welche durch die Verbrennung und Kalzinierung entstanden ist, mit der Annahme, dass dies dem Massenverlust aus diesen Prozessen entspricht. Darüber hinaus wurde die entstehende Masse an CO_2 beim Klinkerbrennprozess aus dem Masseverlust der eingesetzten Brennstoffe und dem Anteil an Ca und Mg in den Inputstoffen, mit der Annahme, dass diese hauptsächlich als Karbonate vorliegen dürften, berechnet.

Diese berechnete Menge an CO_2 wurde mit den zur Verfügung gestellten Informationen über den CO_2 -Ausstoß verglichen und es konnte eine gute Übereinstimmung (Abweichung: 2,75 %) ermittelt werden. Schließlich wurde eine Massenbilanz für die Zementherstellung relevanten Oxide (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O und SO_3) aufgestellt.

In einem zweiten Schritt wurde eine Massenbilanz für die Zementherstellung erstellt. Da die sekundären Zumahlstoffe nicht verbrannt, sondern mit dem Klinker vermischt werden, wurde die Trockenmasse anstelle des Aschegehalts berücksichtigt. Darüber hinaus berücksichtigt die Massenbilanz nicht nur Oxide, sondern auch die in den sekundären Zumahlstoffen vorhandenen anderen Verbindungen dieser Oxide. Da die chemische Analyse aufgrund ihrer Eigenschaften nur Oxidverbindungen der enthaltenen Elemente widerspiegelt, wurden bei jenen Massenströmen die darauf vermuten lassen, dass sie hauptsächlich aus Karbonaten bestehen (z.B.: Kalkstein), die jeweiligen Oxide um die Massen der Karbonate erweitert.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Bilanzierung der Massenströme über den Klinkerproduktionsprozess ergab eine Abweichung von 0,82 % zwischen Output- und Inputströmen. Bei der Bilanzierung der Massenströme mit den Oxiden zeigte die Berechnungen eine Abweichung von 5,60 %. Diese Abweichungen sind zum großen Teil auf die Elementschwankungen in der Zusammensetzung des Kalksteins zurückzuführen, der 73 % des Masseninputs für die Klinkerproduktion ausmacht. Die Gesamtmassenbilanz für die Zementherstellung ergab eine Abweichung der Output- zu den Inputmassen von 0,89 %, wobei bei den Oxiden eine Abweichung von 1,57 % berechnet wurde. Zusammengefasst erscheinen diese Abweichungen aufgrund der schwankenden Zusammensetzung der eingesetzten Stoffe plausibel und akzeptabel.

3.1 Der Beitrag der Ersatzbrennstoffe

Der Aschegehalt von Ersatzbrennstoffen, welche zum Großteil aus Sortierresten und kunststoffreichen Mischabfällen bestehen, liegt zwar in der Regel unter 20 %, aber die ausgewählten Aschebestandteile (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O und SO_3), die in den Zementklinker eingebracht werden, machen 1,65 % des Klinkers aus. Über den Gesamtprozess betrachtet, trägt die Asche der Ersatzbrennstoffe 1,13 % zu der Masse des Zementes bei. Das bedeutet, dass eine produzierte Tonne Zement durchschnittlich aus 11,3 kg Asche von Ersatzbrennstoffen besteht. (Vicze et al. 2020)

3.2 Der Beitrag der Sekundärrohstoffe

Aufgrund der größeren Mengen an Sekundärrohstoffen, die dem Prozess zugefügt werden und aufgrund des höheren Aschegehalts im Vergleich zu Ersatzbrennstoffen ist der Beitrag der Sekundärrohstoffe deutlich größer. Nach dem Klinkerbrennprozess machen die ausgewählten Oxide 11,56 % des Zementklinkers aus. Bezogen auf das Endprodukt stellen die von den Sekundärrohstoffen gelieferten Oxide etwa 7,96 % des hergestellten Zements dar. Dabei liefert Ziegelbruch den größten Anteil an verwertbaren Oxiden.

3.3 Der Beitrag der sekundären Zumahlstoffe

Da sekundäre Zumahlstoffe bereits latent-hydraulische Eigenschaften besitzen und somit nicht mehr einen thermischen Prozess unterzogen werden müssen, wird versucht sie in großen Mengen einzusetzen. So betrug der Anteil an sekundären Zumahlstoffen im betrachteten Zementwerk und Zeitraum 23,06 %. Die größten Anteile an den betrachteten Oxiden lieferten Schlacken und Flugaschen.

Das zusammengefasste Ergebnis wird in Abb.3 dargestellt. Alle eingesetzten sekundären Roh- und Brennstoffe ergaben einen prozentualen Anteil von 32,15 % im Zement. Diese setzen sich aus 7,96 % Sekundärrohstoffen im Rohmehl, 23,06 % sekundären Zumahlstoffen und 1,13 % aus den Aschen der Sekundärbrennstoffe zusammen. Somit kann festgestellt werden, dass in einer Tonne Zement 322 kg Material aus sekundären Quellen enthalten ist.

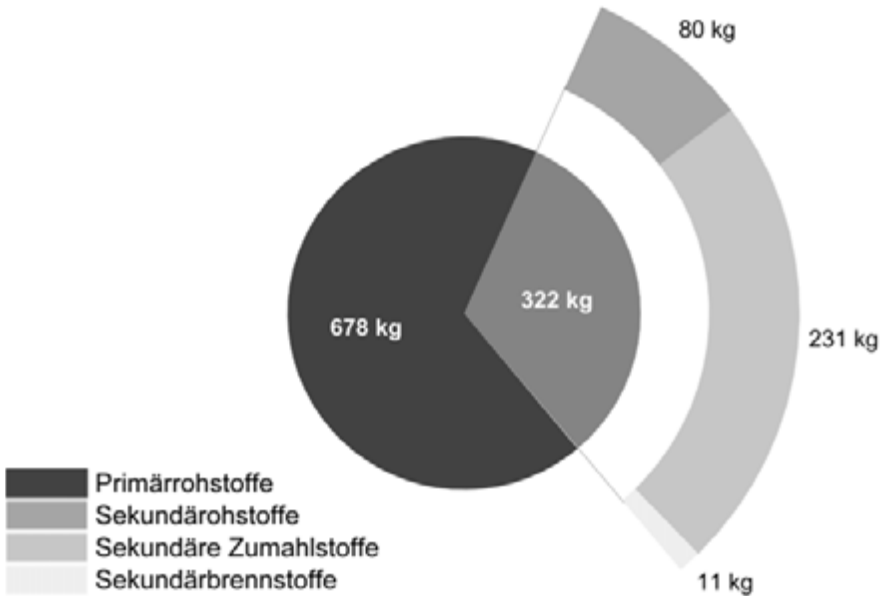


Abb. 3: Recyclinganteil in einer Tonne Zement

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In Anbetracht des zunehmenden Anteils alternativer Roh- und Brennstoffe aus dem Abfallbereich in Zementwerken kann die Zementindustrie einen wesentlichen Beitrag zum Ziel der Etablierung einer modernen Kreislaufwirtschaft leisten. Die Deponierung von anorganischen/mineralischen Abfällen kann vermieden werden, heterogene Siedlungs- und Gewerbeabfälle oder Sortierreste können energetisch und stofflich verwertet und somit Primärrohstoffe und Brennstoffe substituiert werden. Obwohl theoretisch 100 % des Zementklinkers oder Zements aus Recyclingmaterial bestehen könnten, ist die Erreichung dieses Prozentsatzes in der Praxis nur in bestimmten Fällen möglich, in denen geeignete Abfallstoffe, insbesondere Ca-reiche Abfälle, in der Region verfügbar sind.

LITERATUR

- Gartner, E. (2004) *Industrially Interesting Approaches to "Low-CO₂" Cements*. Cement and Concrete Research 34(9), 1489–1498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>.
- Hackl, A., Mauschwitz, G. (1995) *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie. 1988-1993*.
- Hackl, A., Mauschwitz, G. (1997) *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie. Jahresreihe 1994-1996*.
- Hackl, A., Mauschwitz, G. (2001) *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie: Jahresreihe 1997-1999*.
- Hackl, A., Mauschwitz, G. (2003) *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie: Jahresreihe 2000 - 2002*.
- Hackl, A., Mauschwitz, G. (2007) *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie: Jahresreihe 2003 - 2005*.
- Hackl, A., Mauschwitz, G. (2010) *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie: Berichtsjahr 2009*.
- Locher, F.W. (2000) *Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Düsseldorf: Bau+Technik.
- Makul, N. (2020) *Advanced smart concrete - a review of current progress, benefits and challenges*. Journal of Cleaner Production 274, 122899. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122899>.
- Mauschwitz, G. (2016) *Emissionen aus Anlagen der Österreichischen Zementindustrie: Berichtsjahr 2015*.
- Mauschwitz, G. (2021) *Emissionen aus Anlagen der Österreichischen Zementindustrie: Berichtsjahr 2020*.
- Viczek, S., Aldrian, A., Pomberger, R., Sarc, R. (2020) *Determination of the material-recyclable share of SRF during co-processing in the cement industry*. Resources, Conservation and Recycling 156, 104696. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104696>.

Entwicklung einer Bewertungsmethode zur eindeutigen Validierung der Maschinenleistung

T. Lasch¹, K. Khodier², C. Feyerer³, C. Ragginger² & R. Sarc²

¹ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Leoben, Österreich

² Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

³ Komtech GmbH, Produktmanagement und Marketing, Frohnleiten, Österreich

KURZFASSUNG: Gemischte Siedlungs-, und Gewerbeabfälle bringen aufgrund ihrer heterogenen Zusammensetzung und Korngröße große Herausforderungen in der Abfallbehandlung mit sich, mit denen die einzelnen Aggregate und die Abfallbehandlungsanlage als Ganzes umgehen müssen. Aufgrund der unterschiedlichen Bauarten und Einstellungen der Aggregate unterschiedlicher Herstellfirmen kommt es auch zu Unterschieden hinsichtlich ihrer Performance und hinsichtlich der Beschaffenheit des Materials, das von diesem Aggregat zum nächsten weiterbefördert wird. Besonders Vorzerkleinern, die meist die ersten Maschinen in mechanischen Aufbereitungsanlagen sind, kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da sich diese erste Prozessstufe aufgrund ihres Einflusses auf die Körnung und aufgrund ihrer Dosierwirkung stark auf die Effizienz nachgeschalteter Aggregate, wie z.B. Sieb, Windsichter, Sortierer etc. auswirkt. Die Beurteilung und der Vergleich ihrer Performance ist aber aufgrund von Einflüssen des Abfallmaterials herausfordernd. Eine Bewertungsmethode, die den Vergleich unterschiedlicher Einstellungen der Aggregate und auch einen Vergleich der Maschinen unterschiedlicher Herstellfirmen unter vergleichbaren Bedingungen ermöglicht, soll daher die Optimierung des Gesamtprozesses deutlich erleichtern. Im aktuellen Beitrag wird der Ansatz für die Entwicklung einer Bewertungsmethode für Vorzerkleinerer beschrieben, die in Zukunft auch auf Folgeaggregate ausgeweitet werden soll. Der Ansatz verfolgt das ambitionierte Ziel, durch die Einführung international anerkannter Prüf- und Bewertungsmethoden einen standardisierten Prozess und dadurch die Weiterentwicklung einer Smart Waste Factory zu ermöglichen.

1 EINLEITUNG

Ehrgeizige Recyclingziele von Siedlungs-, und Verpackungsabfällen sind Teil des Pakets zur Kreislaufwirtschaft der Europäischen Union (Sarc & Pomberger 2021). Dieses Bestreben bringt jedoch Herausforderungen mit sich, da es sich bei Siedlungsabfällen um heterogene Abfallströme handelt, welche in Zusammensetzung und Korngröße sehr variabel sind. Ein Lösungsansatz ist die Entwicklung international anerkannter Prüf- und Bewertungsmethoden zur eindeutigen Validierung der Maschinenleistung bis hin zur Einführung standardisierter Prozesse und der Errichtung einer Smart Waste Factory.

Die erste Maschine in mechanischen Aufbereitungsanlagen ist meist ein Vorzerkleinerer. Dieser erste Prozessschritt beeinflusst die Effizienz nachgeschalteter Aggregate, wie z.B. Sieb, Windsichter, stark, da er die Materialkörnung und den zeitaufgelösten Durchsatz definiert. Daher steht zu Beginn der Erstellung dieser Bewertungsmethode der Vorzerkleinerer im Fokus. Der Outputstrom dieser Maschine, somit der Stoffstrom, der weiter durch die mechanische Abfallbehandlungsanlagen befördert wird, ist in seiner Korngrößenverteilung, Durchsatzleistung und Gleichmäßigkeit stark abhängig vom jeweiligen Zerkleinerer und dessen Einstellungen (Schnittspalt, Drehzahl der Welle, Messer, ...). Die heterogene Zusammensetzung des Inputmaterials (gemischte Siedlungs- und Gewerbeabfälle) stellt eine große Herausforderung in der Vorhersage der Beschaffenheit des Outputstroms eines Vorzerkleinerers dar (Khodier et al. 2021). Deshalb sollen zur Erstellung einer Bewertungsmethode Materialien zum Einsatz kommen, welche unter anderem einfach aber trotzdem eindeutig beschreibbar und reproduzierbar sind, sowie international eingesetzt werden können und somit als „Standardmaterialien“ fungieren können. Da die Bewertungsmethode im Weiteren darauf abzielt, Vorzerkleinerer in ihrer Arbeit mit gemischten Abfällen zu beurteilen, müssen die Inputmaterialien so gewählt werden, dass sie in signifikanten Mengen im Abfall (gemischte Siedlungsabfälle oder Gewerbemüll) vorkommen. Das Erstellen einer solchen Methode verlangt ein klar strukturiertes Vorgehen, beginnend mit der Definition der

zum Einsatz kommenden Inputmaterialien, über die eingesetzten Maschinen, bis hin zur genauen Planung der Versuchsreihen und Validierung und Verifizierung dieser.

2 METHODIK

Die ersten Schritte zur Erstellung einer Bewertungsmethode wurden bereits vorgenommen. Die Vorgehensweise ist in Abb. 1 skizziert. Basierend auf einer breiten Literaturrecherche zu Bewertungsmethoden, Vorzerkleinerern und Abfallarten bzw. Abfallzusammensetzung wurden im Rahmen von Expert:innenworkshops Testmaterialien und Bewertungskriterien definiert. Die Voraussetzungen für relevante Materialien sind in Kapitel 2.1 beschrieben. Die Planung der Versuche beruht auf einer Versuchsreihe des vorhergehenden Projekts „ReWaste4.0“ (Khodier et al., 2021), die sich mit dem Einfluss unterschiedlicher Einstellungen auf die Vorzerkleinerung gemischter Gewerbeabfälle beschäftigte.

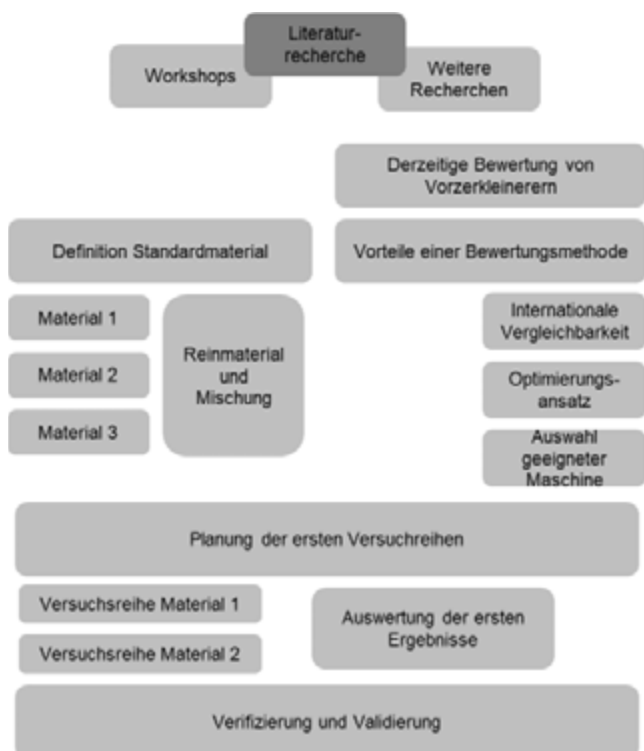


Abb. 1: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Erstellung einer Bewertungsmethode zur Validierung der Maschinenleistung eines Vorzerkleinerers

2.1 Definition Inputmaterial

Um die Bewertung einer Maschine, in diesem Fall eines Vorzerkleinerers, auf internationaler Ebene zu ermöglichen müssen Inputmaterialien definiert werden. Diese müssen vor allem weltweit ähnliche Eigenschaften aufweisen und – wenn möglich – kostengünstig in der Beschaffung sein. Im Weiteren soll es sich um Material handeln, welches auch ohnehin im gemischten Abfall in signifikanten Mengen vorkommt, um einen Zusammenhang zwischen dem zerkleinerten Standardmaterial und dem zerkleinerten realen Abfall herstellen zu können. In den ersten Tests wurden als Versuchsmaterialien Altholz und Altpapier verwendet. Es wurden drei Versuchsreihen unternommen, eine mit Altpapier, eine mit Altholz und eine mit einer Mischung der beiden Inputmaterialien.

2.2 Aufbau und Durchführung der Versuche

Der Versuchsaufbau orientiert sich an einer Versuchsreihe, die im Zuge des vorhergehenden Projekts – ReWaste4.0 – mit Gewerbemüll stattgefunden hat. Der Aufbau ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Einem Vorzerkleinerer wurde eine Maschine nachgeschaltet, welche Massen- und Volumenstrom erfasst (Multimeasure des Projektpartners Komptech GmbH). Diese hat außerdem ein schwenkbares Austragsband, welches die Probenahme erleichtert. Die Beschickung des Zerkleinerers muss möglichst kontinuierlich erfolgen, sodass es nicht zu Leerläufen kommt, was mit einem Radlader realisiert wurde. Die Menge an Inputmaterial (Masse und Volumen) wurde genau erfasst. Es wurde eine definierte Anzahl an Proben zu definierten Zeitpunkten am Ende der Prozesskette, durch Schwenken des Austragsband in einen BigBag genommen. Pro Material wurden die Versuche wiederholt durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt durch eine Sieb- und Sortieranalyse. Die Siebanalyse wurde mit Hilfe eines Trommelsiebs durchgeführt. Eine anschließende Sortieranalyse war notwendig, um einerseits Störstoffe auszusortieren (Nägel im Altholz, Kunststoffe im Papier) und andererseits die gemischten Proben, Altholz und Altpapier, voneinander zu trennen.

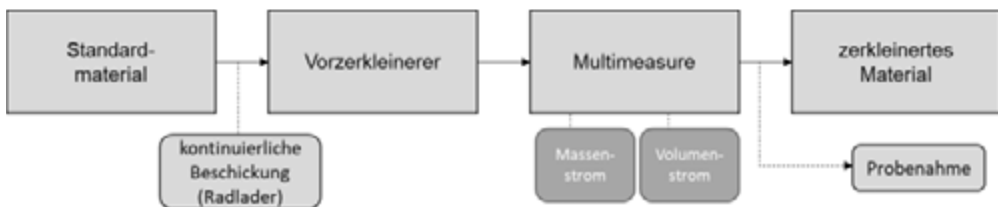


Abb. 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

2.3 Verifizierung und Validierung

Die bisherigen Versuche sollen den Grundstein zur Erstellung einer Bewertungsmethode für verschiedene Maschinen in der mechanischen Abfallaufbereitung legen. Durch weitere Versuche und Anwenden der Methode sollen die bisherigen Schritte verifiziert und validiert werden.

Unter einer Validierung wird die „Bestätigung einer Behauptung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderungen für einen spezifischen beabsichtigten zukünftigen Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind.“ verstanden. Die Verifizierung definiert sich wie folgt: „Bestätigung einer Behauptung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass festgelegte Anforderungen erfüllt worden sind.“ (DIN EN ISO/IEC 17029 2020)

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Aus den bereits durchgeführten Versuchsreihen wurde eine Vielzahl an Daten generiert (Daten aus Volumenstrom, Massenstrom oder die Korngrößenverteilung des Outputmaterials). Eine detaillierte Auswertung und Sichtung dieser erfolgt nun in den nächsten Monaten und soll bis zur Postervorstellung auf der Recy&Depotech 2022 schon genauere Erkenntnisse bringen.

Abb. 3 zeigt eine Darstellung der Ergebnisse aus der Sieb- und Sortieranalyse. Hier sind die Siebdurchgangskurven der drei Versuchsreihen (Altholz, Altpapier und Mischung aus Altholz und Altpapier) dargestellt. Diese Daten stammen aus den gemittelten Werten der jeweiligen Versuchsreihen eines Zerkleinerers. Die Abbildung stellt das Zerkleinerungsverhalten – im Sinne der erzeugten Korngrößen – der Mischfraktion vs. Reinfractionen dar. Es lassen sich vier Siebdurchgangskurven erkennen:

- Papier aus Reinfraction (aus der Fraktion Altpapier)
- Holz aus Reinfraction (aus der Fraktion Altholz),
- Papier aus Mix (aus der Mischfraktion Altholz und Altpapier) und
- Holz aus Mix (aus der Mischfraktion Altholz und Altpapier).

Das Diagramm zeigt, dass das Zerkleinerungsverhalten der beiden Altpapierfraktionen und Altholzfraktionen sich ähnlicher sind als Altpapier und Altholz. Ob und wie stark sich die Fraktionen

in der Mischung nun während des Zerkleinerungsverhaltens beeinflussen, müssen weitere Auswertungen zeigen.

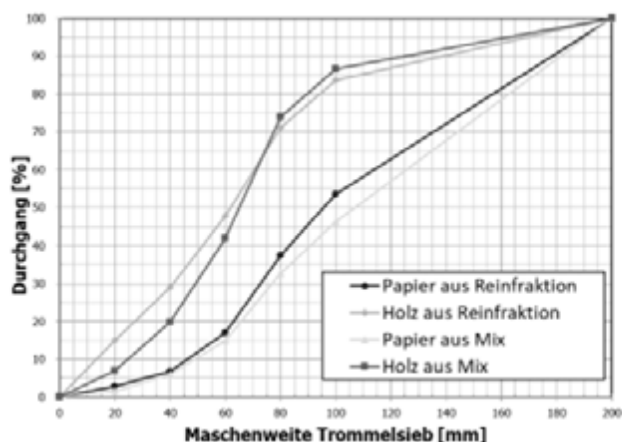


Abb. 3: Siebdurchgangskurven dreier Versuchsreihen (Versuchsreihe Altholz, Versuchsreihe Altpapier, Versuchsreihe Mix-Altholz-Altpapier)

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Entwicklung einer Bewertungsmethode zur eindeutigen Validierung der Maschinenleistung in der mechanischen Abfallbehandlung bedarf zunächst einer umfangreichen Literaturrecherche und Zusammenarbeit mit Expert:innen. Im Folgenden müssen gut geplante großtechnische Versuchsreihen durchgeführt werden. Die Entwicklung einer Methode für Vorzerkleinerer bringt eine intensive Auswertung und Analyse der Proben mit sich.

Eine Auswertung der Daten aus Sieb- und Sortieranalysen lässt erste Erkenntnisse gewinnen. Die Versuche müssen für die Validierung und Verifizierung wiederholt und noch mögliche Verbesserungen bzw. Anpassungen an die Methodik vorgenommen werden.

Zukünftig sollen Modelle Vorhersagen aus den ermittelten Standarddaten, den Daten aus den Zerkleinerten definierten Standardmaterial, auf das Zerkleinerungsverhalten von gemischten Abfällen treffen. Weitere Aggregate der mechanischen Abfallaufbereitung sollen Versuchen zur Bewertung und Entwicklung solcher Methoden unterzogen werden. Standardmaterialien dafür müssen noch definiert und sorgfältig ausgewählt werden. Schließlich in der mechanischen Abfallaufbereitung Maschinen (Zerkleinerer, Siebe, Windsichter, ...) miteinander verschalten und aus standardisierten Prozessen optimierte Abläufe definiert werden.

5 DANKSAGUNG

Das Kompetenzzentrum Recycling and Recovery of Waste for Future – ReWaste F – (882512) wird im Rahmen von COMET – Competence Centers for Excellent Technologies durch BMK, BMDW und Land Steiermark gefördert. Das Programm COMET wird durch die FFG abgewickelt.

LITERATUR

- DIN EN ISO/IEC 17029 (2020) Konformitätsbewertung – Allgemeine Grundsätze und Anforderungen an Validierungs- und Verifizierungsstellen (ISO/IEC 17029:2019); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17029:2019.
- Khodier, K., Feyerer, C., Möllnitz, S., Curtis, A., Sarc, R. (2021) Efficient derivation of significant results from mechanical processing experiments with mixed solid waste: Coarse-shredding of commercial waste. Waste Management, S. 164-174.
- Sarc, R., Pomberger, R. (2021) „ReWaste4.0“ – Abfallwirtschaftliches Kompetenzzentrum am AVAW der Montanuniversität Leoben. Leoben: Processes, 2021, 9 (5), 764. doi:<https://doi.org/10.3390/pr9050764>.

Fundamental drying experiments with processed residual municipal solid waste materials

J. Faitli¹, Z.N. Abdulfattah¹ & N. Yanar¹

¹⁾ University of Miskolc, Institute of Raw Material Preparation and Environmental Processing, Miskolc-Egyetemváros, Hungary

ABSTRACT: The EU's circular economy concept necessitates the increasing of the recycling ratio of municipal solid wastes. There are many existing mechanical – biological processing plants in Hungary for the preparation of residual municipal solid wastes (RMSW). The two most important products of these plants are the so called bio-fraction and the RDF (refuse derived fuel). Currently there are problems with both of these material streams in Hungary, namely most of the bio-fraction is still landfilled and the local thermal utilisation of the RDF is not solved yet. The high moisture content of the produced bio-fraction and RDF causes difficulties for the downstream operations; therefore drying of these materials has a recent engineering interest to improve. Authors have carried out a systematic drying experimental series where the effect of the material, material composition, mass (volume or surface) of material and particle size distribution on drying intensity were studied in a 1 m³ oven. The initial slope of the relative moisture loss as function of time was determined. Process engineering design methods of convective hot air drying can be further developed taking into account the research results.

1 INTRODUCTION AND LITERATURE SURVEY

Waste management companies and municipalities in southwestern Hungary aim the fulfillment of the EU's target, namely to decrease landfilling below 10 % and increase recycling above 65 % of municipal solid wastes. However selective collection is continuously improved there is still high amount of residual MSW is generated. A new mechanical RMSW processing plant (20 t/h) and an experimental RDF pyrolysis plant (200 kg/h) had been built (Faitli et al. 2020) and now extensive research is being carried out to solve the local utilization of the bio-fraction and the RDF. This is the reason why this fundamental drying research was necessary. Dryer classification and the selection of the best solid waste drying techniques vary significantly due to the vast range of waste to be dried and the inherent challenges of dealing with non-standardized systems. In general, biomass dryers may be categorized according to their heat transmission technique and the physical qualities of wet particles. The most regularly used dryers include packed mobile bed dryers, rotary dryers, air or flash dryers, conveyor belt dryers, and fluidized disc dryers. All of these dryers, including the convection conveyor belt drier, achieve effective drying; hot or warm air, vacuum, steam or hot or superheated flue gas might be used as the drying medium (Georgiopoulou & Lyberatos 2017, Verma et al. 2017). Bio drying (Tun & Juchelková 2019) is a waste-drying technique that combines natural and forced aeration with heat produced by the natural aerobic bioconversion of certain organic materials. The primary premise of this process is to use the internal energy generated by the breakdown of organic waste. In the case of convection drying, preheated air is passed to the material to be dried, so that the material and the drying medium are in direct contact with each other. The moisture content of the particulate material evaporates and it is transported to the environment by the again cooled air. A frequently designed convection dryer is the belt dryer, which can potentially be used to dry RMSW. According to the target moisture content a given mass of moisture (ΔW) has to be evaporated from the particulate matter. The necessary amount of working air is preheated in a calorifer. In this process the enthalpy (inner energy) of air is increases but the moisture content does not change, i.e. $x_0 = x_1$. When the preheated air meets the granular material the enthalpy is constant, i.e. $h_1 = h_2$. Fig. 1 illustrates these two processes on the psychrometric chart. The 0, 1 and 2 indexes mark the conditions of the working air. After theoretical considerations, we can write the material balance from which the required dry air mass (L) can be calculated (Equation 1

left). G_{SZ} is the mass of the dry matter of the material to be dried and y_1 and y_2 are the moisture mass ratios of the particulate material before and after the meeting with the warm air.

$$\Delta W = L \cdot (x_2 - x_1) = G_{SZ} \cdot (y_1 - y_2) \quad L' = L + W = L + x_0 \cdot L = L \cdot (1 + x_0) \quad (1)$$

Completely dry air is not available for industrial tasks, so it should be taken into account that only air with a moisture content of x_0 is available at a given location. Therefore, the real air demand (L') is the sum of the calculated dry air demand and the own humidity of the working air (Equation 1 right). In the convection drier, energy must be introduced in one place for drying, i.e. the wet air of mass L' in the calorifier must be heated with heat ΔQ . The required theoretical amount of heat is (Equation 2):

$$\Delta Q = L' \cdot (h_1 - h_0) \quad (2)$$

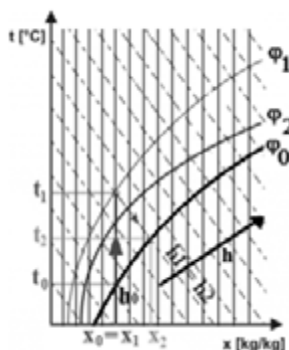


Fig. 1: Steps of convective drying on the psychrometric chart

2 MATERIALS AND METHODS

The bio-fraction (approx. 28 kg) and RDF (approx. 13 kg) samples required for the experiments were taken at the beginning of September 2021 at the RMSW processing plant in Búslakpuszta (Hungary). Prior to the start of the experimental work, the samples were sterilized with a short heat shock to reduce their infectivity and allow for laboratory work. Therefore, sub-split samples were placed in an oven preheated to 105 °C for 15 min (Figs. 2 and 3).



Fig. 2: Sub-split bio-fraction samples

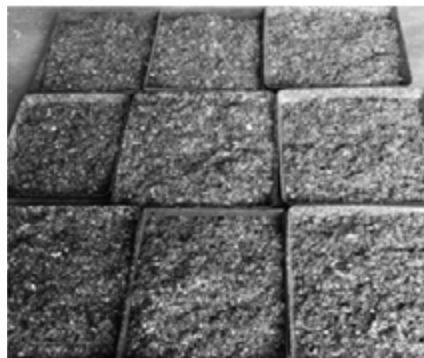


Fig. 3: Sub-split RDF samples

Some of the sterilized sub-split samples were hand sorted to remove metal, stone and glass particles. Two times 2 kg of bio-fraction samples were comminuted in a vertical shaft cutting mill using 20 mm and 30 mm opening size screens. Particle size distribution was measured by laboratory hand sieving; material composition was measured by hand sorting. Systematic drying

experiments were done in a 1 m³ volume oven with moderate air circulation. Tap water was used for calibration tests. The tested materials and their marking were as follows: RDF (RDF as received by the Institute after sterilization), BIO (bio-fraction as received by the Institute after sterilization), Sorted BIO (bio-fraction metal-stone-glass-depleted sorted residue), Sorted BIO-30mm (bio-fraction metal-stone-glass-depleted sorted residue after cutting milling with 30 mm screen), Sorted BIO-20mm (bio-fraction metal-stone-glass-depleted sorted residue after cutting milling with 20 mm screen). In addition some RDF and bio-fraction mixtures had also been tested. During the drying tests, a sample of the test substance with an initial weight of m_0 was placed in the oven. The initial sample contains both dry matter and moisture. The mass of the sample taken from the oven at a given time is m , so $m_0 - m$ is the mass loss, i.e. the mass of evaporated moisture. The mass of the effluent divided by the initial mass [$MC = (m_0 - m)/m_0$] gives the relative weight loss or instantaneous moisture content of the sample at a given time. If mass equilibrium is reached the so called ODMC (oven dried moisture content) is measured. Fig. 4 shows the instantaneous moisture content of different amounts of tap water samples dried in small and large bowls as a function of time.

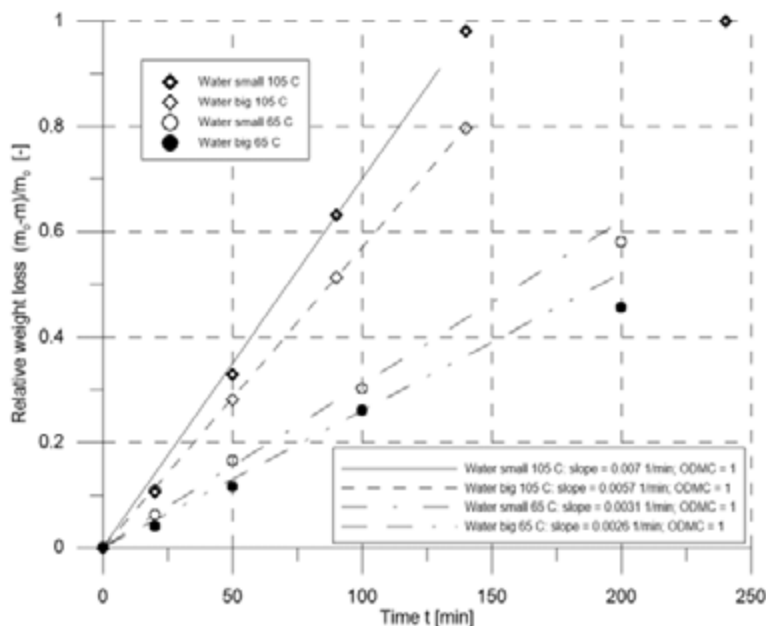


Fig. 4: Tap water relative weight loss - time curves for calibration

It is immediately apparent that at 105 °C the water placed in the smaller bowl was fully evaporated after 140 minutes. In the bigger bowl 190 minutes was necessary for this. It is also immediately apparent that there is still water left in both bowls after drying for 200 minutes at 65 °C, but the moisture content may be estimated by fitting a curve and estimate the steady state. Obviously from the measurement it can be stated that the moisture content of the measured tap water was ODMC=1, while the dry matter content was 0. Several functions were fitted to the instantaneous moisture content - time curves of the measured water. However, neither the exponential nor the tangent-hyperbolic function fitted well to the measured points. A theoretical drying phenomenon is likely to occur according to some theoretical function; however, the case under study is an empirical phenomenon that is strongly influenced by the characteristics of the oven. However, the measurements performed in the same way and in the same equipment can be compared with each other, and therefore the set goal can be examined. For comparability, two main characteristics were determined from each measurement. The first and second measured points were used to determine the initial slope of the instantaneous moisture content - time curves, which is the initial slope of the water loss. If the measured points stabilize over time, the moisture content (ODMC) can also be determined. If sub-splits of a given material are dried with

different parameters, the final result, i.e. the moisture content, should be the same. The second most important technological question after the necessary heat is the retention time in the drier, which is well characterized by the initial rate of water loss (slope) parameter. Fig. 3 shows the main drying characteristics of tap water samples drying. The developed simple methodology was used for the evaluation of the waste drying tests.

3 RESULTS AND DISCUSSION

Figs. 5 and 6 show the measured instantaneous moisture content - time curves of bio-fraction samples dried at 105 °C and 65 °C.

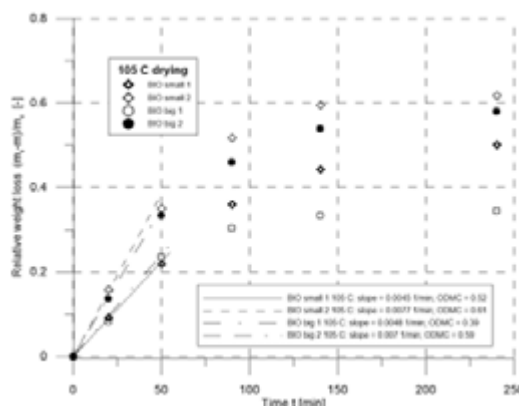


Fig. 5: Drying curves of bio-fraction at 105 °C

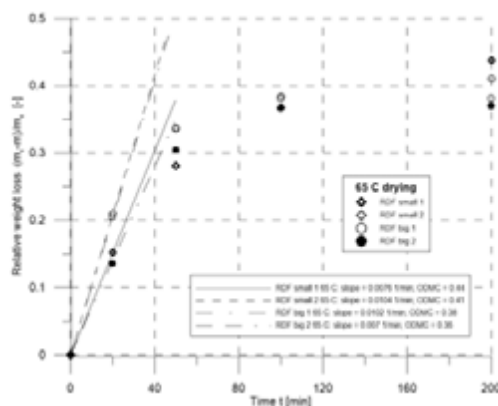


Fig. 6: Drying curves of bio-fraction at 65 °C

The evaluation of the measurements is complicated by the fact that the sensitivity of the measurements, i.e. the smallest difference that the measurement can distinguish, and the heterogeneity of the examined wastes are of comparable magnitude. For the bio-fraction measurements, the measured ODMC values range from 0.52 to 0.61 ODMC. It is considered that the average moisture content of the bio-fraction is approx. 0.57; however, the moisture content of individual samples weighing 60-110 grams is scatter. The average moisture content of RDF is approx. 0.38, the measurements are in the range of 0.34... 0.44. Taking all this into account, the effect of material quality and temperature on the initial drying can be clearly demonstrated, while the effect of sample size cannot be detected from this series of measurements because the sensitivity for this sample size is less than the heterogeneity of samples. For RDF, at 65 °C the average "slope" is 0.0085 1/min, while at 105 °C it is 0.0165 1/min, therefore the initial rate of moisture loss is about double at the higher temperature. For the bio-fraction, the average slope at 65 °C is 0.003 1/min and at 105 °C it is 0.0065 1/min, therefore the higher temperature resulted double rate initial moisture loss for this material as well. Comparing the materials relative to each other, the initial moisture loss rate (slope) of RDF is almost three times that of the bio-fraction at both temperatures. The aim of the next series of studies was to investigate the effect of particle size with the stone-metal-glass-depleted bio-fraction. Drying curves of three samples with different particle size distributions were measured at two temperatures and two amounts of material. Results are shown on Figs. 7 and 8. The effect of temperature can be well demonstrated in this case as well, at 105 °C the initial drying rate is as about double as at 65 °C. The effect of the particle size distribution is also well demonstrated, although a small variance can be observed for the reasons already described.

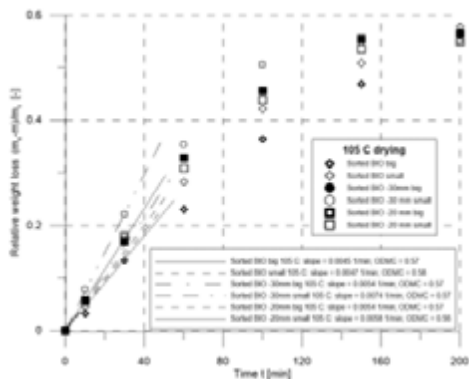


Fig. 7: Drying curves of sorted and cut biofraction at 105 °C

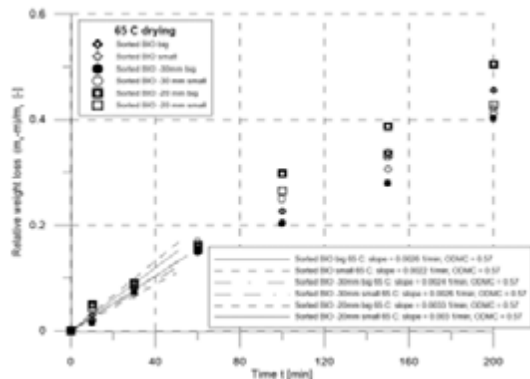


Fig. 8: Drying curves of sorted and cut bio-fraction at 65 °C

In cases with the same parameters, the -20mm/-30mm/original “slope” triple numbers, i.e. the fine/medium/coarse ratios, look like this: 0.0054/0.0054/0.0045; 0.0058/0.0074/0.0047; 0.0033/0.0024/0.0026; 0.0033/0.0026/0.0026. The percentages of the finest/coarsest values are as follows: 20%; 23%; 27%; 27%, and that means the pre-shredding with the cutting mill with a 20 mm screen resulted in a 25% higher initial water loss rate compared to the un-shredded bio-fraction! The effect of particle size distribution on the initial water loss rate is a very complex phenomenon. There is still work to be done to explore the theoretical reasons. Suffice it to mention two opposite effects. Shredding also results in the exploration of the material and thus the water, so the initial water loss is more dynamic. The finer-grained aggregate has a smaller pore size, making the loss of hygroscopic water, i.e., flow in the pore capillaries, more difficult. In this case, water loss is slower. The particle size distribution of all three examined RMSW fractions can be considered as coarser, so the first phenomenon dominated, which resulted in the approx. 25% increase in initial water loss rate. In this series of measurements, the effect of the amount of material on the drying dynamics can also be demonstrated. The slope percentages with the same parameter (smaller bowl/larger bowl) are as follows: 4.4%; 37%; 7.4%; -15%; 8.3%; -9%. The average increase is 5.5%. The trend is therefore the same as for the reference aqueous measurements, i.e. the initial drying rate of the smaller amount of material by weight is higher. As a consequence, the thickness of the material on the belt in the convection belt drier strongly influences the drying. Figs. 9 and 10 show the drying curves of a two-ratio mixture of sorted and shredded bio-fraction and RDF.

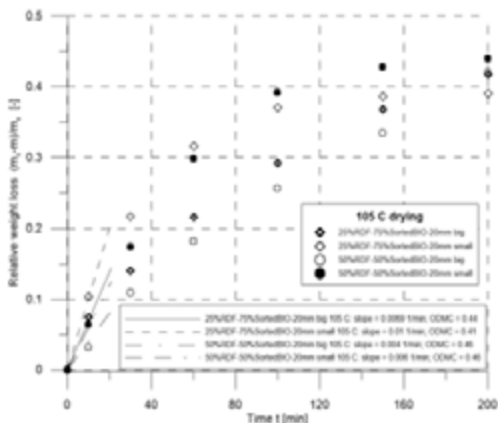


Fig. 9: Drying curves of bio-fraction and RDF mixtures at 105 °C

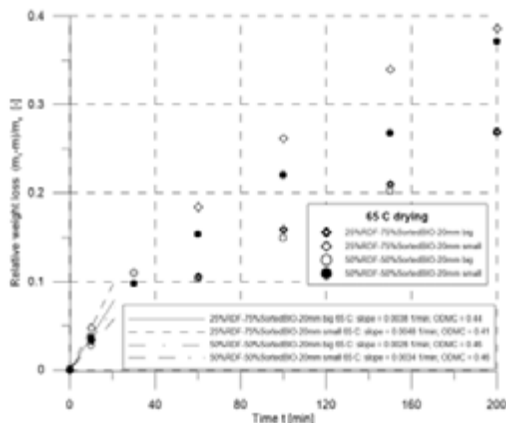


Fig. 10: Drying curves of bio-fraction and RDF mixtures at 65 °C

The resulting moisture content of two-component mixtures can be easily calculated based on the mass concentration of the components. According to previous measurements, the moisture content of RDF is 0.38 and SortedBIO-20mm has a moisture content of 0.57. The calculated resulting moisture content of the 25-75% mixture is 0.522; the resulting moisture content of the 50-50% mixture is 0.475. The ODMC values in Figs. 9 and 10 are lower than this, however, it can be seen that the drying curves of the mixtures have not yet reached the stabilization stage, i.e. the samples had not yet dried completely. In the case of mixtures, the 'slope' values fall between the 'slope' values of the components, i.e. here again there is a correlation between the concentration and the initial drying rate. The type of relationship cannot be estimated, it is probably not as easy to calculate the drying rate of the mixture from the proportions of the components as the resulting moisture content. Otherwise, the measurements performed with the mixtures are in line with the previous ones, i.e. higher temperature and finer particle size (in the studied range) resulted in faster drying dynamics and higher amount of material resulted in slower drying dynamics.

4 CONCLUSION

Systematic drying tests were performed on samples of 40-120 grams in an oven, and based on them the following findings were made:

- Drying at 105 °C results in about twice the initial drying rate compared to drying at 65 °C.
- If drying of RDF and bio-fraction separately in similar equipment with the same capacity, the initial drying rate of RDF is approx. three times the one of the bio-fraction.
- Samples of 50 to 80 grams had an initial drying rate of approx. 5% larger than samples of 100 to 120 grams under otherwise identical conditions. It validates the known fact, that the width of the material bed on the drying belt strongly affects drying.
- The initial drying rate of the -20mm cutting mill cut stone-metal-glass-depleted bio-fraction is approx. 25% bigger than if we didn't shred it.
- The average moisture content of RDF and bio-fraction mixtures can be easily calculated from the mixing ratio. The initial drying rate of the mixture is between the initial drying rates of the two components separately and is a function of the mixing ratio. This function relationship could not be determined from this measurement.
- The process engineering design method of convective hot air drying is shortly described in Chapter 1. The shown research results validate and fine tune this method especially focusing on the retention time in the drier. So far some actual process design has been made.

REFERENCES

- Faitli, J., Csöke, B., Romenda, R.R., Nagy, Z., Rácz, A. (2020) *Industrial tests with a residual municipal solid wastes processing plant with the newly developed KLME separator*. Geosciences and Engineering 8(12), 133–150.
- Georgiopoulou, M., Lyberatos, G. (2017) *Management of the Biodegradable Fraction of Municipal Solid Waste with Drying Technology: A Case Study*. National Technical University of Athens, Athens, Greece [Preprint].
- Tun, M.M., Juchelková, D. (2019) *Drying methods for municipal solid waste quality improvement in the developed and developing countries: A review*. Environmental Engineering Research 24(4), 529–542.
- Verma, M., Loha, C., Sinha, A. N., Chatterjee, P. K. (2017) *Drying of biomass for utilizing in co-firing with coal and its impact on environment - A review*. Renewable and sustainable energy reviews 71, 732–741.

Bio Paper Recycling (BiPaRe) Project: Strategic development tool for a recycling-friendly design of bio-based paper coatings

V. Wortmann¹, L. Hamann¹, A. Eisenschmidt¹, S. Genest², M. Jesdinszki³, K. Noller³ & K. Bauer³

¹) Papiertechnische Stiftung (PTS), Smart and Circular Solutions, Heidenau, Germany

²) Papiertechnische Stiftung (PTS), Functional Surfaces, Heidenau, Germany

³) Fraunhofer Institute for Process Engineering and Packaging (IVV) Materials Development, Freising, Germany

ABSTRACT: Fibre-based packaging is experiencing a strong increase in demand as it can partially substitute plastic applications. This is driven by consumer awareness and legal requirements, like the Single-Use Plastics Directive. On the other hand, paper provides insufficient barrier properties against water, oxygen, grease, etc, and thus needs to be equipped with barrier coatings to meet the functionality requirements of packaging materials. Some bio-based coatings come from renewable sources and can be an environmentally friendly alternative to the mineral oil-based polymers conventionally applied for paper products. However, upon disintegration in fibre recovery, bio polymers from natural sources like carbohydrates, fats and proteins can dissolve or be suspended in the process water. This in turn can potentially impair the end paper product quality, especially with the trend of narrowing water cycles in paper mills. In this context, laboratory tests are conducted to investigate the influence of natural bio-based coatings on the recyclability of fibre-based products, considering also the contamination of the aqueous phase. After the project finalisation in 2023, a data-based template design considering the barrier properties and recyclability of coated paper will be created to guide product developers. This paper presents the current findings of the project.

1 INTRODUCTION

The packaging industry has been a large consumer of plastic due to its processability and versatility. However, a paradigm change is caused by to the growing consumer awareness and new environmental regulations (Jasmani et al. 2021). Paper is bio-based, biodegradable and recyclable and consumers acknowledge it as a high-value material and an environmentally friendly alternative (Oloyede & Lignou 2021). In addition, with the aim to reduce the impact of plastic waste in the environment, the EU Single Use Plastic Directive entered into force in 2021 to regulate the market circulation of plastic products. According to this directive, no single-use plastic shall be placed on the EU market if there are other available and affordable alternatives. In addition, design and labelling requirements are specified for certain single-use products, and the establishment of an extended producer responsibility scheme is demanded (Dey et al. 2020).

Even though fibre-based material can be an outstanding alternative to the packaging sector. The chemical nature and porous structure of cellulose does not inherently offer sufficient resistance against water, oxygen and grease, as required for packaging materials. Under moist conditions, the mechanical and physical performance of cellulose based paper are greatly reduced without the application of coating barriers (Khwalidia et al. 2010). Barrier coatings are even more important for food packaging, in which the sealing is essential to maintain the quality of packed goods (Deshwal et al. 2019). The application of barrier coatings on fibre-based food packaging restrain the contact of the product with gases, aromas, moisture, vapour, water, oil and grease, preserving its hygiene and integrity (Tyagi et al. 2021).

Petroleum based synthetic polymers are the most typical barrier coatings applied to fibre-based packaging due to their comparably low costs and high availability. Polyolefins (polyethylene), waxes, ethylene vinyl alcohol (EVOH), polyvinylidene chloride (PVDC) are some examples of polymers that provide a suitable barrier against water and oxygen in food packaging. On the other hand, the use of synthetic coatings can be associated with environmental issues, since they come from non-renewable sources. Moreover, some synthetic coatings can also reduce the overall recyclability rate of fibre-based products. Therefore, product manufactures are increasingly encouraged to replace synthetic polymers by alternative polymers with similar properties but reduced environmental impacts (Rastogi and Samyn 2015).

The term “bio-polymers” can lead to miss interpretations, since it not restricted materials extracted from natural sources. Bio polymers also includes polymers that are bio-derived but non-biodegradable and the ones that are petroleum-derived but biodegradable. The bio polymers extracted from natural sources used as paper coatings comprise: polysaccharides (starch and cellulose derivatives, chitosan, and alginates), proteins (casein, whey, collagen, soya, and gluten), lipids (bees and carnauba wax, and free fatty acids), polyesters (polyhydroxyalkanoates - PHA and polylactic acid - PLA) or combinations of these components (Rastogi and Samyn 2015).

Regarding the functionality, bio-based coatings can partially provide satisfactory gas and solute barriers, minimizing food quality deterioration and extending the packaging shelf life. Thus, bio-based coatings can be a useful alternative to meet food packaging requirements without compromising the environmental-friendly characteristics of fibre-based products. However, further research is necessary regarding their influence on the recyclability of the respective paper products (Khwaldia et al. 2010).

The water consumption in the paper industry worldwide has been reduced by approximately 90% during the last decades, and the narrowing of water circuits has contributed significantly to this achievement (Fatta-Kassinos et al. 2016). Consequently, the contamination of process water started to play a significant role on the quality of the end product in paper mills. Based on this demand, the assessment of the aqueous phase has been included in new recyclability laboratory test method (CEPI Method) published in 2020 which aims to harmonize the present European test methods.

The BiPaRe project aims to increase the market potential of paper-based packaging by developing a data-based comprehensive design for coated paper products that considers the interplay between the barrier effect and the paper recyclability. The project will be finished in 2023, but this paper will focus on the most recent findings regarding the influence of bio-based barrier coating on the recyclability of fibre-based packaging according to the CEPI Method.

2 MATERIALS AND METHODS

The methodology used in the experiments focusses on the coating of fibre-based materials, the assessment of the recyclability in lab scale according to the CEPI Method (CEPI, 2020) and the determination of additional water quality parameters.

The base materials made of flexible packaging and cardboard were chosen following the physical properties required for coating applications that are tensile strength, maximum stiffness and absorbency. The tests have been carried out using papers with two different grammages: 80 gsm and 230 gsm.

The selection of barrier coatings aimed to cover different bio polymer materials. So, it included polyvinyl alcohol (synthetic), soy protein, wax and alginate (carbohydrate).

The recyclability was tested using the first version of the CEPI Method, released in 2020. This method is based on European standards, but includes innovations like the additional analysis of the aqueous phase. As shown in Fig.1, the CEPI method includes the following process: sample preparation, disintegration, analysis of dissolved and colloidal substances, coarse screening, fine screening, sheet formation and determination of macro stickies. Based of the results of the method, the following criteria are assessed: coarse reject, fine reject, dissolved and colloidal substances, adhesive particles, sheet formation, tackiness and visual appearance (CEPI 2020).

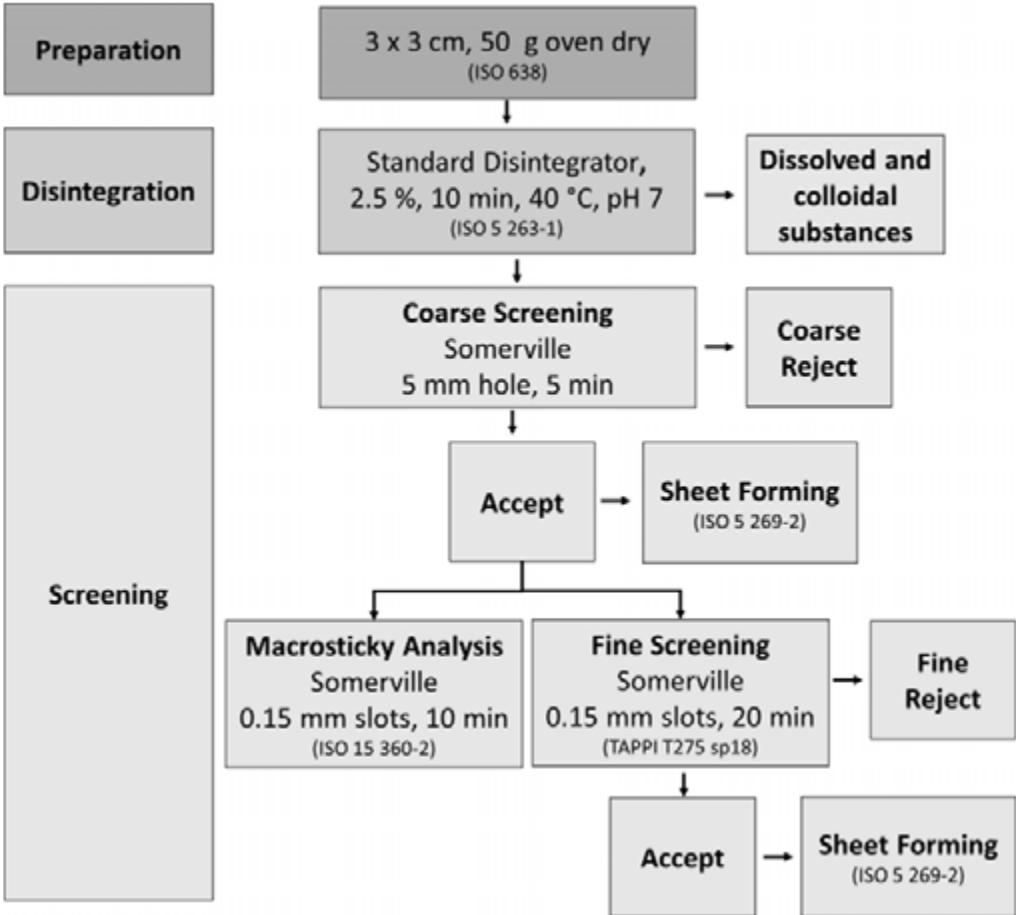


Fig. 1: Process steps performed in the CEPI recyclability test method version 1. (Adapted from CEPI 2020)

The recyclability test was conducted before and after the application of the barrier coatings to evaluate the impact of the base materials. The evaluation scheme of the CEPI method is being developed as part of the 4evergreen initiative (4evergreen, 2022) and it will be published by the end of 2022. Therefore, the tackiness and visual impurities were assessed according to the PTS-RH 021:2012 Category II (Grossmann & Strauß 2012).

In addition to the tests of the CEPI Method, in this project a more detailed investigation of the aqueous phase was conducted by also measuring the pH, conductivity and biochemical oxygen demand (BOD) of the filtrate obtained after disintegration of the samples ("dissolved and colloidal substances" see Figure 1).

3 RESULTS AND FURTHER STEPS

Comparing the results of the recyclability tests before and after the application of barrier coatings (Table 1, 2), it can be concluded that the quantity of coarse reject found, did not change due to the application of the coating. On the other hand, the fine reject increased with the use of the synthetic PVOH coating. The tackiness and the visual impurities were also not significantly affected by the coating application.

Tab. 1: Results of the recyclability test of the base materials

Description	Grammage g/m ²	Absorbency Cobb 60 g/m ²	Coarse Reject	Fine Reject	Tackiness	Visual Impurities
Algro Finess	80	23.7 ± 0.6	<1%	1.0%	5	3
Pack Pro 7	80	28.5 ± 1.0	<1%	0.8%	5	2
Thebe 230	230	106.0 ± 2.1	<1%	0.2%	4	2
CKB Nude	230	26.7 ± 0.7	<1%	4.1%	5	2

Tab. 2: Results of the recyclability test of the base materials after the application of the barrier coatings

Description	Coating gsm	Weight Reject	Coarse Reject	Fine Reject	Tackiness	Visual impurities
Algro Finess + Wax	10	<1%	-	-	3.0	3
Algro Finess + Soy	10	<1%	-	-	3.5	3
Algro Finess + PVOH	10	<1%	-	-	2.0	3
Pack Pro + PVOH	10	<1%	3.0%	-	4.0	2
Pack Pro + Alginate	10	<1%	0.5%	-	3.8	2
Pack Pro + Wax	10	<1%	0.5%	-	4.0	2
Pack Pro + Soy protein	10	<1%	0.8%	-	4.0	2
Thebe + PVOH	15	<1%	0.5%	-	3.0	2
Thebe + Alginate	15	<1%	0.3%	-	4.0	2
Thebe + Wax	15	<1%	0.3%	-	3.8	2
Thebe + Soy protein	15	<1%	0.4%	-	4.0	2
CKB Nude + Wax	15	<1%	-	-	5.0	2
CKB Nude + Soy protein	15	<1%	-	-	5.0	2
CKB Nude + PVOH	15	<1%	-	-	3.0	2

The results of the analysis of the aqueous phase are summarised in Table 3. Interestingly, the organic loading of the recycled water increases significantly when the sample is coated with soy protein as compared to alginate and wax.

Tab. 3: Results of the analysis of the aqueous phase of the base materials after the application of the barrier coatings

Description	Coating Weight g/m ²	Evaporation residue g/kg fibres	COD g O ₂ /kg	BOD O ₂ /kg	^g pH	Conductivity (25°C)
Tap water			< 15.0		8.21	274
Algro Finess + PVOH	10	162	157.0	44.6	8.01	394
Algro Finess + Wax	10	141	60.0	8.5	8.15	377
Algro Finess + Soy	10	174	91.5	61.3	9.02	709
Pack Pro + PVOH	10	84	156.1	43.6	8.14	319
Pack Pro + Alginate	10	62	109.4	24.8	9.08	797
Pack Pro + Wax	10	3	87.3	8.0	8.23	349
Pack Pro + Soy protein	10	21	128.0	73.9	8.72	504
Thebe + PVOH	15	61	118.3	40.5	8.05	304
Thebe + Alginate	15	82	63.6	14.2	8.85	520
Thebe + Wax	15	20	42.9	2.4	8.13	289
Thebe + Soy protein	15	82	104.1	45.8	8.34	463
CKB Nude + PVOH	15	105	235.5	75.6	7.93	337
CKB Nude + Wax	15	31	121.0	21.4	8.36	286
CKB Nude + Soy protein	15	87	223.2	90.2	8.56	499

4 CONCLUSIONS

The BiPaRe project is still ongoing and will run until November 2023, but the current findings regarding recyclability of bio-based coated paper permit to conclude that bio-based coatings analysed here have a higher potential to be suspended or dissolved in the water phase than other recyclability parameters like coarse reject, tackiness and visual impurities. This impact on the water phase could have further disadvantages which would affect negatively the reuse of the water for further process steps.

As further steps, the project will focus on determining which tests will be informative for improving the water analysis in the CEPI method. Testing combinations of coatings and conducting tests in large scale is also planned for the next months. In addition to creating a decision tree for coated paper design.

REFERENCES

- 4evergreen (2022). An alliance for today and for the future - 4evergreen. <https://4evergreenforum.eu/4evergreen-an-alliance-for-today-and-for-the-future/>
- CEPI (2020). Harmonised European laboratory test method to produce parameters enabling the assessment of the recyclability of paper and board products in standard paper and board recycling mills. In *CEPI European Paper* (Issue December). <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2021/02/REC-21-002.pdf>
- Deshwal, G. K., Panjagari, N. R., & Alam, T. (2019). An overview of paper and paper-based food packaging materials: health safety and environmental concerns. *Journal of Food Science and Technology*, 56(10), 4391–4403. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03950-z>
- Dey, A., Dhupal, C. V., Sengupta, P., Kumar, A., Pramanik, N. K., & Alam, T. (2020). Challenges and possible solutions to mitigate the problems of single-use plastics used for packaging food items: a review. *Journal of Food Science and Technology* 2020 58:9, 58(9), 3251–3269. <https://doi.org/10.1007/S13197-020-04885-6>
- Fatta-Kassinos, D., Dionysiou, D. D., & Kümmeler, K. (2016). *Wastewater Reuse and Current Challenges* (Vol. 44). <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-23892-0>
- Grossmann, H., & Strauß J. (2012). *PTS METHOD PTS-RH 021/97* (pp. 1–6). Papiertechnische Stiftung (PTS).

- Jasmani, L., Ainun, Z. M. A., Adnan, S., Ibrahim, R., Sapuan, S. M., & Ilyas, R. A. (2021). Sustainable Paper-Based Packaging. In *Bio-based Packaging*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119381228.CH13>
- Khwaldia, K., Arab-Tehrany, E., & Desobry, S. (2010). Biopolymer Coatings on Paper Packaging Materials. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(1), 82–91. <https://doi.org/10.1111/J.1541-4337.2009.00095.X>
- Oloyede, O. O., & Lignou, S. (2021). Sustainable Paper-Based Packaging: A Consumer's Perspective. *Foods* 2021, Vol. 10, Page 1035, 10(5), 1035. <https://doi.org/10.3390/FOODS10051035>
- Tyagi, P., Salem, K. S., Hubbe, M. A., & Pal, L. (2021). Advances in barrier coatings and film technologies for achieving sustainable packaging of food products – A review. *Trends in Food Science and Technology*, 115, 461–485. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.06.036>

Recyclingfähigkeit von Verpackungen: Ziele, Bewertung & Grenzen

T. Pitschke¹ & W. Rommel¹

¹⁾ bifa Umweltinstitut GmbH, Augsburg, Deutschland

KURZFASSUNG: Der komplexe Aufbau und die Materialvielfalt von Verpackungen reduzieren den Umfang und die Qualität des Recyclings. Dies stellt die Entsorgungswirtschaft vor das Probleme, die ambitionierten Recyclingziele zu erreichen. Das Verpackungsgesetz verpflichtet deshalb die deutschen Dualen Systeme, recyclingfähige Verpackungen bei den Lizenzentgelten gegenüber nicht recyclingfähigen zu bevorzugen. Für Bewertung von Verpackungen wurden die Mindestanforderungen an die Recyclingfähigkeit für Deutschland definiert. Dieser Mindeststandard hat erreicht, dass die Recyclingfähigkeit von Verpackungen stärker als bisher im Verpackungsdesign berücksichtigt wird. Parallel trifft das Thema Recyclingfähigkeit auf eine hohe Resonanz beim Handel und bei den Konsumenten. Die Einführung des Mindeststandard im Jahr 2019 hat so dazu beigetragen, die ambitionierten, gesetzlichen Vorgaben an das stoffliche Recycling von Verpackungen zu erreichen. Dennoch besteht weiter das Potenzial mehr recyclingfreundliche Verpackungslösungen anzubieten. Außerdem sollte sich eine nachhaltige Verpackungsgestaltung nicht allein auf die Recyclingfähigkeit reduzieren, sondern den gesamten Lebensweg umfassen.

1 HINTERGRUND

Steigende gesetzliche Anforderungen an den Umfang und die Qualität des Recyclings von Wertstoffen im Generellen und von Verpackungsabfällen im Besonderen, sind ein wichtiges Instrument zur Schonung von Ressourcen und zum Schließen von Stoffkreisläufen. So wurden beispielsweise in Deutschland, im Rahmen des Verpackungsgesetzes (VerpackG), die Quoten für das werkstoffliche Recycling von Verpackungen aus Kunststoffen in zwei Stufen von 36 % im Jahr 2018 bis auf 63 % ab dem Jahr 2022 deutlich erhöht. In Österreich ist dies ähnlich. Die Verpackungsverordnung verpflichtet die Sammel- und Verwertungssysteme für Kunststoffverpackungen aus Haushalten ab dem Jahr 2023 zu einer Recyclingquote von mindestens 50 % und ab dem Jahr 2024 von 55 %.

Für das Erreichen dieser Ziele sind Anstrengungen aller Akteure, die am Lebensweg einer Verpackung beteiligt sind, erforderlich. Zu einem unternehmen Entsorger technische Anstrengungen für eine materialspezifische Sortierung mit hoher Ausbeute und für Recyclingprozesse, die hochwertige Sekundärrohstoffe erzeugen. Ebenso sind auch die Verpackungshersteller und die In-Verkehr-Bringer aufgefordert, den Wiedereinsatz von Rezyklaten in Neuprodukten auszubauen und Verpackungen möglichst recyclingfreundlich zu gestalten. Die Anforderungen an die Funktionalität von Verpackungen und damit die Komplexität beim Verpackungsdesign sind hoch. Aktive Barriere-Schichten reduzieren beispielsweise den frühzeitigen Verderb von Nahrungsmitteln, Full-Sleeves und In-Mould-Labeling erlauben aufwändige Dekorationen und technische Kunststoffe bieten bessere Verpackungseigenschaften. Viele Entwicklungen im Verpackungsbereich erfolgen durch Mehrschichtverbunde, durch Zusatzstoffe oder zusätzliche Komponenten. Der resultierende oft komplexe Aufbau und die Materialvielfalt verringern die Recyclingfähigkeit.

Die teils geringe Recyclingfähigkeit von Verpackungen wie beispielsweise Verbunden aus Papier und Kunststoff oder kleinformatigen, flexiblen Verpackungen stellt die Entsorgungswirtschaft heute vor Probleme, die gesetzlichen Recyclingvorgaben zu erreichen. Zur Förderung des erforderlichen recyclinggerechten Designs von Verpackungen ist deshalb die Zusammenarbeit aller Akteure der Wertschöpfungskette wesentlich.

2 BEWERTUNG DER RECYCLINGFÄHIGKEIT

Unterstützung dafür leistet in Deutschland § 21 VerpackG, der die Höhe der Lizenzentgelte für Verkaufsverpackungen von ihrer Recyclingfähigkeit abhängig macht. Durch die ökologische Gestaltung der Lizenzentgelte sollen recyclingfähige Verpackungen mit geringeren und nicht recyclingfähigen Verpackungen mit höheren Beteiligungsentgelten belegt werden.

Für die Umsetzung entsteht der Bedarf nach einer konkreten und einheitlichen Bewertung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen. Dazu wird von der zentralen Stelle Verpackungsregister und unter Einbindung relevanter Akteure ein Standard vorgegeben, der die Mindestanforderungen an die Recyclingfähigkeit beschreibt und der den Dualen Systemen als Referenz für die Bewertung der Verpackungen dient (ZVSR 2021). Der Mindeststandard wird jährlich aktualisiert und so an die sich verändernden Rahmenbedingungen der Verpackungsentsorgung angepasst.

Die im Mindeststandard definierte Recyclingfähigkeit bezieht sich auf ein hochwertiges und werkstoffliches Recycling. Das bedeutet, das Potenzial einer Verpackung, nach der Verwertung Neumaterial gleichen Materials und in typischen Anwendungen für dieses Materials zu substituieren. Eine recyclingfähige Kunststoffverpackung findet also ein zweites Leben wieder in einem typischen Kunststoffprodukt. Diese Formulierung des hochwertigen Recyclings ist ambitioniert und schließt energetisches und rohstoffliches (d.h. auch chemisches) Recycling aus.

Die Bewertung inwieweit eine Verpackung ganz oder graduell diesem Begriff der Recyclingfähigkeit entspricht, erfolgt anhand der in Abb 1 skizzierten Kriterien.



Abb. 1: Kriterien der Recyclingfähigkeit am Beispiel der Verwertung einer Kunststoffverpackung

Die Anwender des Mindeststandards, d.h. die Dualen Systeme, bewerten Verpackungen in der Praxis anhand dieser Kriterien. Das bifa Umweltinstitut hat gemeinsam mit dem Dualen System Interseroh+ die Umsetzung des Mindeststandard in einem praxistauglichen Bewertungsprozess erarbeitet (Pitschke & Kriebe 2021). Das Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung hat diese Methode abschließend geprüft. Der Bewertungskatalog bemisst die Recyclingfähigkeit anhand von 8 Merkmalen, die neben den o.g. Kriterien beispielsweise auch Schwierigkeiten bei der Zuordnung der Verpackung zum richtigen Sammelsystem berücksichtigt. Die 8 Einzelbewertungen werden gewichtet zu einer Gesamtbewertung zwischen 0 Punkten, d.h. nicht

recyclingfähig und 20 Punkten, d.h. sehr gut recyclingfähig zusammengeführt. Neben solchen konkreten Bewertungsmethoden gibt es eine Vielzahl von Empfehlungen. So wurde vom FH Campus Wien eine umfassende Guideline für das recyclingfreundliches Verpackungsdesign erarbeitet (Gürlich et al. 2021).

3 WIE RECYCLINGFÄHIG SIND KUNSTSTOFFVERPACKUNGEN?

Für viele der üblichen Verpackungsmaterialien stehen hochwertige werkstoffliche Verwertungsprozesse in ausreichender Kapazität zur Verfügung. Diese Verpackungsmaterialien sind Eisen, Aluminium, Behälterglas, PPK (also Papier, Pappe und Karton), Getränkekarton und formstabile Verpackungen aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) sowie durchsichtige Flaschen aus Polyethylenterephthalat (PET). Begrenzte Kapazitäten für eine hochwertige Verwertung sind aktuell vorhanden für in Deutschland anfallende Verpackungen aus Polystyrol (PS) und für kleine flexible Verpackungen und Verbunde auf Papierbasis.

Verwertungsstrukturen fehlen heute noch für PET-Verpackungen (mit Ausnahme des etablierten Recyclingpfads für transparente Getränkeflaschen) sowie für nicht-Standardverpackungskunststoffe wie beispielsweise expandiertes Polystyrol oder Polymilchsäure. Verpackungen aus diesen Kunststoffen sind deshalb heute in Deutschland nicht recyclingfähig.

Verpackungsabfälle werden meist im Gemisch mit anderen Verpackungsmaterialien gesammelt, um dann in Sortieranlagen in materialspezifische Recyclingwege aufgetrennt zu werden. Zentrales Identifikationsmerkmal für Verpackungen aus Kunststoff ist die NIR-Identifikation der Oberfläche. Der erfolgreiche NIR-Scan des relevanten Verpackungsmaterials hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Verwendung des Zielmaterials an der Verpackungsoberfläche
- Anteil des Zielmaterials an der Oberfläche der Verpackung und
- Lage der Verpackung auf dem Sortierband

Mittels NIR-Messtechnik werden meist die Kunststoffarten PE, PET, PP, PS unterschieden. Insbesondere Multilayer-Verpackungen, großflächige Etikettierungen mit Fremdmaterial und teils die Verwendung rußbasierter Farbstoffe können jedoch die NIR-Erkennbarkeit, die Sortierbarkeit und damit die Recyclingfähigkeit verhindern oder verschlechtern.

Für den Wiedereinsatz in Sekundärprodukten sind nach der Sortierung weitere Aufbereitungsschritte erforderlich. Ziel der Aufbereitung ist das Abtrennen materialfremder Anteile vom Zielmaterial der Verpackung. Verunreinigungen, die im Aufbereitungsprozess nicht abgetrennt werden, können das Rezyklat teils bis hin zur Unbrauchbarkeit verschlechtern oder zu höheren Prozesskosten führen. Stoffe, die eine Recyclingfähigkeit der Verpackung aus diesem Grund ausschließen, sind für Polyolefin-Kunststoffe wie PE und PP beispielsweise Silikonkomponenten, nicht wasserlösliche Klebstoffe in Kombination mit nassfesten Etiketten, Barrierschichten aus Polyamid (PA) oder Polyvinylidenchlorid (PVDC) und teils auch Barrierschichten, die nicht aus Kunststoffen bestehen.

4 WIRKUNG UND FAZIT

Die Gestaltung von Verpackungen unterliegt vielfältigen Anforderungen. Sie sollen vor allem das Produkt bestmöglich schützen, aber auch materialeffizient sein und zum Kauf animieren. Die Recyclingfähigkeit konkurriert häufig mit diesen und weiteren Anforderungen. Der Mindeststandard hat den Impuls gegeben, die Recyclingfähigkeit von Verpackungen stärker als bisher zu berücksichtigen und ist eine bei Verpackungsherstellern und In-Verkehr-Bringern akzeptierte Hilfestellung. Parallel trifft die Recyclingfähigkeit auf eine hohe Resonanz für das Thema beim Handel und bei den Konsumenten. Die Einführung des Mindeststandard im Jahr 2019 hat so dazu beigetragen, die ambitionierten, gesetzlichen Vorgaben an das stoffliche Recycling von Verpackungen zu erfüllen. Abb 2 zeigt dies am Beispiel der werkstofflichen Verwertung von Kunststoffverpackungen und der in diesem Segment deutlichen gesteigerten Verwertungsquote seit dem Jahr 2019.

Dennoch besteht weiter Potenzial mehr recyclingfreundliche Verpackungslösungen anzubieten. Immer noch werden Verpackungslösungen etabliert, die nicht oder nur zu einem geringen Teil hochwertig recycelt werden können. Dazu zählen beispielsweise lackierte Glasflaschen, vernetzte XPE-Folien auf Pappe sowie die wachsende Anzahl von faserbasierten Verbundverpackungen (Glitza 2022).

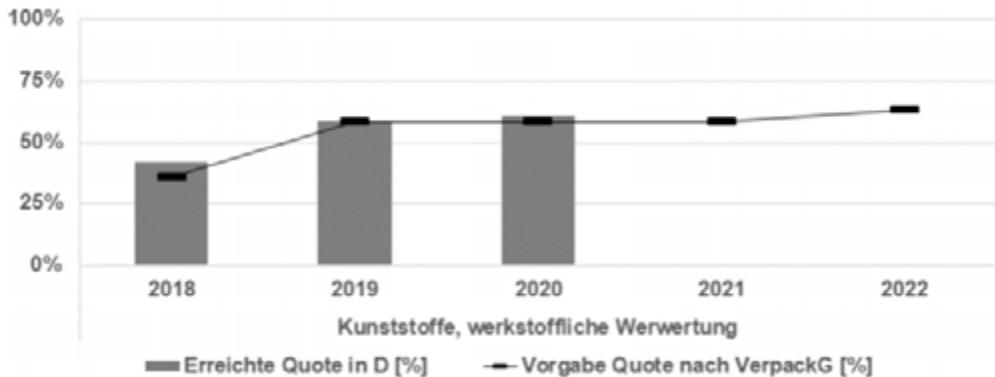


Abb. 2: Werkstoffliche Verwertungsquoten für Kunststoffverpackungen in Deutschland und entsprechende Quotenvorgaben nach VerpackG soweit verfügbar für den Zeitraum 2018 bis 2022

Neben den positiven Wirkungen müssen auch die Grenzen einer recyclingfreundlichen Verpackungsgestaltung beachtet werden. Im Kontext der Gestaltung nachhaltiger Verpackungslösungen ist die Recyclingfähigkeit nur ein Aspekt neben weiteren relevanten Faktoren. Recyclingfähige Verpackungen sind nicht zwingend materialeffizient, klimafreundlich und vermeiden keinen Abfall. Ebenso sollte auch der Einsatz von Sekundärmaterial in der Verpackung nicht außer Acht gelassen werden.

Eine allein auf die Recyclingfähigkeit reduzierte Bewertung von Verpackungen hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit wäre verkürzt. Besser sollten alle relevanten Umweltauswirkungen einer Verpackung berücksichtigt werden. Dies ist beispielsweise durch kompletten Lebensweganalysen im Rahmen von Ökobilanzen möglich. Nur so wird vermieden, dass isolierte Verbesserungen der ökologischen Verpackungseigenschaften zu Trade-offs in anderen Aspekten führen.

LITERATUR

- Glitza, K. H. (2022) *Das Verpackungsregister schafft immer mehr Transparenz*. (D. Entsorgungsmagazin, Herausgeber) Abgerufen am 08. 06 2022 von Aktuelles EM-Interview mit Gunda Rachut, Vorstand der ZSVR: <https://e-mag.press/das-verpackungsregister-schafft-immer-mehr-transparenz/>
- Gürlich, U., Kladnik, V., Pavlovic, K. (2021) *CIRCULAR PACKAGING DESIGN GUIDELINE*. Wien: FH Campus Wien.
- Pitschke, T., & Kreibe, S. (2021) *Recyclingfähigkeit von Verpackungen. Bewertungskatalog*. Augsburg: bifa Umweltinstitut GmbH.
- ZSVR (2021) *Mindeststandard zur Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen*. Osnabrück: Zentrale Stelle Verpackungsregister in Abtimmung mit dem Umweltbundesamt.

Green Deal im Wackersdorfer Revier – wie vor 40 Jahren der Kohleausstieg gelang

M. Mocker¹, W.P. Bauer² & T. Knoll³

¹⁾ Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Amberg, Deutschland

²⁾ ia GmbH – Wissensmanagement und Ingenieurleistungen, München, Deutschland

³⁾ Zweckverband Müllverwertung Schwandorf, Schwandorf, Deutschland

KURZFASSUNG: Die Müllverbrennungsanlage Schwandorf ersetzte ein Braunkohleheizkraftwerk zur industriellen Energieversorgung. Zudem werden Strom und Fernwärme ins öffentliche Netz eingespeist. Dies war Grund genug, im Jubiläumsjahr eine Rückschau auf 40 Jahre Klimaschutz zu werfen und die Effekte zu quantifizieren.

1 GESCHICHTE DES STANDORTES

Gegen Ende der 1970er Jahre war der Raum Schwandorf von einem dramatischen Strukturwandel betroffen. Die verbliebenen Braunkohlevorkommen im einst zweitgrößten Revier der Bundesrepublik Deutschland waren nicht mehr wirtschaftlich förderbar. Neben dem Verlust von zahlreichen Arbeitsplätzen im Bergbau stand somit auch keine kostengünstige Brennstoffquelle für die öffentliche Stromversorgung und die ortsansässige energieintensive Wirtschaft mehr zur Verfügung. Dies betraf ebenso das Braunkohlekraftwerk der damaligen Vereinigten Aluminiumwerke AG (VAW), in dem Hochdruckdampf für den Autoklavenaufschluss von Aluminiumoxiden erzeugt wurde. Der fehlende heimische Brennstoff wurde zunächst durch Importkohle ersetzt, was aber bei dem in die Jahre gekommenen Kraftwerk auch technische Probleme bereitete.

Neben strukturpolitischen Schwierigkeiten kämpften die Kommunen zu dieser Zeit mit dem stetig steigenden Müllaufkommen, so dass angesichts fehlender Deponiekapazitäten selbst kleinere Städte ihre Siedlungsabfälle in Nachbarstaaten exportieren mussten und der Begriff „Müllnotstand“ die Runde machte. Diesem Umstand begegnete das bayerische Umweltministerium mit der vorausschauenden Entscheidung, als erstes Bundesland großflächig auf die thermische Abfallbehandlung zu setzen und perspektivisch die Deponierung von Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen zu beenden. Konsequenterweise gab das Ministerium die Empfehlung, das Kohlekraftwerk zu einem mit Müll betriebenen Heizkraftwerk umzubauen. Damals überraschend, kann dieser Weg heute als Paradebeispiel für die inzwischen etablierte Waste-to-Energy Strategie angesehen werden.

In der Folge schlossen sich 1979 zunächst 14 Landkreise und kreisfreie Städte zum „Zweckverband Müllkraftwerk Schwandorf“ zusammen. Nach dem Beitritt weiterer Partner, zuletzt Stadt und Landkreis Landshut im Jahr 2006, sind inzwischen 17 Mitglieder in dieser Solidargemeinschaft vereinigt. Aufgrund einer Änderung und Ergänzung der satzungsgemäßen Aufgaben erfolgte 1990 die Namensanpassung zum „Zweckverband Müllverwertung Schwandorf“ (ZMS). Kurz zuvor fiel auch die Entscheidung zum Bau einer vierten Ofenlinie, wodurch die Behandlungskapazität um rund 100.000 Mg pro Jahr gesteigert und die Produktion von umweltfreundlichem Strom nahezu verdoppelt werden konnte.

2 BERECHNUNG DER TREIBHAUSGASEMISSIONEN

2.1 Methodik

Zur Bilanzierung der Treibhausgasemissionen wurden die durch den Betrieb des Müllkraftwerkes entstehenden klimarelevanten Emissionen berechnet und mit den an anderer Stelle eingesparten Emissionen verrechnet (ZMS 2019).

2.1.1 Anzurechnende Emissionen

Emissionen entstehen zunächst durch die Verbrennung des in den Brennstoffen enthaltenen Kohlenstoffs, wobei im Müll nur der fossile Kohlenstoffanteil berücksichtigt wird. Hierbei wurde ein Emissionsfaktor von 0,357 Mg CO₂ je Tonne verbrannten Mülls angesetzt (Hoffmann et al. 2011). Für die Hilfsbrennstoffe Heizöl EL und Erdgas wurden energiespezifische Emissionen aus dem Bericht zum deutschen Treibhausgasinventar übernommen (UBA 2019a). Aus diesem Bericht stammen auch die Emissionsfaktoren für die im ehemaligen Braunkohlekraftwerk eingesetzten Brennstoffe, das bis 1988 mit Kohle und bis 1994 als Hilfs- und Reservekessel mit Schweröl und Erdgas befeuert wurde. Außerdem wurden noch Emissionen für die Vorketten der Herstellung von Additiven zur Abgasreinigung einkalkuliert. Die entsprechenden Emissionsfaktoren für Calciumhydroxid und Ammoniakwasser waren in der Datenbank ProBas des deutschen Umweltbundesamtes enthalten (UBA 2019b).

2.1.2 Emissionsgutschriften

Bei den Emissionsgutschriften wurde zunächst der Prozessenergiebedarf des benachbarten Industrieunternehmens Nabaltec AG, das aus den ehemaligen VAW hervorging, betrachtet. Dieses Unternehmen benötigt Prozessdampf auf den Druckstufen 72, 26 und 6 bar und betrieb dafür bis 1982 ein Braunkohleheizkraftwerk, das dann sukzessive vom Müllheizkraftwerk abgelöst und wie oben erwähnt, 1994 endgültig stillgelegt wurde. Da für solche Versorgungsaufgaben bis heute noch Industriekraftwerke auf Basis von Kohle betrieben werden, wurde zum Emissionsvergleich ein fiktives Braunkohlekraftwerk herangezogen und berechnet, welche Treibhausgasemissionen in dieser Anlage entstanden wären. Aufgrund der Druckkaskaden produziert dieses fiktive Referenzkraftwerk neben Prozessdampf auch eine bestimmte Menge Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Strom.

Im Gegensatz zum Referenzkraftwerk, das lediglich den Energiebedarf des Industrieunternehmens zu decken hat, richtet sich der Energieoutput der Müllverbrennungsanlage zuvorderst nach dem Abfallaufkommen. Dadurch wird in Schwandorf wesentlich mehr Strom bereitgestellt, als es im Referenzkraftwerk der Fall wäre. Zudem wird seit 1996 auch Fernwärme in ein städtisches Netz eingespeist. Für diese über die Energiebereitstellung des Referenzkraftwerks hinausgehenden Mengen wurden vermiedene Emissionen nach dem bundesdeutschen Strom- und Wärmemix ermittelt und den im Müllheizkraftwerk entstandenen Emissionen gegengerechnet (StMUV 2018) (IINAS 2019; UBA 2019c). Da sowohl bei Strom als auch bei Wärme der regenerative Anteil kontinuierlich steigt, nimmt die rechnerische Emissionsgutschrift immer weiter ab. Der vorrangig einzuspeisende Strom aus Müllkraftwerken ersetzt vor allem Strom aus Kohle- und Gaskraftwerken, die Fernwärme löst Öl- bzw. Gasheizungen sowie im älteren Baubestand auch kohlegefeuerte Einzelfeuerstätten ab. Deswegen dürften die tatsächlichen Emissionsreduzierungen deutlich höher ausfallen als hier berechnet.

Einen nicht unerheblichen Anteil an Emissionsgutschriften tragen auch die beim Zweckverband zurückgewonnenen Wertstoffe bei. Unter anderem werden Metalle aus den Verbrennungsrückständen sowie Kunststoffe und Papier im Zuge der Optimierungsmaßnahmen (s.u.) abgetrennt. In Abbildung 1 sind die Emissionseinsparungen des Recyclings im Vergleich zur Gewinnung aus natürlichen Rohstoffen dargestellt (UBA 2019b; Wunsch & Simon 2017).

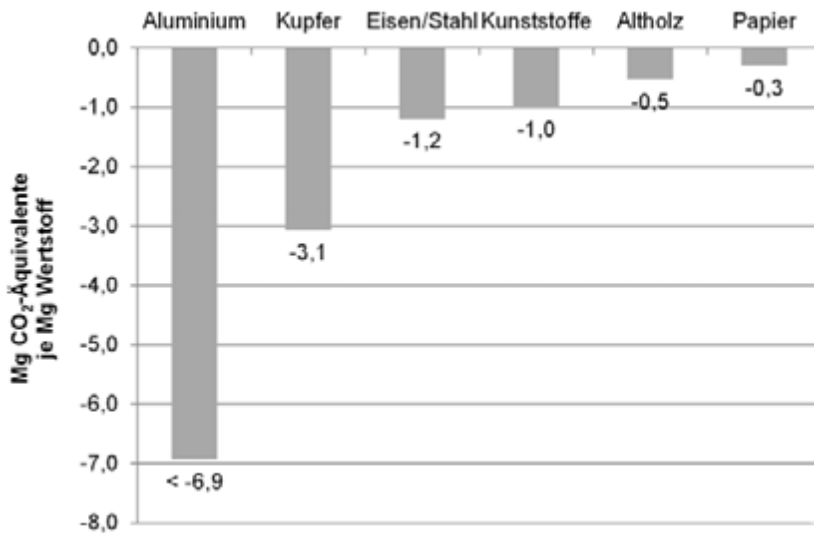


Abb. 1: Emissionseinsparungen durch Wertstoffrückgewinnung

Wesentlichen Einfluss auf die Emissionsbilanz hat auch die Änderung der Entsorgungswege für den Müll. Bis Mai 2005 war in Deutschland im Rahmen einer Übergangsregelung die Deponierung unbehandelter Siedlungsabfälle möglich. Es ist davon auszugehen, dass die Verbandsmitglieder ohne Errichtung der Müllverbrennungsanlage mangels Alternative von dieser Option Gebrauch gemacht hätten. Aufgrund der Deponiegasentwicklung wären dabei 656 kg CO₂-Äquivalente je Mg abgelagerten Mülls freigesetzt worden, die als vermiedene Emissionen in die Berechnung eingingen (Dehoust et al. 2010). Angesichts des großen Einzugsgebietes des Müllkraftwerks wurde von Anfang an ein umweltfreundliches Transportsystem auf der Schiene realisiert. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass auch die Emissionseinsparungen durch den Bahntransport gegenüber LKW bilanziert wurden.

2.2 Ergebnisse

In Abbildung 2 ist die Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Bilanzzeitraum von 1982 bis 2018 zu sehen. Die Emissionen von rund 240.000 Mg CO₂-Äquivalenten vor 1982 errechnen sich aus dem Weiterbetrieb des alten Braunkohlekraftwerks bei Beibehaltung des damaligen Prozessenergiebedarfs. Die gesamten Emissionen steigen zwar aufgrund eines kurzzeitig höheren Energiebedarfs kurzzeitig an, nehmen aber in der Folge wegen der Substitution von fossilen Brennstoffen durch den teilregenerativen Müll deutlich ab. Der Anstieg ab 1994 war dem erhöhten Mülldurchsatz bei Inbetriebnahme der vierten Ofenlinie geschuldet, wodurch natürlich auch die Emissionen aus dem fossilen Anteil des Abfalls zunahmen. Da seither nur noch fossile Hilfsbrennstoffe in geringem Umfang eingesetzt werden, gehen die kleinen Änderungen stets mit einem leicht schwankenden Mülldurchsatz einher.

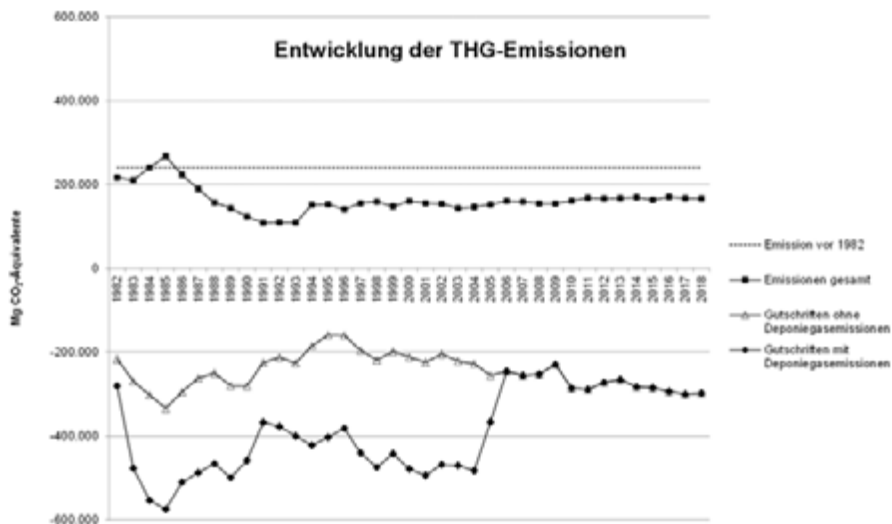


Abb. 2: Entwicklung der THG-Emissionen im Bilanzzeitraum 1982 - 2018

Die in der Grafik negativ dargestellten Emissionsgutschriften erreichen ihr Minimum im Jahr 1995, was in einem konjunktur- und prozessbedingt niedrigeren Energiebedarf des Industrieunternehmens begründet liegt. Dieser Bedarf stieg seitdem wieder kontinuierlich an und erreichte inzwischen wieder das Niveau vom Anfang der 1980er Jahre. Da die Prozessenergie durch Müll mit wesentlich günstigerem Emissionsfaktor bereitgestellt wird als durch Braunkohle, führt dies zu entsprechend zunehmenden Gutschriften. Berücksichtigt man zusätzlich noch die vermiedenen Deponiegasemissionen, kommt es durch die Überlagerung beider Effekte zu einer starken Entlastung. Allerdings war die Deponierung im Jahr 2005 nur noch einige Monate und danach gar nicht mehr zulässig, weshalb diese Entlastung seitdem nicht mehr rechnerisch berücksichtigt wird.

Abbildung 3 zeigt schließlich die saldierten Emissionen und Gutschriften. Auch ohne Berücksichtigung vermiedener Deponiegasemissionen kommt es stets zu einer Entlastung des Klimas, selbst im Jahr des geringsten Energiebedarfs beim angegliederten Industrieunternehmen.

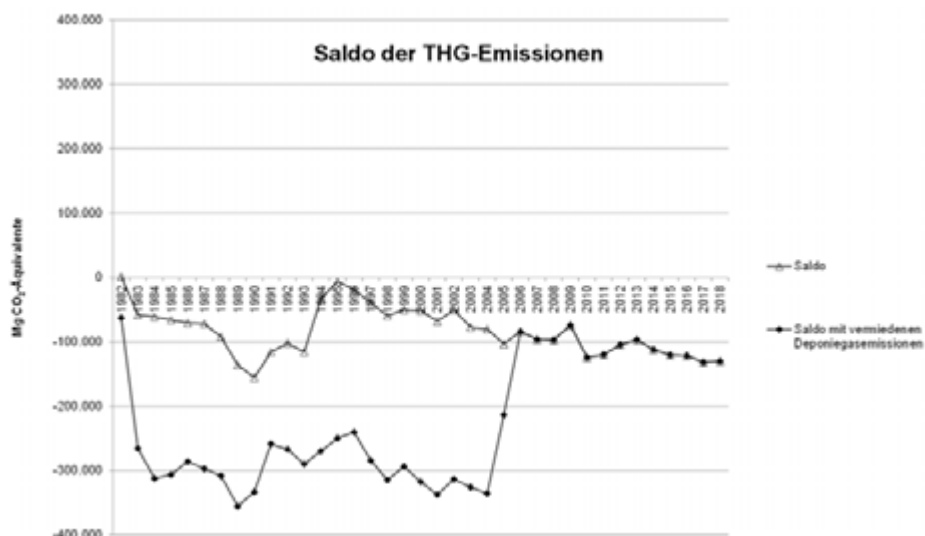


Abb. 3: Saldo der THG-Emissionen im Bilanzzeitraum 1982 - 2018

Tabelle 1 enthält die aufaddierten Ergebnisse, gegliedert nach den einzelnen Bereichen, um zu einer Gesamtbeurteilung der Klimaentlastungseffekte zu kommen. Hier ist besonders interessant, dass die THG-Gutschriften durch die Metallrückgewinnung aus der Rostasche die Einsparungen aus der Fernwärme deutlich übersteigen. Dagegen nimmt sich der Vorteil des Bahntransports, trotz unbestreitbarer ökologischer Vorteile, in der Bilanz recht bescheiden aus, was derzeit auch an der fehlenden Elektrifizierung des Streckennetzes in Ostbayern liegt.

Tab. 1: Gegenüberstellung von kumulierten THG-Emissionen und Gutschriften 1982 – 2018 (Angaben in Mg CO₂-Äquivalenten)

Emissionen		Gutschriften		Saldo
Braunkohle ¹	650.550	Referenzkraftwerk	-6.190.609	
Müll	4.917.906	Stromexport	-2.067.643	
Hilfsbrennstoffe	250.588	Fernwärme	-298.324	
Betriebsstoffe	235.239	Metalle aus Rostasche	-591.948	
		Bahntransport	-385	
Summe	6.054.283		-9.148.910	-3.094.627
		Vermiedene Deponiegasemissionen	-5.158.146	
Summe	6.054.283		-14.307.056	-8.252.774

¹⁾ bis 1988

In der Summe hat der Zweckverband Müllverwertung Schwandorf in seinen ersten 40 Jahren bereits für eine Einsparung von mindestens 3 Millionen Mg CO₂-Äquivalenten gesorgt. Berücksichtigt man weiterhin die vermiedenen Deponiegasemissionen, wächst dieser Wert auf 8,25 Millionen Mg an. Diese Bilanz wäre noch erheblich günstiger, wenn man auch nach 2005 noch die Deponierung von Restmüll gegenrechnen würde, die ja in vielen anderen Ländern bis heute üblich ist.

3 OPTIMIERUNGSMASSNAHMEN

Beim ZMS sucht man ständig nach weiteren Möglichkeiten zur Verbesserung der internen Prozesse sowie zum effizienten Einsatz der bereitgestellten Energie. Seit mehreren Jahren sorgt eine vorgeschaltete Sortieranlage für Sperrmüll für eine verbesserte Wertstoffgewinnung, wodurch spezifische Emissionseinsparungen gemäß Abbildung 1 erreicht werden. Inzwischen ging eine Aufbereitungsanlage für Rostaschen mit effizienterer Metallabscheidung in Betrieb. Gemäß der aktuellen Kenntnis über die Zusammensetzung erscheint ein zukünftig zu hebendes Potenzial von insgesamt etwa 2.000 Mg an Nichteisenmetallen pro Jahr realistisch, womit eine Mindest-Ersparnis von knapp 12.000 Mg CO₂-Äquivalenten verbunden wäre.

Der Wärmeabsatz wurde durch die Errichtung einer Klärschlamm Trocknungsanlage mit einer Kapazität von 50.000 Mg entwässertem Schlamm erhöht. Der erzeugte Trockenschlamm entspricht im Heizwert etwa der früher geförderten Rohbraunkohle und stellt nun seinerseits einen klimafreundlichen Brennstoff dar, dessen Nutzung rund 23.600 Mg CO₂-Äquivalente einsparen könnte (Flamme et al. 2018). Wenig Beachtung finden bisher die bei der landwirtschaftlichen Klärschlammausbringung entstehenden Lachgasemissionen, was hier mit der Vermeidung von weiteren 2.600 Mg Kohlendioxidäquivalenten einhergeht (UBA 2019a). Die gesamte Entlastung beläuft sich also auf über -26.000 Mg CO₂-Äquivalente. Die Möglichkeit zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche wird die bisherigen Erfolge bei der Treibhausgasminderung sowie der Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz noch weiter anwachsen lassen.

4 ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit werden die klimarelevanten Emissionen des ZMS den mit der Abfallbehandlung verbundenen Emissionsminderungen gegenübergestellt. Dabei werden Emissionen aus dem teilregenerativen Brennstoff Müll, den fossilen Hilfsbrennstoffen, den Vorketten der Bereitstellung von Betriebsstoffen und dem Transport berücksichtigt. Die an ein Industrieunternehmen abgegebene Prozessenergie substituiert Braunkohle, einen Energieträger mit hoher spezifischer CO₂-Emission. Hierdurch ergeben sich gegenüber dem (hypothetischen) Weiterbetrieb eines Braunkohlekraftwerkes sehr hohe Einsparungseffekte von etwa 240.000 Mg CO₂-Äquivalenten im Jahr. Überschüssiger Strom und Fernwärme aus dem Müllheizkraftwerk ersetzen die anderweitige Bereitstellung dieser Energieträger mit Emissionen nach dem bundesdeutschen Mix. Sehr starke Treibhausgas-Minderungseffekte traten in den Jahren bis 2005 durch die vermiedene Freisetzung von Deponiegasen auf, da während dieser Zeit Abfälle nach deutschem Recht noch unbehandelt deponiert werden konnten. Durch den Bau einer Klärschlamm-trocknung konnte der Wärmeabsatz weiter gesteigert werden. Daneben führt auch die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen (v. a. Metallen) zu einer deutlichen Verminderung von Treibhausgasen. Demgegenüber ist der Einsparungseffekt durch Transporte von geringer Bedeutung.

Die Addition aller Effekte führt zu rechnerischen Einsparungen von -8,25 Millionen Mg CO₂-Äquivalenten im Zeitraum von 1982 bis 2018. Schon ohne Berücksichtigung von vermiedenen Deponiegasemissionen wurden in diesem Zeitraum etwa -3,1 Millionen Mg CO₂-Äquivalente eingespart. Diese beeindruckenden Zahlen könnten vervielfacht werden, wenn es gelingt, eine Wiederholung dieser 40-jährigen Erfolgsgeschichte im internationalen Raum anzuregen. Durch seinen offenen Umgang mit Wissen möchte der ZMS deshalb beitragen, dass in Ländern mit abfallwirtschaftlichem Nachholbedarf in Europa und darüber hinaus die dort noch übliche Deponierung überwunden und gegebenenfalls auch eine nachhaltige Energieversorgung erreicht wird. Damit kann erheblich mehr für unser Klima getan werden als mit manchen Versuchen das Verbraucherverhalten zu verändern.

LITERATUR

- Dehoust, G. et al. (2010) Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft - Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Hrsg.).
- Flamme, S. et al. (2018) Energieerzeugung aus Abfällen, Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Hrsg.).
- Hoffmann, G. et al. (2011) Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Hrsg.).
- IINAS. (2019) GEMIS - Globales Emissions-Modell integrierter Systeme. Darmstadt: Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien.
- StMUV. (2018) Umweltpakt Bayern - Excel-Tabelle zur Berechnung der CO₂-Äquivalent-Emissionen (CO₂-Rechner). München: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (Hrsg.).
- UBA. (2019a) Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2017. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Hrsg.).
- UBA. (2019b) ProBas Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme, Internetbasierte Datenbank des Umweltbundesamts. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- UBA. (2019c) Entwicklung der spezifischen Kohlendioxidemissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Hrsg.).
- Wünsch, C., & Simon, F. G. (2017) The Reduction of Greenhouse Gas Emissions Through th Source Separated Collection of Household Waste in Germany. In R. Maletz, C. Dornack, & L. Ziyang, Source Separation and Recycling. The Handbook of Environmental Chemistry, vol 63. Cham: Springer.
- ZMS. (2019) Zweckverband Müllverwertung Schwandorf - 40 Jahre im Zeichen des Umweltschutzes. Schwandorf: Zweckverband Müllverwertung Schwandorf (Hrsg.).

Zusammensetzung getrennt gesammelter Leichtverpackungen in städtischen Gebieten – Vergleich Bring- und Holsystem

M. Merstallinger¹, L. Gritsch², J. Lederer², T. Jesacher³, D. Schuch³, I. Binder⁴, V. Kloud⁴, M. Ottersböck⁴ & U. Volk⁴

¹⁾ Technisches Büro Merstallinger, Korneuburg, Österreich

²⁾ CD-Labor für recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, TU Wien, Österreich

³⁾ Altstoff Recycling Austria AG, Wien, Österreich

⁴⁾ MA48, Stadt Wien, Österreich

KURZFASSUNG: In einem dichtbesiedelten Versuchsgebiet in einer Großstadt mit rund 9.500 Einwohnern, wurde versuchsweise eine verdichtete Behälteraufstellung für eine getrennte Sammlung von Leichtverpackungen auf nahezu allen Liegenschaften durchgeführt. Um die Veränderungen sowohl bei den Sammelmengen als auch bei der Qualität der Sammelware festzustellen, wurden Abfallanalysen im April 2021 (vor der Umstellung), Oktober 2021 (rund 4 Monate nach der im Juni erfolgten Behälteraufstellung) und im April 2022 genau ein Jahr nach der ersten Analyse, durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine Steigerung der Sammelmengen und eine recht konstante Qualität der beworbenen Fraktionen.

1 HINTERGRUND

Die Umsetzung des EU-Kreislaufwirtschaftspakets erfordert unter anderem die Erfüllung von erhöhten Recyclingzielen für Verpackungsabfälle aus Kunststoff, Eisenmetall und Aluminium. Ein wichtiges Instrument dafür ist die Erfassung über die getrennte Altstoffsammlung von Leichtverpackungen (LVP). Ergebnisse aus vielen Ländern Europas zeigen jedoch, dass dies insbesondere Städte vor große Herausforderungen stellt, da die getrennte Sammlung aufgrund der gegebenen Rahmenbedingungen (z.B. hohe Einwohnerdichte, große Wohnanlagen, erhöhte Anonymität und begrenzte Flächen in Wohnungen und Innenhöfen) geringere Sammelquoten erreicht als in ländlichen Gebieten (Feil et al. 2017; Lederer et al. 2022; Seyring et al. 2016).

Eine Möglichkeit, die Sammelmengen von LVP-Abfällen zu erhöhen ist es, das getrennte Sammelssystem von einem Bringsystem, basierend auf öffentlichen Abgabestellen wie z.B. Altstoffsammelinseln, auf ein Holsystem mit Sammelbehältern in den Liegenschaften umzustellen (Bertanza et al. 2021). Zwar können dadurch Sammelmengen erhöht werden, jedoch zeigen Beispiele aus anderen Ländern auch, dass sich bei derlei oder ähnlichen Verdichtungen des Sammel-systems die Qualität der gesammelten Mengen in Punkto Zusammensetzung und Anteil von Fehlwürfen auch verschlechtern kann (Haupt et al. 2018).

2 METHODEN

Dieser Beitrag beschreibt einen Teil der Ergebnisse eines Versuchs zur Umstellung der getrennten Sammlung von LVP-Abfällen (Kunststoffhohlkörper, Getränkeverbundkartons, Metallverpackungen) in einem städtischen Sammelgebiet, durchgeführt in den Jahren 2021/2022. Das Gebiet umfasst rd. 0,31 [km²] Fläche, hat eine Bevölkerung von rd. 9.500 [EW] und damit eine Bevölkerungsdichte von rd. 30.800 [EW/km²]. Das entspricht in etwa 110-mal dem Bundeswert sowie 5-mal dem Gesamtwert dieser Stadt, ausgedrückt in [EW/km² Dauersiedlungsraum] (BMLRT 2021). Das Versuchsgebiet bildet zwei für die Stadt typische Siedlungsformen ab (dichtverbauter Altbaubestand und großflächige Siedlungsanlagen) und liegt bei den getrennt erfassten Mengen deutlich unter dem Wert der gesamten Stadt.

Das untersuchte Ziel des in diesem Beitrag beschriebenen Versuchs war es, festzustellen, welche Auswirkungen die Ergänzung eines reinen Bring- durch ein Holsystem (d.h. durch die Aufstellung der Behälter direkt in den Müllräumen bzw. bei den Müllbehälterstandplätzen) auf die Sammelmengen, die Qualität der gesammelten Altstoffe und die Sammellogistik hat und ob diese

Maßnahme eine zweckmäßige Lösung ist, um die in Zukunft steigenden Recyclingziele zu erreichen.

Der Versuch dauerte von Mai 2021 – April 2022. Vor und während des Versuchs wurden Mengen- und Sortieranalysen durchgeführt (Nullanalyse April 2021, Zwischenevaluierung Oktober 2021, Abschlussevaluierung April 2022). Bei den drei Beprobungen wurden jeweils ca. 800 kg Restmüll aus den Restmüllbehältern und zwischen 400 und 700 kg LVP aus den LVP-Behältern bzw. Fahrzeugen als Analyseproben genommen und mittels händischer Sortieranalyse untersucht. Aus den Restmüllproben wurden zur Durchführung der Analysen repräsentative Stichproben gezogen, die analysierten LVP-Proben entsprachen zu 100% der im jeweiligen Zeitraum angefallenen Abfallmenge.

Die zusätzliche Aufstellung von Behältern auf den Liegenschaften wurde von Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit (Information der Hausverwaltungen, Bereitstellung einer Vorsammeltasche inkl. eines Infofolders für jeden Haushalt) begleitet.

3 ERGEBNISSE

Die erste Mengenanalyse zeigt, dass vier Monate nach der Umstellung die LVP-Gesamtsammel-mengen im ausgewählten Sammelgebiet von 2,7 auf 4,7 [kg/EW.a] erhöht werden konnten. Dennoch liegen diese pro Kopf weiterhin unter der durchschnittlichen Sammelmenge dieser Stadt im Jahr 2021 von 6,0 [kg/EW.a].

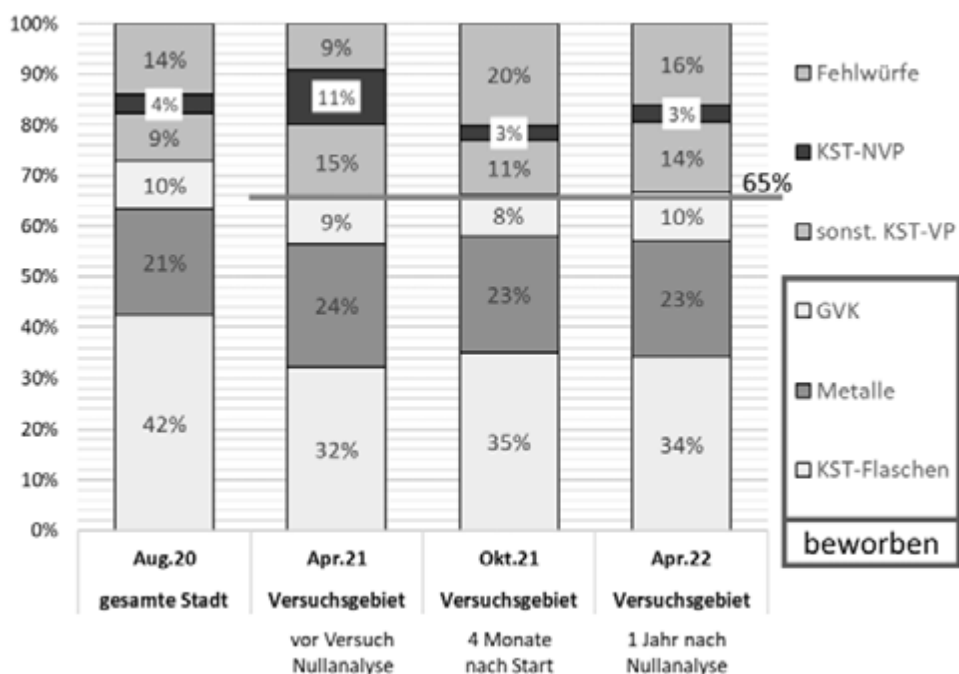


Abb. 1: Ergebnisse der drei Sortieranalysen, getrennt nach öffentlichen Behältern und Behältern auf den Liegenschaften, bezüglich der Zusammensetzung, im Vergleich zur gesamten Stadt

Die in Abbildung 1 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass der Anteil der beworbenen Fraktionen, zu welchen Kunststoffhohlkörper, Metallverpackungen und kleinteilige Metallnichtverpackungen sowie Getränkeverbundkarton gehören, zunächst von 65% bei der Nullanalyse auf 66% bei der Zwischenevaluierung leicht gestiegen sind. Am Ende des Versuchs konnte der Anteil auf 67% erhöht werden. Im Vergleich zum Durchschnittswert dieser Stadt ist dieser Anteil um 6% Punkte niedriger.

Neben der erwünschten Zunahme der beworbenen Abfallfraktionen wurde zwischen Null- und Evaluierungsanalyse jedoch auch eine deutliche Zunahme von Fehlwürfen – insbesondere von Glasverpackungen – beobachtet. Als Fehlwürfe wurden dabei einerseits Abfallfraktionen, die weder Zielfraktionen der getrennten LVP-Sammlung in dem Gebiet noch stoffähnlich (wie Papierverpackungen, Glas, Textilien, Biomüll, Restinhalte und Restmüll) sind, angesehen. Der am Ende des Pilotversuchs festgestellte Fehlwurfanteil lag jedoch im Bereich der für diese Stadt üblichen Werte.

Bei nicht-beworbenen, jedoch den beworbenen LVP-Abfällen stoffähnlichen Fraktionen (nicht beworbene Kunststoff-Verpackungen und Nicht-Verpackungen) sank der Anteil zwischen Null- und Evaluierungsanalysen. Dies gilt insbesondere für Nicht-Verpackungen (Anm.: Ein Vergleich mit den Durchschnittswerten der Stadt und verschiedener früherer Ergebnisse legt jedoch nahe, dass es sich hier bei der Nullanalyse um einen Ausreißer handeln könnte). Der Anteil der sonstigen, nicht beworbenen Kunststoffverpackungen lag im Versuchsgebiet im Vergleich zum Durchschnitt generell höher.

4 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse zeigen, dass im Versuchsgebiet die Ergänzung des bestehenden Bring- durch ein Holsystem für Verpackungsabfälle (Kunststoffhohlkörper, Getränkeverbundkartons, Metallverpackungen) mit einer Steigerung der LVP-Gesamtsammelmengen um über 70 % einher ging. Dennoch lag der Wert in diesem dicht besiedelten Versuchsgebiet (in kg/EW/a) immer noch unter der in der gesamten Stadt gesammelten Menge pro Einwohner, was auch auf die besondere Sozialstruktur des Versuchsgebiets zurückzuführen ist.

Die Sortieranalysen zeigen, dass die Qualität, ausgedrückt in Anteil der nicht beworbenen Fraktionen in der beprobten LVP-Fraktion im Vergleich zu den beworbenen Fraktionen, nach einem starken Rückgang wieder anstieg und sich somit auf das ursprüngliche Niveau einpendelte.

Drückt man die Qualität durch den Anteil an reinen Fehlwürfen (inkl. Restinhalte) aus, so sank die Qualität; insgesamt lag diese aber etwa im Bereich der Durchschnittswerte dieser Stadt.



Abb. 2: Kunststoff-Nichtverpackungen bei der Nullanalyse im April 2021

Die erzielte Steigerung der LVP-Gesamtsammelmenge im untersuchten Sammelgebiet zeigt, dass in vergleichbaren Sammelgebieten einer dicht besiedelten Stadt ein gewisses Restpotenzial zur getrennten Sammlung durch Erhöhung des Servicegrads abgeschöpft werden kann, diese Maßnahmen jedoch allein noch keinen ausreichenden Beitrag zur Erreichung der ambitionierten Recyclingquoten für Kunststoffverpackungen leisten können. Inwieweit sich die Abschöpfung des Potenzials über die Zeit weiterentwickelt, könnte durch eine Verlängerung des Monitorings der im Versuchsgebiet getrennt erfassten LVP-Abfällen auch zukünftig untersucht werden. Sollte sich zeigen, dass die getrennt erfassten LVP-Mengen nicht weiter gesteigert werden können, so wären zusätzliche Maßnahmen zu überlegen, sowohl im Bereich des Produktdesigns von

Kunststoffverpackungen, der Bewusstseinsbildung, durch Anreizsysteme zur getrennten Sammlung als auch technisch durch eine ergänzende automatisierte Restmüllsortierung (ARA 2022; Feil et al. 2017; Lederer et al. 2022). Dahingehend sollten auch zukünftige Untersuchungen ausgerichtet sein.

5 ZUM PROJEKT

Der vorliegende Beitrag ist Teil eines Projektes der Magistratsabteilung Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien (MA 48) und der Altstoff Recycling Austria AG (ARA), sowie der Forschungsinitiative CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der TU Wien. Das CD-Labor bedankt sich zusätzlich beim Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort, der Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung, der Christian Doppler Forschungsgesellschaft, der ARA AG und der Wien Energie GmbH.

LITERATUR

- Altstoff Recycling Austria – ARA, 2022. Kreislaufwirtschaft gegen Klimakrise. Zugriff 07.07.2022. <https://www.ara.at/news/kreislaufwirtschaft-gegen-klimakrise>
- Bertanza, G., Mazzotti, S., Gomez, F.H., Nenci, M., Vaccari, M., Zetera, S.F., 2021. Implementation of circular economy in the management of municipal solid waste in an Italian medium-sized city: A 30-years lasting history. *Waste Management* 126, 821-831.
- BMLRT, 2021. Zahlen und Fakten 2021. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT), Wien.
- Feil, A., Pretz, T., Jansen, M., Thoden van Velzen, E.U., 2017. Separate collection of plastic waste, better than technical sorting from municipal solid waste? *Waste Management & Research* 35, 172-180.
- Haupt, M., Waser, E., Würmli, J.C., Hellweg, S., 2018. Is there an environmentally optimal separate collection rate? *Waste Management* 77, 220-224.
- Lederer, J., Bartl, A., Blasenbauer, D., Breslmayer, G., Gritsch, L., Hofer, S., Lipp, A.-M., Mühl, J., 2022. A review of recent trends to increase the share of post-consumer packaging waste to recycling in Europe. *Detritus* 19, 3-17.
- Seyring, N., Dollhofer, M., Weißenbacher, J., Bakas, I., McKinnon, D., 2016. Assessment of collection schemes for packaging and other recyclable waste in European Union-28 Member States and capital cities. *Waste Management & Research* 34, 947-956.

Refine the circular economy by rethinking it - a holistic approach for the advanced circular economy

M. Nippraschk¹, P. Wallat ², S. Lawrenz ³, D. Goldmann¹, C. Minke¹ & A.Lohrengel²

¹⁾ TU Clausthal, Institute of Mineral and Waste Processing, Recycling and Circular Economy Systems, Clausthal, Germany

²⁾ TU Clausthal, Institute of Mechanical Engineering, Clausthal, Germany

³⁾ TU Clausthal, Center for Digital Technologies, Goslar, Germany

ABSTRACT: The Circular Economy is a recent economic approach aiming to transform the linear economy into a sustainable system including the economic, ecological, and social dimensions. The transformation faces various barriers and obstacles, each in a different field inside the value system. Three different (sub-system) approaches were developed independently to address those hurdles and provide solutions to mitigate them. The paper will briefly describe those approaches, including their strengths and weaknesses. Out of each of the three individual sub-systems, these sub-systems are combined in a holistic approach and presented as the Advanced Circular Economy. The system is developed on a meta-level. Nevertheless, a very crucial example, namely traction batteries for electric vehicles, will be given to show the relevance of the system within the current economic surroundings and explain the overall system of the Advanced Circular Economy.

1 INTRODUCTION AND MOTIVATION

The Circular Economy (CE) is the antithesis of the “Take-Make-Waste” principle. The principles and strategies behind the Circular Economy have been published and discussed in countless publications (Kirchherr et al. 2017). However, the basic idea is to rethink value chains in the long term and that the products are only recycled after the steps (depending on the definition): Reduce, Reuse, Repair, Refurbishment, Remanufacturing, Repurpose to recycle the raw materials. Disposal should be the last step, but ideally should be avoided completely. Nevertheless, there is still a difference between the Circular Economy as described in the literature and reality. This difference can be attributed to an information gap due to a lack of information exchange between all stakeholders in the value chain (Lawrenz et al. 2021).

This paper presents a conceptual expansion of the Circular Economy towards an Advanced Circular Economy. The Advanced Circular Economy complements and expands the familiar CE concept with digitalization methods and information technologies, including its forward and reverse supply chain. Nevertheless, these approaches and technologies alone cannot solve all recent CE problems mentioned above. The reason is the lack of an interface between the individual systems. Such an interface will enable a connection between the systems, pass on their strengths to others, and mitigate some of their weaknesses.

2 BACKGROUND OF EXISTING CIRCULAR ECONOMY SOLUTIONS

Several sub-systems are necessary to achieve an advanced circular economy as discussed before and described in our previous paper (Lawrenz et al. 2021). Figure 1 is showing an abstract overview of our advanced circular economy framework.

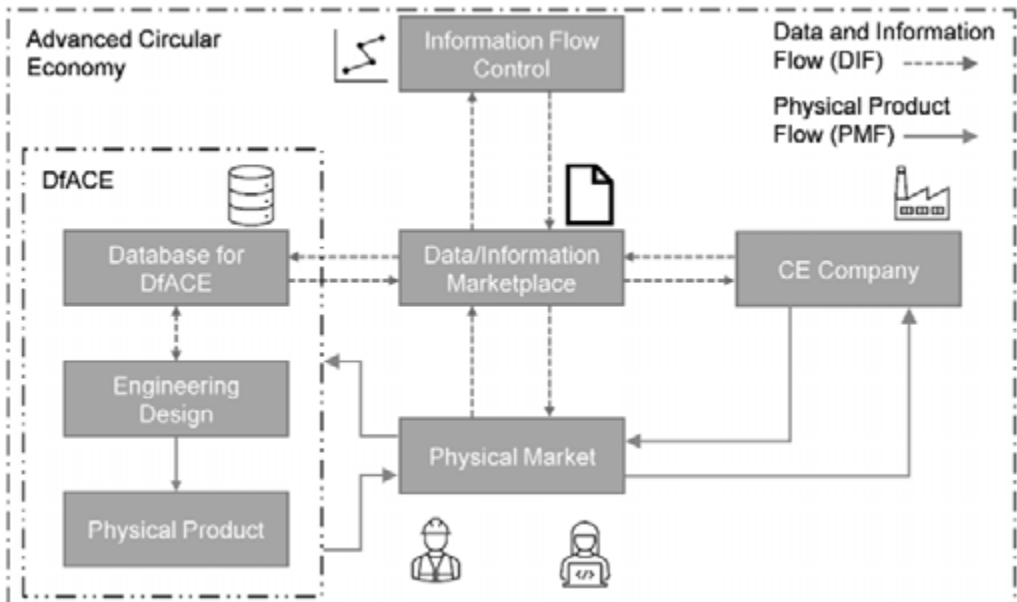


Fig. 1: Overview of the Advanced Circular Economy with three sub-systems: DfACE, Information Marketplace, and Information Flow Control

The main sub-systems will be described in the following sections:

2.1 Design for an Advanced Circular Economy (DfACE)

Engineering Design for an Advanced Circular Economy (DfACE) is a supporting method for the product design process. The aim is to provide an extension for the standardized development process to aid the Circular Economy (Wallat et al. 2022). By utilizing knowledge about the impact of material combination and joint technology, the product can be designed more suitable for a circular economy (Wallat & Lohrengel 2021a), (Wallat & Lohrengel 2021b). Design engineers will be supported with specific information regarding their drafts with suggestions instead of strict rules (Wallat & Lohrengel 2020). Therefore, engineers can choose a suitable alternative with consideration of the available technology within their company. In case no welding equipment is accessible, they are not obliged to use welding as an alternative; the same is valid if there are restrictions or laws against specific joint techniques.

Materials can also be changed if the properties are not sufficient for a state-of-the-art recycling technique. However, materials are chosen to fulfill a certain function in the product. Therefore, it is not possible to interchange them freely. By considering the material properties for the function in context with their influence within the recycling process, the design engineer can be provided with alternative materials that can also handle the targeted function but are more compatible for recycling.

By investing the time and resources into well-considered joint technology for non-compatible materials in the recycling process or sacrificing some functionality to improve the recyclability, the whole product, and its parts can be designed more suitable for a circular economy. While considering, that not every company could use every joint technology and has access to every material. The downside of the investment in a well-designed CE product is the competitiveness of the market. More company resources are needed to design such a product. A competitor, that will not design this way, might be able to provide products with the same quality but for a cheaper price. Thus, engineering design for an Advanced Circular Economy comes with a risk for the company if it is not considered for the whole life cycle and all stakeholders.

2.2 Data and Information Marketplace

Data and information are key for the Advanced Circular Economy. Static data and information, such as the production date, materials, and materials of products, are necessary i.e., for decisions towards the R-Strategies, to enhance circular economy processes, and much more (Lawrenz et al. 2021), (Blömeke et al. 2020), (Kintscher et al. 2021). Furthermore, dynamic information is generated over the product lifetime, which is essential for tracing products or determining product conditions.

Exchanging data and information accordingly provides a couple of advantages to achieving an Advanced Circular Economy. However, most stakeholders are currently unwilling to share this data and information since they are afraid of sharing company secrets or losing competitive advantages. Another reason is that a legal framework for exchanging information is missing, and Data and Information Marketplaces enable this exchange by providing a legal framework. A Data and Information Marketplace is where stakeholders can trade their information guts and match with other potential stakeholders (Lawrenz & Rausch 2021), (Lawrenz et al. 2022).

2.3 Information Flow Analysis and Management (Information Flow Control)

The Circular Economy is considered a complex and non-linear system, furthermore, it even represents an economic system. To understand such a complex value-generating system and to be able to make well-founded decisions, it is necessary to use models and simulations to analyze information flows including; for example, information on the product, component, or raw material level, which allow conclusions to be drawn about market behavior and estimations in specific situations. System dynamic is a simulation-based approach to understanding the behavior of non-linear and complex systems and analyzing and managing the information flow (Soullier 2018).

The System Dynamics approach can be used to analyze and manage complex value chains at the raw material and component level, as well as the influence of information on them over a longer period. In addition to preceding and subsequent functions, the calculated parameters are influenced by pre-periodic states (e.g., CE strategies). The understanding of this behavior can causally predict and develop future actions and behaviors of all market participants (Nipprashk & Goldmann 2020).

A disadvantage is the extensive amount of data needed for the simulation. This leads to lengthy model development, which may be associated with high costs. Also, a high degree of system understanding is necessary before model development. Thus, applying the system dynamics approach is not applicable to every problem (Bossel 1989). However, for the simulation and analysis of the value chain for lithium-ion traction batteries and the investigation of CE strategies, it is highly suited.

3 HOLISTIC APPROACH TO THE ADVANCED CIRCULAR ECONOMY

The three sub-systems as one are already a big step forward toward a Circular Economy. Nevertheless, they have particular strengths at different levels (operational, tactical, or strategic) or are specifically designed for one stakeholder within the value chain. In addition, the individual approaches are sometimes more focused on the physical side (products, components, and raw materials) and sometimes more on the information side, negatively impacting individual stakeholders' economic, environmental, or social goals. This section presents a holistic approach to achieving an Advanced Circular Economy by combining the three unique approaches of the last sections. This combination creates synergies at all levels and balances the weaknesses of the sub-systems with the strengths of the other methods.

Within the system, it is necessary to divide two different flows: the *Physical-Material-Flow (PMF)* and the *Data and Information-Flow (DIF)*. The PMF is related to all physical exchanges between stakeholders. The product itself, the inherent assemblies, parts, materials as well as energy. As shown in Figure 1 the product will be designed within the DfACE sub-system (cf. section 2.1). DfACE will add products to the PMF. Products will be sold, used, and maintained within the physical market. Afterward, the flow will be diverted successively into the sub-system of the CE companies. CE Companies are all stakeholders who have a direct or indirect relationship with the product throughout its life. This applies to every technical level of the product. From the product

itself to the component level to the raw material level, includes all planning levels (strategic, tactical, and operational) and every stage from e.g., mining, design, production, and use to CE strategies. Different decisions ought to be made by the CE companies. Either prolonging operations to provide products, assemblies, or even single parts for another use phase for the physical market or recycling operations to make materials accessible again for the DfACE sub-system.

Alongside the PMF there must be a DIF. Under normal circumstances, the generated data and information will stay close to the original generator, which is understandable in terms of intellectual property and the company's internal security reasons (cf. section 2.2). However, without centralized data gathering, the Advanced Circular Economy could be prevented or substantially more complicated to implement. An Information Marketplace can gather single data and transform the set into information regarding the products in the PMF. Thus, enabling or easing circular intentions for CE companies. In addition, the "Information Marketplace" sub-system is central to communicating with the Information Flow Control sub-system. As the Information Marketplace relays the collected data and information, it can react to each decision of CE Companies, simulate, and analyses them over a long time, and provides decision support for the market participants (cf. section 2.3). The resulting data and information are in turn transmitted back to the other sub-systems via the Information Marketplace.

The decisions of the market participants, including the CE companies, about the future design of the product, result in new requirements and properties for them, which in turn have an impact on the market and its stakeholders. These new requirements and properties are transmitted to DfACE, which takes them into account in the redesign or new design of the product.

It is important to point out that every decision will have an impact on the entire value chain and generate new adapted decisions for downstream processes. Therefore, the interaction of the sub-systems is of immense importance, as this enables to provide missing data and information reliably, as well as to simulate and analyze changing requirements and properties in the long term and consider changing circumstances in the design process. This makes it feasible to ensure sustainable development, including economic, ecological, and social goals.

4 DISCUSSION OF THE APPROACH IN THE CONTEXT OF LITHIUM-ION BATTERIES

In the following section, the theoretically presented holistic approach is discussed using the lithium-ion traction battery as a case study. This example is ideally suited to elicit the possibilities of the approach. The socio-economic importance of LIB is not mentioned in this paper due to the extensive variety of articles already published in journals, conferences, news, or political agendas. The LIB, the most important component of the electric vehicle, has experienced a massive market diffusion in recent years, which will continue in the next few years and will replace a substantial market share of the combustion engines in Europe in the foreseeable future. Depending on the study and scenario, this will happen sooner or later (IEA 2021). Nevertheless, there are differences in the types of batteries used, which mainly relate to the raw material composition of the cathode of a battery. Due to the heterogeneous requirements, batteries are developed according to their use, which must have correspondingly different properties. The most essential properties usually relate to cost, lifespan, performance, safety, specific power, and specific energy capacity (Ruiz 2018).

This paper applies the holistic approach to two different battery types to demonstrate their relevance. The batteries with nickel-manganese-cobalt cathodes (NMC) and lithium-iron-phosphate cathodes (LFP). The two battery types chosen are ideally suited because they have or will have a high market share and their properties are very contrasting. NMC batteries have long been considered superior to LFP batteries in the automotive sector because of their higher specific energy content and higher specific power. However, LFP batteries have caught up in this area. Their low cost (no expensive raw materials such as cobalt, nickel, or manganese) have advantages that make them more relevant from an economic point of view (Haram et al. 2021). This results in different CE strategies and requirements e.g., the design of the battery systems or capacity planning for Remanufacturing, Recycling, etc.

In this chosen Scenario, the two selected battery types based on their properties to meet the requirements of the CE strategies Repurpose and downstream Recycling are examined. A Repurpose of automotive batteries is, for example, stationary storage systems. It can be assumed

that a higher-quality CE strategy (hierarchy ordered from Reuse to Recycling) causes a higher effort and higher costs in design, production, maintenance, etc. Furthermore, it can be assumed that LFP batteries are more suitable for repurposing due to their properties than NMC batteries, which in turn are more likely to take the direct step to recycle. While this contradicts the principles of CE, today's NMC batteries are cobalt-rich. This may make it possible to use fewer cobalt reserves as the cobalt content in NMC batteries is successively reduced.

Depending on the study, different market diffusions of the different battery technologies are acceptable. XU et al (Xu et al. 2020), for example, developed three scenarios: One scenario (Scenario 1), in which the trend of NMC batteries continues, and an LFP scenario (Scenario 2), which assumes higher total market shares than NMC batteries for LFP and not only in the commercial vehicle market (e.g., buses). The third scenario deals with solid-state batteries and is to be omitted here. As already mentioned, this has an impact on individual capacity planning, among other things. In scenario 1, more NMC batteries are installed in electric vehicles (EVs), so under the selected assumptions, more recycling capacity must be available sooner after the use phase. A complex design for EV batteries to be reused as stationary storage is not necessary. The DfACE receives this data and information via the Information Marketplace from the interests of the physical market (DIF). The resulting PMF is in turn passed on to the physical market. At the same time, the same DIF is transmitted to the Information Control sub-system and the simulation and analysis by the System Dynamics approach are performed and the results are transmitted back to the Information Marketplace. These are made available to the CE Companies, which in turn increase their capacities for recycling and decrease their capacities for repurposing since they know from the Information Flow Control sub-system which amount of battery types are currently used to what extent and expected for CE operations at which time. The experiences (within DIF) that the CE Companies gain with the processing of the batteries are fed back to DfACE via the Information Marketplace. DfACE can learn from these and adapt, adjust or improve its design processes for the next generation of batteries. In scenario 2, the same routine would be followed, except that the capacity for repurposing would be increased due to the high market share of LFP batteries and the recycling capacity would have to be built up later.

5 CONCLUSION AND OUTLOOK

The objective of this paper was to present an integrated approach to an advanced circular economy. The proposed approach for an Advanced Circular Economy is based on the following three main components:

Design for Advanced Circular Economy: A digital toolbox for supporting the product design process. The toolbox is based on a database for recycling technologies and supports design engineers in the design of products in a more circular way considering particular R-strategies (Kirchherr et al. 2017).

Data and Information Marketplace: A marketplace that provides a legal framework to exchange and trade data and information. In the particular domain of the Circular Economy, it is essential to exchange data and information regarding product and material flows.

Information Flow Analysis and Management: Based on the system dynamics approach, complex systems, such as the circular economy, can be modeled. Thereby long-term strategies for the circular economy can be developed and controlled.

The three main components support each other in various ways and build together the foundation of an Advanced Circular Economy. Thereby, the data and Information Marketplace is the key component to connecting the different systems and providing a continuous data and information flow. These data and information are for example necessary inputs for the DfACE toolbox, or other stakeholders inside the circular economy, such as customers, repairers, or recyclers. Furthermore, the Information Flow Analysis and Management (Information Flow Control) also provides important input data for other companies and stakeholders. A legal framework is already given by providing this data and Information Marketplace, and the exchange process is simplified—the example of lithium-ion batteries is presented and discussed in the approach in Section 4.

To verify this theoretic system, an empiric examination is needed – involving several stakeholders. Therefore the DIF and PMF have to be synchronized and a definition is necessary, of how

far stakeholders will be affected by both Flows and at what time. In addition, the generated static and dynamic information along both flows have to be analyzed in detail.

REFERENCES

- Blömeke, S., Mannenga, M., Herrmann, C., Kintscher, L., Bikker, G., Lawrenz, S., . . . Spengler, T. (2020). Recycling 4.0 - An Integrated Approach Towards an Advanced Circular Economy. *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability*. doi:10.1145/3401335.3401666
- Bossel, H. (1989). *Simulation dynamischer Systeme: Grundwissen, Methoden, Programme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Haram, M., Lee, J., Ramasamy, G., Ngu, E., Thiaharajah, S., & Lee, Y. (2021). Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges. *Alexandria Engineering Journal*.
- IEA. (2021). *Global EV Data Explorer: Explore and download the full data behind the Global EV Outlook*. Abgerufen am 10. 07 2022 von <https://www.iea.org/articles/global-ev-data-explorer>
- Kintscher, L., Lawrenz, S., & Poschmann, H. (2021). A life cycle oriented data-driven architecture for an advanced circular economy. *Procedia CIRP*.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. doi:10.1016/j.resconrec.2017.09.005
- Lawrenz, S., & Rausch, A. (2021). Don't Buy A Pig In A Poke A Framework for Checking Consumer Requirements In A Data Marketplace. *Hawaii International Conference on System Sciences 2021*. doi:10.24251/HICSS.2021.566
- Lawrenz, S., Nippraschk, M., Wallat, P., Rausch, A., Goldmann, D., & Lohrengel, A. (2021). Is it all about Information? The Role of the Information Gap between Stakeholders in the Context of the Circular Economy. *Procedia CIRP, Volume 98*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.118>
- Lawrenz, S., Poschmann, H., Stein, V., & Rausch, A. (2022). Data Trading Similarity Signature An Extended Data Trading Framework for Human and Non-Human Actors. *Hawaii International Conference on System Sciences 2022*. doi:10.24251/HICSS.2022.600
- Nippraschk, M., & Goldmann, D. (2020). Recycling 4.0 - System Dynamics als Steuerungstool für Rohstoff- und Informationsflüsse in der Kreislaufwirtschaft. (T.-K. Verlag, Hrsg.) *Recycling und Sekundärrohstoffe, Edition 13*.
- Ruiz, V. (2018). *Standards for the performance and durability assessment of electric vehicle batteries - Possible performance criteria for an Ecodesign Regulation*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/2474
- Soullier, M. (2018). *Entwicklung systemdynamischer Stoffstrommodelle zur Simulation von regionalen Kupferkreisläufen*.
- Wallat, P., & Lohrengel, A. (2020). Die Einbettung kreislaufgerechter Konstruktionsansätze in den Produktentstehungsprozess. 18. *Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2020*.
- Wallat, P., & Lohrengel, A. (2021a). Der Einfluss der Fügetechnik auf die Konstruktion von Produkten für das Kreislaufwirtschaftssystem. (D. Kraus, K. Paetzold, & S. Wartzack, Hrsg.) *DS 111: Proceedings of the 32nd Symposium Design for X. Proceedings of the 32nd Symposium Design for X*.
- Wallat, P., & Lohrengel, A. (2021b). Erstellung einer Materialdatenbank zur digitalen Systematesierung im Konstruktionsprozess für kreislaufgerechte Produkte. (C. Z. Materialtechnik, Hrsg.) *4. Symposium Materialtechnik Band 10*.
- Wallat, P., Lawrenz, S., & Lohrengel, A. (2022). A Knowledge-based Product Design Assistance for the Advanced Circular Economy. *10th International Conference on Life Cycle Management (LCM 2021)*. doi:10.1051/e3sconf/202234909004
- Xu, C., Dai, L., Gaines, L., Hu, M., Tukker, A., & Steubing, B. (2020). Future material demand for automotive lithium-based batteries . *Commun Mater* 1, 99 . doi:<https://doi.org/10.1038/s43246-020-00095-x>

Durch Konsument:innen beeinflusste Qualitäten von Mehrkomponenten-Leichtverpackungen im Siedlungsabfall

L. Gritsch¹, M. Merstallinger², D. Schuch³ & J. Lederer¹

¹⁾ TU Wien, CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, Wien, Österreich

²⁾ Technisches Büro Merstallinger, Korneuburg, Österreich

³⁾ Altstoff Recycling Austria AG; Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Das Erreichen der im Kreislaufwirtschaftspaket der EU festgelegten Recyclingziele für Kunststoffverpackungen erfordert umfangreiche Maßnahmen aller beteiligten Branchen und Akteur:innen, von Verpackungshersteller:innen über Konsument:innen bis hin zu Abfallbehandler:innen. Hierbei ist es wesentlich, recyclingfähige Verpackungen herzustellen, welche durch die Konsument:innen einfach getrennt und gesammelt werden können, um hochqualitative Sekundärrohstoffe zur Verfügung stellen können. Darum wurde in der vorliegenden Arbeit untersucht, in welcher Qualität theoretisch leicht zerlegbare Mehrkomponenten-Leichtverpackungen (Mehrkomponenten-LVP) im Siedlungsabfall vorgefunden werden und welche Rückschlüsse daraus auf das Verhalten der Konsument:innen bei der Entsorgung gezogen werden können.

Die Ergebnisse zeigen, dass durchschnittlich nur 2% der im Restmüll vorgefundenen und 56% der in der getrennten LVP-Sammlung vorgefundenen Mehrkomponenten-LVP vor ihrer Entsorgung in ihre Einzelkomponenten zerlegt werden. Um die praktische Recyclingfähigkeit derartiger Verpackungen zu erhöhen und die verwendeten Rohstoffe im Kreislauf zu halten, könnten Entorgungshinweise stärker kommuniziert werden, um Konsument:innen eine Hilfestellung zur richtigen getrennten Sammlung zu geben.

1 EINLEITUNG

Um die Recyclingziele des EU-Kreislaufwirtschaftspaketes (European Commission 2018) für Leichtverpackungsabfälle – darunter fallen insbesondere Kunststoffverpackungen sowie Verbundverpackungen aus unterschiedlichen Packstoffen – zu erreichen ist es einerseits notwendig, Leichtverpackungen (LVP) verstärkt getrennt zu sammeln und andererseits, diese auch in einer für das Recycling geeigneten Qualität zur Verfügung stellen, sei es hinsichtlich Fehlwurfanteil in der Sammlung, Verunreinigungen oder Recyclingfähigkeit der Verpackung selbst. Die Qualität der getrennt gesammelten LVP und folglich der daraus herzustellenden Sekundärrohstoffe für ein mechanisches Recycling hängt dabei maßgeblich von drei Faktoren ab: Erstens vom Design der LVP selbst, zweitens vom Servicelevel und der definierten Zielfraktion des getrennten Sammel-systems und drittens vom Verhalten der Konsument:innen. Während sowohl das Design der Verpackung, als die Sammel-systeme gut auf die Umsetzung der geforderten Recyclingfähigkeit abgestimmt werden können und gesetzlich auch dahingehend verankerbar sind, ist das Verhalten der Konsument:innen ausschließlich über Kommunikation und daher nur bedingt zu steuern. Die Umsetzung eines funktionierenden *Design for Recycling* ist somit nicht nur eine technische, sondern auch eine kommunikative Herausforderung. Dieser Thematik wird in dieser Arbeit am Beispiel einer LVP bestehend aus verschiedenen Komponenten (Mehrkomponenten-LVP) nachgegangen.

Bei der untersuchten Verpackung handelt es sich um eine Karton-Kunststoff-Metall-Kombination, die für Milchprodukte, vor allem Joghurt, verwendet wird. Konkret wird bei der Mehrkomponenten-LVP auf einen Kunststoffbecher aus Polypropylen oder Polystyrol (PP/PS) ein Karton-Sleeve (Kartonmantel) aufgebracht. Verschlussen wird der Becher üblicherweise mit einer Aluminium-platine (Alu). Der Informationstransfer zur richtigen Trennung der Mehrkomponenten-LVP erfolgt über den bedruckten Karton-Sleeve, der Kunststoffbecher selbst bleibt unbedruckt, wodurch dieser die besten Voraussetzungen für ein hochwertiges Recycling mit sich bringt. Beworben wird die Mehrkomponenten-LVP als nachhaltige Alternative zu konventionellen Kunststoffbechern, da

aufgrund der einfachen Zerlegbarkeit die einzelnen Komponenten der getrennten Sammlung zu-geführt werden können. Weiters kann durch den Karton-Sleeve nicht nur ein Drittel des Kunststoffs im Vergleich zu einem Einkomponentenbecher eingespart werden, sondern dieser Sleeve kann auch aus bis zu 80% Recyclingmaterial hergestellt werden (Greiner Packaging International GmbH n.d.). Insgesamt besitzt diese Mehrkomponenten-LVP eine hohe theoretische Recyclingfähigkeit (Pomberger 2020). Zusätzlich hat Papier bei Konsument:innen ein positives Image und wird oft als umweltfreundlichstes Verpackungsmaterial wahrgenommen (Nguyen et al. 2020). Als Folge könnten derartige Produkte vermehrt nachgefragt werden (Fachverband Faltschachtel-Industrie e.V. n.d.). Die positive Umweltbilanz der Mehrkomponenten-LVP hängt allerdings auch davon ab, ob sie von den Konsument:innen wirklich zerlegt wird und die einzelnen Komponenten anschließend dem richtigen Sammelsystem zugeordnet werden. Ob dies der Fall ist, ist bis dato noch wenig untersucht. Diese Arbeit geht deshalb der Forschungsfrage nach, wie Konsument:innen eine theoretisch sehr recyclingfähige Mehrkomponenten-LVP für Milchprodukte bestehend aus Kunststoff, Karton und Metall entsorgen und welche Schlüsse daraus hinsichtlich der praktischen Recyclingfähigkeit der Verpackung gezogen werden können?

2 METHODE

Die Daten für die vorliegende Untersuchung wurden im Zuge eines Großversuchs zur getrennten LVP-Sammlung erhoben, bei dem Restmüll (Foto mit Probematerial siehe Abbildung 1) und die getrennte Sammlung der Leichtverpackungen beprobt wurden. Das Versuchsgebiet liegt in einem dicht bebauten Stadtteil in Österreich und umfasst 177 Liegenschaften mit ca. 10.000 EinwohnerInnen. Innerhalb eines Jahres wurden drei Beprobungen (05/21, 10/21, 04/22) durchgeführt, bei denen jeweils ca. 800 kg Restmüll aus den Restmüllbehältern und zwischen 400 und 700 kg LVP aus den LVP-Behältern bzw. Fahrzeugen als Analyseproben genommen und mittels händischer Sortieranalyse untersucht wurden. Die Gesamtmenge der in den Analyseproben vorgefundenen Mehrkomponenten-LVP wurde anschließend nach Fraktionen eingeteilt, je nachdem, ob der Karton-Sleeve entfernt wurde oder nicht (inkl. bzw. exkl. Karton-Sleeve, siehe Abbildung 2), um so die Trennqualität durch die Konsument:innen feststellen zu können. Danach wurden die einzelnen Komponenten, bestehend aus Kunststoffbecher, Karton-Sleeve und Aluminium-Platine, voneinander getrennt, gereinigt, getrocknet und gewogen. Zusätzlich wurde bei der Beprobung zum Messzeitpunkt 10/21 der *Moisture and dirt content (MDC)* als Maß für die Verunreinigung durch Restinhalte und Anhaftungen bestimmt. Dazu wurde das Feuchtgewicht der nicht gereinigten Becher sowie das Trockengewicht der gereinigten Becher bestimmt.



Abb. 1: Beispielmateriale der Mehrkomponenten-LVP aus dem Restmüll (Messzeitpunkt 10/21)



Abb. 2: Mehrkomponentenbecher exklusive und inklusive des Karton-Sleeves (v.l.n.r)

3 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse zur Trennqualität, dargestellt in Abbildung 3, zeigen, dass zu den drei Messzeitpunkten nur bei jeweils 5%, 2% bzw. 0% der im Restmüll vorgefundenen Mehrkomponenten-LVP der Karton-Sleeve entfernt wurde, während bei den Mehrkomponenten-LVP in der getrennten LVP-Sammlung bei 43%, 61% bzw. 65% der Karton-Sleeve entfernt wurden.

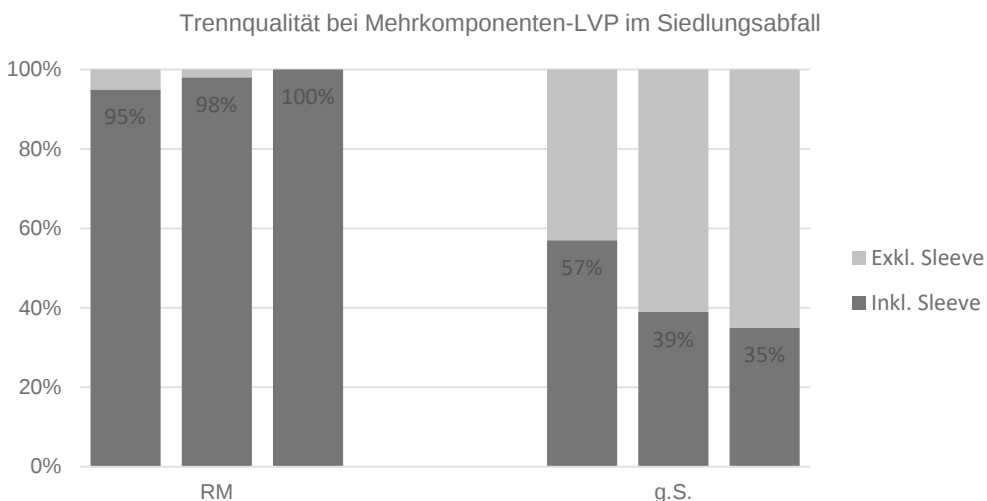


Abb. 3: Trennqualität bei Mehrkomponenten-LVP im Restmüll (RM) und der getrennten LVP-Sammlung (g.S.) als Folge des Verhaltens der Konsument:innen hinsichtlich Trennung der Komponenten vor der Entsorgung (Inkl. Sleeve: Karton-Sleeve wurde nicht entfernt; Exkl. Sleeve: Karton-Sleeve wurde entfernt) zu drei Messzeitpunkten (05/21, 10/21, 04/22), Anteile berechnet aus Stückzahl n der Becher: n (RM)=109, n (g.S.)=305

Das Verhalten der Konsument:innen hat zur Folge, dass sich die untersuchten Mehrkomponentenbecher in den unterschiedlichen Abfallströmen stark in ihrer Zusammensetzung v.a. hinsichtlich des Materials unterscheiden. In Abbildung 4 ist die Zusammensetzung der Mehrkomponenten-LVP im Restmüll und der getrennten LVP-Sammlung bezogen auf die Gesamtmasse der gewaschenen, getrockneten Teilkomponenten dargestellt. Die Grafik zeigt, dass der Kunststoffanteil der Mehrkomponenten-LVP aus dem Restmüll bei 35% liegt, der Kartonanteil bei 34% und der Aluminiumanteil bei 2%. Außerdem ist beinahe ein Drittel, nämlich 29% der Masse den Restinhalten und Verschmutzungen (MDC) zuzuschreiben. Mehrkomponenten-LVP in der getrennten LVP-Sammlung setzen sich aus 65% Kunststoff, 21% Karton und 1% Aluminium zusammen. Der Kunststoffanteil ist somit beinahe doppelt so groß wie im Restmüll, während der Anteil an Restinhalten und Verschmutzungen mit 13% deutlich geringer ausfällt.

Zusammensetzung der Mehrkomponenten-LVP im Siedlungsabfall

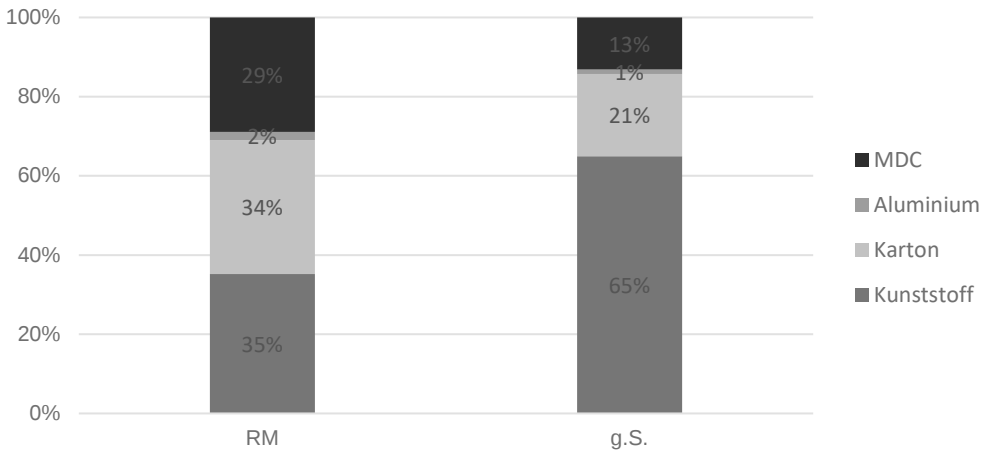


Abb. 4: Zusammensetzung der Mehrkomponenten-LVP im Restmüll (RM) und der getrennten LVP-Sammlung (g.S.) zum Messzeitpunkt 10/21 in Bezug auf Kunststoff, Karton, Aluminium und Verschmutzungen (*moisture and dirt content, MDC*), Anteile berechnet aus Feuchtmasse *m* der Becher: *m* (RM)=0,90 kg, *m* (g.S.)=1,1 kg

4 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ergebnisse zeigen, dass es bei den untersuchten Mehrkomponenten-LVP erheblich von den Konsument:innen abhängt, in welchem Zustand diese entsorgt werden und welche Rohstoffe demnach eine Chance auf ein mechanisches Recycling haben.

Der Zustand der Becher in der getrennten Sammlung ist sowohl hinsichtlich Restinhalten als auch abgetrennten Komponenten besser als im Restmüll. Diese Ergebnisse legen die Hypothese nahe, dass Konsument:innen, die den Mehraufwand einer getrennten Sammlung betreiben, auch den Mehraufwand einer Vorreinigung auf sich nehmen, möglicherweise, um die Becher im Haushalt lagerfähig zu machen. Trotzdem befindet sich noch ein erheblicher Anteil an Bechern unzerlegt im Restmüll und in der getrennten Sammlung. Dies könnte daran liegen, dass Verpackungen aus Materialkombinationen, wie beispielsweise Mehrkomponenten-LVP den Konsument:innen die richtige Zuordnung zum jeweiligen Erfassungssystem erschweren und somit eine Herausforderung für die getrennte Sammlung darstellen (Tschachtli et al. 2019, Nemat et al. 2022). Gut sichtbare Trennhinweise und intuitive Trennmechanismen sollten das getrennte Sammeln der Einzelkomponenten erleichtern, führen bei der untersuchten Mehrkomponenten-LVP und im herangezogenen Untersuchungsgebiet jedoch noch nicht zum gewünschten Erfolg. Ein großer Teil der eingesetzten Rohstoffe gehen somit für ein mechanisches Recycling verloren, weil sie zunächst nur von wenig Konsument:innen richtig zugeordnet und in weiterer Folge auch in einer automatischen Sortierung womöglich falsch erkannt und somit fehlausgetragen werden (Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister n.d.). Ob dies tatsächlich der Fall ist bzw. ob sich Konsument:innen in anderen, nicht so dicht besiedelten Gebieten bzw. nach der bundesweiten Vereinheitlichung der Leichtverpackungssammlung in Österreich 2023, wo voraussichtlich Kunststoffbecher bundesweit als Zielfraktion der getrennten LVP-Sammlung stärker beworben werden, anders verhalten, sollte zukünftig untersucht werden.

Im Idealfall ist die praktische Recyclingfähigkeit einer Verpackung unabhängig vom Verhalten der Konsument:innen gegeben und je komplexer die Verpackung ist, desto mehr braucht es die Kooperation durch die Konsument:innen. Um die praktische Recyclingfähigkeit zu erhöhen, bedarf es daher einer stärkeren Berücksichtigung des Faktors Mensch. Die Berücksichtigung des tatsächlichen Trennverhaltens könnte auch Eingang in die sog. „Ökomodulation“, die eine Schaffung

finanzieller Anreize beim Inverkehrbringen von gut recycelbaren Verpackungslösungen vorsieht, finden.

5 DANKSAGUNG

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Forschungsinitiative *CD-Labor für Recyclingbasierte 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. Gleichzeitig bedanken wir uns bei unseren Unternehmenspartnern Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoffrecycling Austria AG, Borealis AG, Brantner Österreich GmbH, Lenzing AG, Linz Service GmbH, MM Board and Paper AG, OMV Downstream GmbH, Wien Energie GmbH und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H., sowie bei der Magistratsabteilung Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien (MA 48).

LITERATUR

- European Commission (2018) Directive of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. 141-151. Official Journal of the European Union L150.
- Fachverband Faltschachtel-Industrie e.V. (n.d.). Wie Bio-Produkte von Faltschachtel-Verpackungen profitieren. Frankfurt. Retrieved 06 29, 2022, from <https://ffi.de/studie-bio-produkte-profitieren-von-faltschachtel-verpackungen/>.
- Greiner Packaging International GmbH. (n.d.) K3®- Karton-Kunststoff-Kombination. Retrieved 06 29, 2022, from <https://www.greiner-gpi.com/de/Produkte/Dekoration/K3-Karton-Kunststoff-Kombinationen>.
- Nemat, B., Razzaghi, M., Bolton, K., Roustae, K. (2022) Design affordance of plastic food packaging for consumer sorting behavior. *Resources, Conservation & Recycling*, 177(2022). doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105949>.
- Nguyen, A. T., Parker, L., Brennan, L., Lockrey, S. (2020) A consumer definition of eco-friendly packaging. *Journal of Cleaner Production*, 252(2020). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119792>.
- Pomberger, R. (2020) Über die theoretische und reale Recyclingfähigkeit. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 2021. 73:24-35. doi:<https://doi.org/10.1007/s00506-020-00721-5>.
- Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister (n.d.) Verpackungsbeispiele zur Bemessung der Recyclingfähigkeit, Beispiel 3. Osnabrück. Retrieved 06 29, 2022, from https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Verpackungen/Beispiel1_Recyclingfaehigkeit_3.pdf.
- Tschachtli, S., Pitschke, T., Kreibe, S., Martin, A. (2019) Recyclingfähigkeit von Verpackungen. Konkretisierung Untersuchungsrahmen und Kriterienkatalog. (bifa Umweltinstitut, Ed.) Augsburg. Retrieved 06 29, 2022, from <https://docplayer.org/155050271-Bericht-recyclingfaehigkeit-von-verpackungen-konkretisierung-untersuchungsrahmen-und-kriterienkatalog-projekt-titel-interseroh-dienstleistungs-gmbh.html>.

Ressourcenschutz durch Abfallvermeidung, Wiederverwendung und stoffliche Verwertung

H.-J. Dornbusch¹

¹⁾ INFA – Institut für Abfall, Abwasser und Infrastruktur-Management GmbH, Geschäftsführer, Ahlen, Deutschland

KURZFASSUNG: Die Transformation unserer bislang linearen Wirtschaft in eine Kreislaufwirtschaft, in der der Wert von Produkten und der in ihnen enthaltenen Rohstoffe am Ende ihrer Nutzungsphase möglichst optimal erhalten bleibt und in der möglichst wenig Abfall erzeugt wird, gilt zunehmend als Schlüsselstrategie für den Klima- und Ressourcenschutz. Angesichts dieser Entwicklungen stößt das Konzept der Kreislaufwirtschaft in der Politik, der Industrie und der Zivilgesellschaft auf ein wachsendes Interesse. Aktuelle Studien zeigen aber, dass diese Wandlung noch am Anfang steht und der Rohstoffbedarf durch Sekundärrohstoffe nur in geringem Maße gedeckt wird. Sowohl aus ökologischen und ökonomischen, aber auch sozialen Gründen gilt es die Verschwendung von natürlichen Ressourcen als Abfall zu minimieren. Der nachfolgende Textbeitrag beschreibt i. W. die aktuellen kommunalen Aktivitäten, die einerseits auf eine noch bessere Abtrennung der noch im Restabfall befindlichen Wertstoffe abzielen, aber darüber hinaus auch immer stärker den Aspekt der Wiederverwendung von Produkten sowie die Abfallvermeidung in den Fokus nehmen.

1 EINLEITUNG

Gerade die Städte und Kommunen kristallisieren sich immer mehr als Treiber für umfassende Konzepte zur Reduzierung der Abfallmengen und zum Klima- und Ressourcenschutz heraus. Neben einer fortlaufenden Optimierung und Erweiterung der Getrennterfassungssysteme für die verschiedenen Wertstoffe befinden sich aktuell vielerorts Re-Use-Strategien und Zero-Waste-Konzepte in der Erarbeitung oder Umsetzung. Gerade auf kommunaler Ebene können die für eine Umsetzung solch umfassender Konzepte erforderlichen Akteur:innen zusammengeführt und aktiv in die Projekte einbezogen werden (Bildungs- und öffentliche Einrichtungen, Behörden, NGOs/Initiativen, die Zivilgesellschaft und Unternehmen). Die Einbindung möglichst vieler dieser gesellschaftlichen Gruppen und Institutionen erhöht die Chance, dass die ambitionierten Ziele dieser Konzepte auch erreicht werden können.

2 WERTSTOFFPOTENZIALE IM RESTMÜLL

Die Reduzierung des Restmülls nimmt im Kontext der Ressourcenschonung auf kommunaler Ebene eine Schlüsselrolle ein. Durch eine bessere Abtrennung von Wertstoffen, die immer noch in größerem Umfang über den Restabfall entsorgt werden, können diese erhalten und dadurch wiederverwendet werden.

Die vorliegenden Ergebnisse der aktuellen „Bundesweiten Hausmüllanalyse“, die von der INFA GmbH als Projektleitung in einer Arbeitsgruppe im Auftrag des Umweltbundesamtes im Zeitraum 2017 – 2020 durchgeführt wurde, zeigen sehr deutlich, dass neben den trockenen Wertstoffen (z. B. Papier, Glas und Kunststoff) insbesondere erhebliche Mengen an organischen Abfällen im Restmüll verbleiben. (UBA 2020)

Was landet in der Restmülltonne?

Wertstoffe landen zu häufig in der falschen Tonne.
Und was gehört wirklich hinein?

✓ 32,6 %

Restmüll
26,3 %

(z.B. Windeln und Hygienepapiere, Zigarettenkippen, Geschirr, Fotos, Staubsaugerbeutel)

6,3 %

Feinmüll
(z.B. Kehrlicht und Asche)

✗ 67,4 %

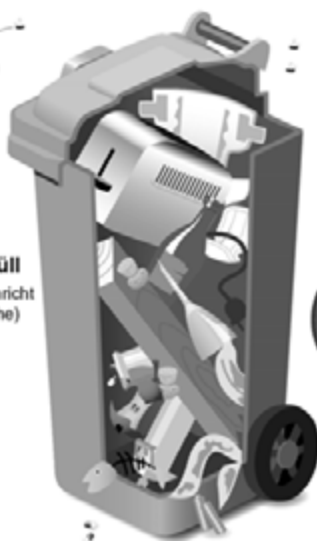
Bioabfall
39,3 %

Wertstoffe
27,6 %

(z.B. Altpapier, Aludosen, Kunststoffverpackungen, Getränkeflaschen, Elektroaltgeräte)

0,5 %

Problem- und Schadstoffe
(z.B. Batterien und Akkus, flüssige Farb- und Lackreste, Lösemittel, Energiesparlampen)



Quelle: Umweltbundesamt 2020

Abb. 1: Zusammensetzung des Restmülls aus privaten Haushalten

Etwa 39 Gew.-% des Restmülls besteht in der Bundesrepublik Deutschland aus organischen Abfällen, die zum größten Teil auch für eine separate Erfassung mit anschließender Zuführung zu einer Kompostierungs- oder Vergärungsanlage geeignet sind. Einen nicht unerheblichen Anteil daran haben verpackte Lebensmittel, bei denen häufig nicht mal das Haltbarkeitsdatum abgelaufen ist. Gerade die Problematik der großen Mengen an entsorgten Lebensmittelabfällen im Allgemeinen und deren Entsorgung über den Restmüll im Speziellen ist vielerorts ein wesentlicher Aspekt in kommunalen Vermeidungskonzepten im Bereich der Organik. Klar ist, dass bei der Organik wie auch den anderen Wertstoffen eine vollständige Verlagerung aus dem Restmüll in die vorhandenen separaten Sammelsysteme in der Praxis nicht erreichbar ist, aber eine deutlich bessere Abschöpfung bei entsprechenden Rahmenbedingungen und Sensibilisierungsmaßnahmen durchaus realisierbar erscheint.

3 GETRENNTERFASSUNG VON WERTSTOFFEN

Für die Getrennterfassung von Wertstoffen werden neben komfortablen haushaltsnahen Erfassungssystemen vielerorts umfangreiche Abgabemöglichkeiten auf Wertstoff- und Recyclinghöfen angeboten. Gerade den haushaltsnahen Wertstoffsammelsystemen (i. d. R. Behälter für Bioabfall, Altpapier und Leichtverpackungen) sowie der Erfassung von Altglas über Depotcontainer im Bringsystem kommt eine besondere Bedeutung zu. Die Sammelsysteme für die trockenen Wertstoffe sind in der Bevölkerung weitgehend etabliert und akzeptiert. Demgegenüber ist eine möglichst umfassende getrennte Erfassung der Bioabfälle aktuell die größte Herausforderung an die kommunale Abfallwirtschaft, da die Qualität dieses Stoffstroms besonders empfindlich auf den Eintrag unerwünschter Fremdstoffe (auch schon in vergleichsweise geringer Menge) reagiert. Die qualitativen Anforderungen an Komposte und Gärreste wurden durch den Gesetzgeber in den letzten Jahren weiter erhöht, so dass die möglichst sortenreine Erfassung des Bioabfalls direkt zu Beginn der Prozesskette (im Haushalt) von besonderer Bedeutung ist. Daher werden derzeit wieder Projekte und Studien durchgeführt, deren Zielsetzung die Erarbeitung von Konzeptionen

für eine verbesserte Abschöpfung der Organik aus dem Restmüll, bei möglichst paralleler Reduzierung der Störstoffeinträge in die Biotonne, ist.

4 WIEDERVERWENDUNG VON SPERRMÜLL

Auch im Sperrmüll schlummern noch Potenziale für eine stoffliche Verwertung, i. W. bezogen auf Altholz und Metall. Diese Stoffgruppen werden üblicherweise auf den Wertstoff- oder Recyclinghöfen schon seit vielen Jahren durch Abtrennung vom angelieferten Restsperrmüll getrennt gesammelt und spezifischen Verwertungswegen zugeführt. Bei der Abholung des Sperrmülls am Grundstück erfolgt diese Abtrennung vielerorts durch den Einsatz zusätzlicher Sammelfahrzeuge. Verstärkt in den Fokus kommt im Bereich des Sperrmülls seit einigen Jahren auch die Weiternutzung bzw. Wiederverwendung einzelner Bestandteile im Sinne der eigentlichen Nutzungsbestimmung (wie z. B. Tische, Stühle, Schränke etc.). Hierzu werden auf Wertstoffhöfen gut erhaltenen Bestandteile separiert und z. B. in Gebrauchtwarenhäusern oder Second-Hand-Läden als günstige Einkaufsmöglichkeit für Bürger:innen mit geringerem Einkommen angeboten. Auch bei der Abholung des Sperrmülls am Grundstück wird durch den Einsatz von Wertstoff- und/oder Möbelwagen eine sogenannte schonende Sperrmüllabfuhr betrieben, durch die einzelne und gut erhaltene sowie weiternutzbare Gegenstände separiert und einer Wiederverwendung zugeführt werden können.

5 RE-USE AKTIVITÄTEN

Schon seit vielen Jahren kümmern sich Sozialbetriebe und Gebrauchtkaufhäuser um die Wiederverwendung noch nutzbarer Produkte wie Elektrogeräte, Möbel oder Textilien und leisten damit einen wichtigen Beitrag zur Abfallvermeidung und zum Ressourcenschutz. In diesem Bereich haben sich nun in den letzten Jahren auch immer mehr kommunalen Entsorgungsbetriebe engagiert. Dies geschieht insbesondere im Bereich der Sperrmüllsammlung (s. o.). Kommunale Re-Use-Aktivitäten liefern inzwischen einen wichtigen Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz, da Abfälle vermieden werden. Dieses geschieht im Einklang mit der 5-stufigen Abfallhierarchie, bei der die Vermeidung von Abfällen an oberster Stelle steht. Neben der Ressourcenschonung entstehen den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsunternehmen und den Kommunen aus Re-Use-Aktivitäten auch noch weitere Vorteile. Das sind u. a.:

- Chancen für den lokalen Arbeitsmarkt
- Stärkung gemeinnütziger Unternehmen durch Zusammenarbeit
- Stärkt die Abfallberatung und fördert die Getrenntsammlung
- Steigerung des kommunalen Images
- Integration der Strategie in kommunale Klimaschutz- und Effizienzstrategien möglich

Ein klassisches Instrument die verschiedensten Produkte einer Wiederverwendung zuzuführen sind die bereits erwähnten Gebrauchtwarenhäuser oder auch Second-Hand-Läden. Diese werden häufig von kommunalen Unternehmen in Zusammenarbeit mit weiteren (gemeinnützigen) Akteuren betrieben.

6 ZERO-WASTE-KONZEPTE

In jüngster Zeit rückt das Thema Zero Waste zunehmend in den Fokus. Insbesondere größere Städte erstellen entsprechende Konzepte und Strategien und lassen sich dabei z. T. durch den europäischen Verein Zero Waste Europe als Zero Waste City zertifizieren. Andere Städte sind auf dem besten Weg dahin und werden dabei auch durch INFA begleitet. Der Begriff „Zero Waste“ vermittelt in der Übersetzung zunächst die Erwartung, dass „Null Abfall“ anfällt. Das Leitbild Zero Waste geht i. d. R. aber nicht davon aus, dass gar keine Abfälle mehr erzeugt werden, es will diese aber in einem fortdauernden Prozess immer stärker vermindern und konsequent als Ressource nutzen. Man könnte daher auch zutreffender von „Null Verschwendung“ sprechen. Daher ist das Ziel, dass deutlich weniger Müll erzeugt und ressourcenschonender gewirtschaftet wird. Grundsätzlich haben sich verändernde rechtliche Rahmenbedingungen, die Kreislaufwirtschaft

und der mit dem Zero-Waste-Gedanken einhergehende gesellschaftliche Wandel hin zu einem verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen langfristig ein großes Potenzial, das Abfallaufkommen nachhaltig zu reduzieren. Mit Zero-Waste-Konzepten in Kombination mit den zu erstellenden Abfallwirtschaftskonzepten haben Kommunen Instrumente, vergangene Entwicklungen zu dokumentieren und zukünftige zu gestalten.

7 SCHLUSSFOLGERUNG / ZUSAMMENFASSUNG

Die Abfallwirtschaft kann einen erheblichen Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz leisten. Die Getrennterfassungssysteme für Wertstoffe sind etabliert und bieten nur noch begrenztes Verbesserungspotenzial. Daher rücken in den letzten Jahren wieder verstärkt Aktivitäten im Bereich der Abfallvermeidung, der Wiederverwendung und des weiter auszubauenden Recyclings in den Fokus. Gerade die aktuellen Aktivitäten mit der Erarbeitung von Re-Use-Strategien und Zero-Waste-Konzepten können in Verbindung mit den bestehenden umfangreichen Strukturen der Getrenntsammlung einen wichtigen Beitrag für eine nachhaltige und zukunftsorientierte Abfallwirtschaft leisten.

LITERATUR

Deutsches Umweltbundesamt (UBA) (2020) Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien. Text 113/2020, Dessau-Roßlau.

A novel approach to environmental cleanup of inland water courses

N. Rubini¹, S. Carniello² & C. Di Noi³

¹ Mold S.r.L., Business Development, Cassola, Italy

² metinsi, Sustainability Consulting, Graz, Austria

³ GreenDelta GmbH, Sustainability Consulting, Berlin, Germany

ABSTRACT: Despite growing awareness and improving practices, littering is a worldwide challenge with catastrophic impact on the ecosystem. Inland waters in particular represent one of the main sources of pollution for the oceans. Detecting and retrieving this waste when still in rivers is an effective and efficient way to remediate the environment before the damage spreads over large areas. Implementing barriers faces a range of technical and economic challenges, leading to long and complex project developments. For this reason, the Italian company Mold S.r.l. decided to adopt a life-cycle perspective to study potential projects with their innovative barrier River Cleaning system and focus on the most impactful. In this paper we present LCA results done on exemplary regions and derive the learnings and criteria for future market developments of the system, linking thus life-cycle thinking and business development.

1 INTRODUCTION

Nowadays, about 2 million tons of plastic waste end up in inland water every year, and from there into the sea, with catastrophic impact on the ecosystem (Boucher 2020). Plastic pollution threatens liveability at environmental, economic and social level. It has consequences such as poor water quality, loss of biodiversity and increased risk of floods. Plastic pollution also triggers socially relevant concerns such as food security, access to water and health (Leslie *et al.* 2022). Furthermore, it comes with an expensive price tag for public administrations, tourism and fisheries related business activities. Asia is the most burdened region, with cleanup costs nearing \$14 billion and revenue loss of up to \$2,3 billion. Europe follows with revenue losses of \$1 billion (Deloitte 2019). Both regions have urban and industrial areas located near waterways, thus accelerating the inflow of plastic debris into waters. In 2040, the financial risk for businesses and government is projected to rise to \$100 billion (United Nations Environment Programme 2021). Studies that analyse the discharge of plastic waste into marine environments went from considering 10 rivers as accountable for 80% of total pollution (Lebreton *et al.* 2017) to more than 1500 (Meijer *et al.* 2021). Waterways are now considered as plastic litter reservoirs due to the morphological structure of riverbeds, vegetation and hydrological conditions, and smaller basins appear particularly relevant (Gonzalez-Fernandez *et al.* 2021). Detecting and retrieving this waste when still in rivers is an effective and efficient way to prevent these damages and remediate the environment before the damage spreads over large areas. Furthermore, economic benefits can be enhanced through the creation of recycle-aimed plastic stock supply chains, allowing circular business development with local stakeholders, including waste recycling and the issuance of carbon credits for CO2 compensation.

The River Cleaning system is a novel technology able to collect floating waste from water streams, without interfering with navigation and ecosystems (Citton 2020). It consists of a row of small, aligned rotors anchored to an underwater cable. Each of them stops floating objects and moves them to the sides, while fishes, boats can pass the barrier unaffected. The system can be customised to the specifics of the watercourse and is powered by its natural flow. Furthermore, the spinning movement makes sure the litter does not accumulate. This ensures both versatility and operational efficiency.

2 OBJECTIVES OF THE WORK

This study aims at linking the environmental impact of technological solutions with business decisions that will determine commercial scalability, in order to focus the business development

efforts on regions with the highest potential impact. On one hand, the inherent impact of barriers is necessary to validate a specific site as sustainable over time. On the other hand, the amount and quality of collected material is critical to enable circular business development with local stakeholders. The overall objectives can be summarized as follows:

- Estimate the climate impact and the plastic footprint in the considered regions
- Individuate the hot spots in the environmental burdens of the barrier, to kick off technical improvements
- Understand the most relevant factors to achieve technical and economic positive impact.

3 METHODOLOGY

To analyse the overall impact of the barrier, and to understand what the critical factors are to achieve a net positive impact, three case studies with different sizes and in different contexts have been defined (see Sec. 4 for their description).

For all chosen locations, the quantity and composition of floating plastic waste is available from literature; other types of waste have been neglected. The collected waste is then treated according to the Italian waste management system: the material is delivered to a sorting centre, hard packaging materials are sent to recycling centres, the rest to a plant for thermal recovery with heat generation. This corresponds to reality for the two Italian locations, whereas it is a pure hypothesis for the Indonesian rivers, for which no information on waste treatment is available. The technical data for the barrier are estimated based on the current design and on the experience done on pilot trials.

In each location a cradle-to-grave LCA study has been done, following the ISO standard 14040 framework. The system boundaries are represented in Fig. 1. For the calculation the Environmental Footprint datasets and impact assessment methods have been employed (European Platform on Life Cycle Assessment 2022). The credits obtained from waste collection are a result of material recycling and thermal recovery, modelled as avoided productions. To calculate the floating litter mass from the number of items, an average density of 3,2 g/item was used, according to the sampling of material carried out in European rivers (Vriend et al. 2020). Plastic bottles, usually not fragmented, are assumed to weigh 10 g/bottle. Every object category was then associated with a single type of polymer for simplicity: all bottles have been considered PET, all wraps and food packages polyolefins and so on.

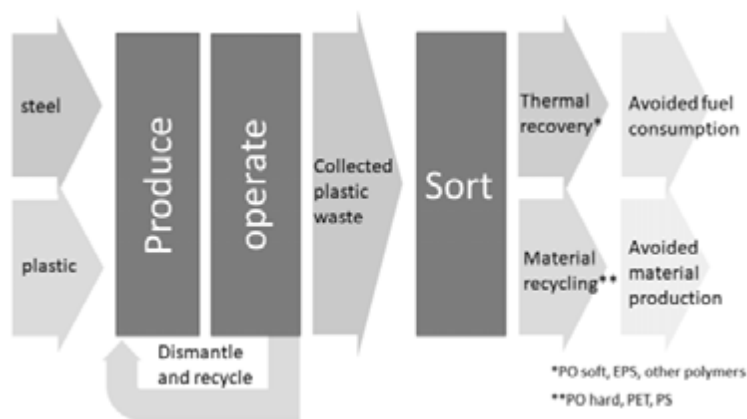


Fig. 1: System boundaries of the studies

4 CASE STUDIES

The locations chosen for the case studies want to represent diverse environmental and economic contexts, to give a first indication of the most significant factors for future business development. The three locations have different sizes, different hydrology and are surrounded by different economical and waste management systems.

4.1 Large asian river: Jakarta waterways

In Jakarta there are several waterways that belong to the Ciliwung and Psanggrahan basin. We have considered four application points located near the mouths of the main waterways: bridge on Jalan Pluit Karang Utara; pedestrian bridge near Jalan Lodan Raya; bridge on Jalan Mandara Permai; bridge on Jalan Pantai Indah Utara VII.

These locations are strategic discharge points located towards the seaside, virtually ensuring the capture of the entire amount of litter measured by relevant research.

Quantity and composition of waste are taken from van Emmerik et al. (2019) and reported in Table 1. According to the aforementioned studies, the 0-35 cm underwater segment contains most of the plastic objects: we therefore assume, for practical reasons, that the measured total amount of litter is entirely relevant for the River Cleaning system retention capability (0-35 cm segment).

4.2 Mid size european river - Tiber

The second case study was chosen in a European context. Tiber is the third Italian river by length and flows through low populated areas in the upper course, as well as through highly populated areas (Rome) downstream, for a total of about 4.7 mil inhabitants (Tevere 2022).

Waste quantity and composition are extracted from Gonzales-Fernandez et al. (2021).

Place of application: pedestrian bridge 800m from the mouth of the river, on the Fiumicino Canal.

4.3 Small size european river - Magra

The third and last case study focuses on the Magra river. Despite being a minor basin, the estuary is located near an area of particular environmental and economic interest: the Cinque Terre National Reserve. For this reason, the Regional Environmental Protection Agency (ARPAL) consistently measures the water quality and the presence of plastic litter in a number of strategic observation points along the coastline (COMMON 2020).

Waste inputs are taken from Gonzales-Fernandez et al. (2021), as for the Tiber river.

Tab. 1: Weight and composition of the waste collected in the three case studies over the lifetime of three years

Case study	Jakarta (all locations)	Tiber	Magra
barrier length (m)	202	35	91
collected waste (t)	5617	20.8	2.9
% HDPE, PP	19	39	39
% PET	3	25	25
% PS	4	5	5
% soft PO, EPS and other polymers	74	31	31

5 RESULTS AND DISCUSSION

5.1 Environmental impact results

The LCIA results (Table 2) show that only high amounts of collected plastics and a proper recycling treatment ensure the desired positive climate impact. That was clearly achieved in the case of Jakarta, a densely populated area with poor waste management standards; on the other hand, most of the material collected can be thermally recovered only, reducing the potential credits. The quantities collected and processed from the Tiber river are enough to ensure a positive impact in most considered categories, and more prominently in the climate impact; the balance is also improved by the high quantity of hard polymers and thus the high rate of material recycling. The Magra river follows the same trend, but the broad riverbed demands a high number of rotors, and that negatively affects the overall result.

As a rule of thumb, a collection of about 70 kg of plastics per year and rotor is needed to ensure a positive climate impact. The value is influenced also by the composition: the higher the rate of waste for thermal recovery, the higher the weight needed to achieve a positive impact (see Figure 2), since material recycling gives the largest credits.

Tab. 2: LCA results of the three case studies

Impact category	Jakarta	Tiber	Magra
Climate change (kg CO ₂ eq.)	-3.58E+06	1.79E+03	2.07E+04
Ecotoxicity, freshwater (CTUe)	-1.72E+06	4.27E+03	7.40E+03
Eutrophication marine (kg N eq.)	-2.48E+03	4.04E+00	7.40E+03
Eutrophication, freshwater (kg P eq.)	-4.97E+01	-3.04E-01	1.37E+01
Resource use, fossils (MJ)	-2.07E+08	6.50E+05	3.23E+05
Resource use, minerals and metals (kg Sb eq.)	7.38E+01	1.83E+00	4.52E-01
Water use (m ³)	-3.21E+05	3.25E+03	5.63E+03

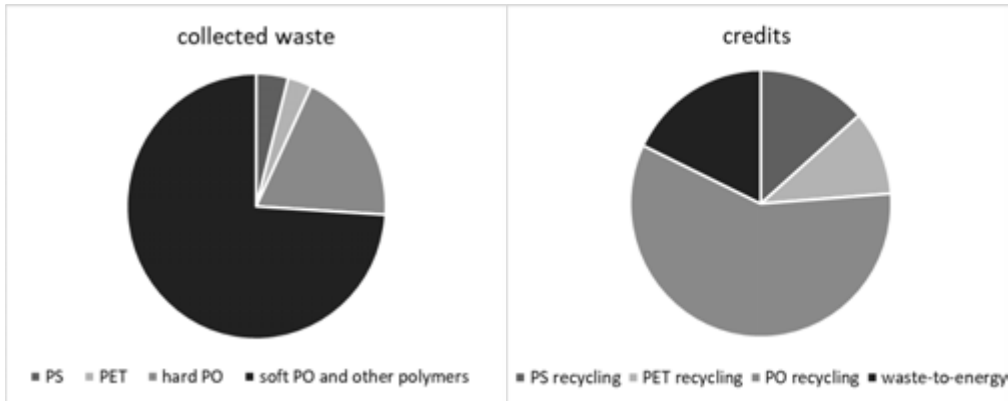


Fig. 2: Composition of collected waste and contribution of each waste category to the climate impact credits for the Jakarta riverways

5.2 Comparison between regions

The amount and composition of waste lead to different impact results. The waste streams reported for Jakarta, for example, present a very low amount of hard plastic packaging, because the informal collectors active in the city collect those objects from the surroundings (Kaza et al. 2018). On the other hand, the total amount of waste is orders of magnitude higher than in a European context due to the poor waste management system (van Calcar et al. 2019, Lebreton et al. 2017). In such a context a barrier system achieves high collecting rates and thus a large positive impact. On the other hand, the high amount of soft packaging and mixed polymers, destined to thermal recovery, reduces the potential benefits, because waste-to-energy delivers disproportionately low credits (Fig. 2). By placing the River Cleaning barriers in multiple locations, where waters are channelized, we are able to optimize the resource consumption of the barrier, addressing the majority of waste while reducing the total number of rotors used. The impact of transporting, mounting and dismounting increases due to multiple barriers, but remains negligible. At the other end of the spectrum, the Italian Magra river shows the lowest amount of floating macrolitter and is not channelized. This time, the impact related to manufacturing (mainly steel for structure and mould making) outweighs the credits, leading to an overall negative impact (Table 2). The result suggests the need to shift to less resource consuming manufacturing processes to optimise the impact of barriers. Finally, in the Tiber River we observe both positive and negative results: the large amounts of debris and a good waste management system compensate for the environmental burdens due to barrier manufacturing, but not in all categories. Despite the several limitations of this study and the methodology, the obtained results suggest that it could be possible to develop an environmental impact break-even model. Such a model could be usefully linked with cost-effectiveness reasoning during the planning phases of clean-up operations.

5.3 The impact of the barrier

The study also revealed the hot spots in the barrier life-cycle and provided some qualitative indications for reducing the environmental impact in the next generation barriers. The material employed for barrier manufacturing is the main cause for climate impact, especially the production of plastic rotors and the related use of steel for the stamp (Fig. 3). As possible improvements, shifting to 3D printing offers the best opportunity to reduce the carbon footprint. Using the stamp for more rotors or employing a higher content of recycled steel in it are viable alternatives. The quantity of polymer in the barrier and in the conveyor, belts can also be optimised with an eco-design approach, reducing also the impact of the transport (negligible).

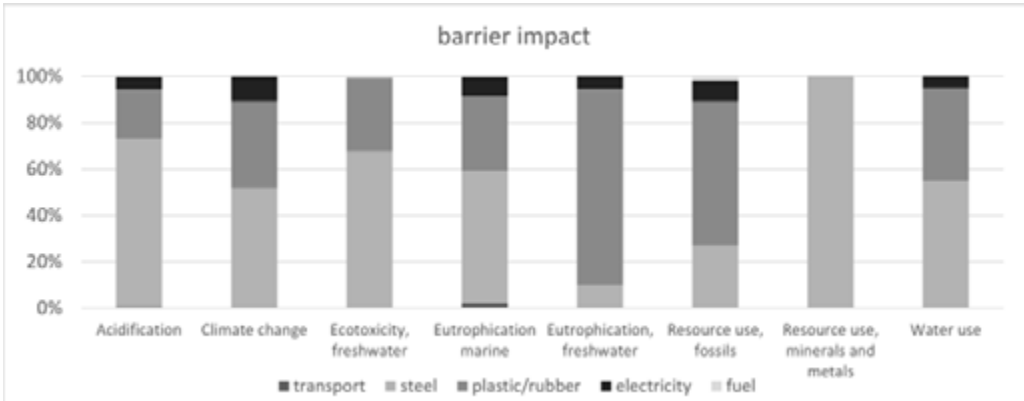


Fig. 3: Impact of the barrier over the whole lifetime, grouped by inputs. Collected waste is excluded from this analysis

5.4 Effect of assumptions and uncertainties

Generally speaking, it is necessary to consider a significant range of error due to the limitations and lack of coherence in litter data. This is mainly due to the methods used to estimate the amount of riverine litter: projections based on visual observation and sampling are limited by the scope of available litter and by the frequency and duration of visual observation and tend to underestimate the quantity, while numerical models are likely to overestimate the amount of litter as they do not consider variation in hydrological conditions and litter movimentation (Lebreton et al. 2017).

The credits due to recycling and recovery have been calculated using generic data found in literature for the sorting and the production of plastic granules from waste (Pressley et al. 2015); a more accurate modelling of the recycling process, based also on the local infrastructure, is required for reliable results.

The main shortcoming of the approach is inherent in the current LCA method. Collecting waste from the environment, despite the clear positive impact on the environment in terms of avoided water contamination, is not included in the LCA impact models and does not affect the numbers reported. The same holds for the avoided macro- and microplastic pollution, which is not taken into account in the current models. On-going research projects are working to fill this gap (PLEX (GreenDelta, 2022), MARILCA (Forum for Sustainability, 2022)).

6 CONCLUSIONS

River basins have deep and multifaceted influence on the environmental, societal, and economic ecosystem of the surrounding regions. Due to the mixture of quantifiable and unquantifiable elements, there are currently no established common practices to clearly determine the value created by cleanup operations per se. LCA studies provide insightful information for business development decision making processes as they show the best balance between the resources employed in the barriers and the advantages provided by the recycling of captured material. However, the LCA studies should not be the only factor considered, both because of the inherent

limits of LCA (the impact of collecting macroplastics itself is not considered) and because cleanup decisions should take into account non-market benefits and carefully coordinate with existing policies. LCA-negative locations should not exclude high-performance macroplastic retention systems: similarly to the Magra case study, the most relevant drivers may be the safeguard of protected areas or the empowerment of social groups.

REFERENCES

- Boucher, J. B. (2020) *The marine plastic footprint*. Switzerland: IUCN.
- Citton, A. C. (2020) WO Patentnr. 2020/049379 A1.
- COMMON - Coastal Management and Monitoring Network (2020). Beach litter monitoring map tool: <https://volontaripernatura.greenproject.info/common/site/map/>.
- Deloitte (2019) *The price tag of plastic pollution*. The Netherlands. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/strategy-analytics-and-ma/deloitte-nl-strategy-analytics-and-ma-the-price-tag-of-plastic-pollution.pdf>
- European Platform on Life Cycle Assessment. (20. June 2022) Von European Commission: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/contactListEF.xhtml> abgerufen
- Gonzalez-Fernandez, D., Cozar, A., Hanke, G., Viejo, J., Morales-Caselles, C., Bakiu, R., Barcelo, D., Bessa, F., Bruge, A., Cabrera, M., Castro Jimenez, J., Constant, M., Crosti, R., Galletti, Y., Kideys, A.E., Machitadze, N., Pereira De Brito, J., Pogojeva, M., Ratola, N., Rigueira, J., Rojo-Nieto, E., Savenko, O., Schöneich-Argent, R., Siedlewicz, G., Suaria, G. and Torgeli, M. (2021) Floating macrolitter leaked from Europe into the ocean. *Nat Sustain* 4, 474–483.
- GreenDelta GmbH (8 July 2022) Plastic litter extension for theecoinvent database. <https://www.greendelta.com/project/plex/>
- Leslie, H.A., Van Velzen, M.J.M., Brandsma, S.H., Vethaak, A.D., Garcia-Vallejo, J.J., Lamoree, M.H. (2022) Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, Issue 163.
- Kaza, S. L.-T., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. (2018) *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington D.C.: World Bank.
- Lebreton, L. C., van der Zwet, J., Damsteeg, J.-W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (7. June 2017) River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, S. 10.
- Forum for Sustainability (19. June 2022) MariLCA: Integrating potential environmental impacts of marine litter into LCA. <https://marilca.org/>.
- Meijer, L.J.J., Van Emmerik, T., Van der Ent, R., Schmidt, C., Lebreton, L. (30 April 2021) More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Science Advances*, Issue 7.
- Pressley, P. N., Levis, J. W., Damgaard, A., Barlaz, M. A., & DeCarolis, J. F. (2015). Analysis of material recovery facilities for use in life-cycle assessment. *Waste Management*, 35, 307-317.
- Tevere, A. d. (19. June 2022) *informazioni sul bacino*. Von abtevere: <https://www.abtevere.it/node/62> abgerufen
- United Nations Environment Programme (2021) *From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution*. Nairobi.
- van Calcar, C. J., van Emmerik, T. H. (11. December 2019) Abundance of plastic debris across European and Asian rivers. *Environmental Research Letters*, S. 10.
- van Emmerik, T., Loozen, M., van Oeveren, K., Buschman, F., Prinsen, G., & Emmerik, T. v. (13. August 2019) Riverine plastic emission from Jakarta into the ocean. *Environmental Research Letters*.
- Vriend, P., van Calcar, C., Kooi, M., Landman, H., Pikaar, R. van Emmerik, T. (2020) Rapid Assessment of Floating Macroplastic Transport in the Rhine. *Front. Mar. Sci.* 7:10.

Vergleich und Bewertung unterschiedlicher Probenahme-Methoden zur Untersuchung von Mikroplastik in Flüssen

G. Obersteiner¹, S. Lenz¹ & J. Mayerhofer¹

¹⁾ Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Abfallwirtschaft, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Für eine standardisierte Probenahme von Mikroplastik in einem Flusssystem sind mehrere Faktoren, darunter die hydrologischen Bedingungen des Gewässers (z. B. Wasserdichte, Wind, Strömungen, Wellen) aber auch zeitliche und geografische Faktoren, die durch Flussmorphologie und die meteorologische Situation bestimmt werden, zu berücksichtigen. Im Rahmen des EFRE ko-finanzierten Projektes Tidy-Up wurden drei unterschiedliche Methoden (Netzmethode, Kaskadenpumpmethode und Sedimentationsbox) hinsichtlich ihrer Praktikabilität, Benutzerfreundlichkeit, Fehleranfälligkeit und Personalbedarf getestet.

1 EINLEITUNG

Flüsse gelten als Haupteintragspfad für die Meeresverschmutzung, und immer mehr Mikroplastikpartikel (<5 mm) verschmutzen unsere Umwelt. Schätzungen zeigen, dass so genanntes primäres Mikroplastik zwischen 15 und 31 % des Mikroplastiks in den Ozeanen ausmacht. Ein weit-aus größerer Anteil (69-81 %) wird jedoch Partikeln, die bei der Zersetzung größerer Plastikobjekte wie Plastiktüten oder Plastikflaschen entstehen, zugeschrieben (Boucher 2017).

Trotz etlicher Studien zum Vorkommen von Mikroplastik in Flüssen sind derartige Analysen noch ein junges Forschungsgebiet mit vielen Herausforderungen. Eine der Hauptschwierigkeiten liegt in einer zuverlässigen repräsentativen und vergleichbaren Probenahme. Für eine standardisierte Probenahme von Mikroplastik in Flüssen sind mehrere Faktoren, wie hydrologische Bedingungen des Gewässers aber auch zeitliche und geografische Faktoren, die durch Flussmorphologie und die meteorologische Situation bestimmt werden, zu berücksichtigen. Die meisten Forschungsarbeiten über Mikroplastik konzentrieren sich auf die Menge und die Zusammensetzung von Mikroplastik, aber die Komplexität von Mikroplastik und die fehlende Harmonisierung der Probenahmemethoden erschweren den Vergleich verschiedener Studien (van Emmerik & Schwarz 2020). Eine Standardmethode für die Probenahme von Mikroplastik in Flüssen fehlt bisher.

Die Bewertung möglicher Gefahren durch Mikroplastik erfordert jedoch schnelle, zuverlässige und zumindest repräsentative Probenahme-, Probenaufbereitungs- und Nachweismethoden, die schließlich harmonisiert werden. Nur dann ist ein Vergleich der Ergebnisse möglich und es können Vermeidungsstrategien oder regulative Maßnahmen zur Verringerung des unbeabsichtigten Eintrags von Kunststoffen in die Umwelt diskutiert werden (Bannick et al. 2019).

2 METHODE

Im Rahmen des Tid(y)Up-Projekts wurden daher erstmals drei unterschiedliche Probenahmeverfahren für Mikroplastik in Flüssen parallel getestet und die Ergebnisse für acht verschiedenen Probenahmestellen (in Österreich, Ungarn, Serbien, Rumänien und Bulgarien) entlang der Donau und der Theiß verglichen. Zum Einsatz kamen eine weiterentwickelte Netzmethode, die die Tiefenvarianz und die räumliche Verteilung über das Querprofil berücksichtigt (Liedermann et al. 2018), die sogenannte Kaskadenpumpmethode (höhere Auflösung für kleine Partikelgrößen) und eine Sedimentationsbox (zeitliche Komponente durch Messung über 2 Wochen). Der Fokus dieser Messungen lag auf der Praktikabilität dieser Messverfahren in Bezug auf Umsetzung, Benutzerfreundlichkeit, Fehleranfälligkeit, Personalbedarf etc. in Abhängigkeit von den fluvialen Rahmenbedingungen sowie den anschließenden Anforderungen an die Probenaufbereitung.

3 SCHLUSSFOLGERUNG UND ZUSAMMENFASSUNG

Vorteile der Netzmethode sind die Möglichkeit bei Aussagen über das Mikroplastikvorkommen in Flüssen sowohl die Tiefenvarianz als auch die räumliche Verteilung über das Querprofil des Flusses zu berücksichtigen. Die hohe filtrierte Wassermenge in kurzer Zeit (45min ~3000m³ pro Netz) ermöglicht ein vergleichsweise hohes Probenvolumen. Eine Berechnung der Kunststoffbelastung/des Kunststofftransports ist durch die integrierte Durchflussmessung möglich. Nachteilig ist die Begrenzung in der Größenverteilung nach unten. Zu kleine Maschenweiten führen zu raschen Verklausungen im Netz und das aufwändige Messverfahren, welches entweder einen LKW mit Kran bei Messungen von Brücken oder ein entsprechend stabiles Schiff benötigt. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten & Turbulenzen sind vor allem bei großen Netzen eine Herausforderung. Behördliche Genehmigung kann notwendig sein (Schiffsverkehr).

Die Probenahme von Mikroplastik mit Hilfe einer Pumpe ist im Vergleich zu den anderen untersuchten Techniken ein mäßig komplexes Verfahren. Es beinhaltet den Einsatz einer Wasserpumpe, die Wasser unter Druck durch Filter mit unterschiedlichen Durchmessern drückt, was zusätzlich die Differenzierung von Mikroplastik in Bezug auf die Größe ermöglicht. Abgesehen von der Notwendigkeit einer Stromquelle gibt es keine weiteren wesentlichen Voraussetzungen für die Durchführung der Probenahme. Zu den Vorteilen gehört die Tatsache, dass die Probenahme in jedem Flussprofil durchgeführt werden kann.

Die Sedimentationsbox wird als einfache, passive und wirtschaftlich tragfähige Methode bezeichnet. Der Ort der Probenahme erfordert jedoch das Vorhandensein eines schwimmenden Objekts, an dem die Box während des Probenahmezeitraums befestigt und gesichert werden kann, während andere Flussprofile nicht erfasst werden können. In Bezug auf die Zuverlässigkeit hat diese Technik insofern Nachteile, als das Wasservolumen, das die Box durchströmt hat, nicht bekannt ist, sodass es nicht möglich ist, den Wasserdurchfluss durch die Box und die genaue Konzentration von Mikroplastik im Wasser nach der Probenanalyse zu berechnen.

Tid(y)Up wird kofinanziert durch die EU im Rahmen des Danube Transnational Programme des ERDF sowie vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), dem Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) und von viadonau als assoziierte Partner unterstützt.

Link zur Webseite: <http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/tid-y-up>

LITERATUR

- Bannick, C.G., Szewzyk, R., Ricking, M., Schniegler, S., Obermaier, N., Barthel, A.K., Altmann, K., Eisentraut, P., Braun, U. (2019) Development and testing of a fractionated filtration for sampling of microplastics in water. *Water Research* 149, 650-658
- Boucher, J., Damien, F. (2017) Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources. IUCN, 2017. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en>
- Liedermann, M., Gmeiner, P., Pessenlehner, S., Haimann, M., Hohenblum, P., Habersack, H. (2018) A Methodology for Measuring Microplastic Transport in Large or Medium Rivers. *Water (Basel)* 10.4 (2018): 414. Web
- van Emmerik, T., Schwarz, A. (2020) Plastic debris in rivers. *WIREs Water* 7, e1398

Das Unverpackt-Regal und die Sicht der Kund*innen auf die Vermeidung von Verpackungen im Supermarkt

U. Gelbmann¹, J. Edlinger¹ & Ch. Holzer²

¹) Universität Graz, Institut für Systemwissenschaften, Innovations- und Nachhaltigkeitsforschung SIS, Graz, Österreich

²) SPAR Österreichische WarenhandelsAG, Zentrale Graz für Steiermark und Südburgenland, Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Verkaufsverpackungen in Supermärkten verursachen eine erhebliche Menge an Abfällen. Deren Verringerung durch „verpackungsfreien“ Einkauf bzw. Einkauf von Mehrwegverpackungen steht im Zentrum des Projekts 1, 2, 3 – Verpackungsfrei (im Folgenden 1, 2, 3), getragen von Uni Graz, SPAR Steiermark und Österreichischem Ökologieinstitut. Ein wesentlicher Inhalt von 1, 2, 3 ist die Entwicklung und Einführung eines "Unverpackt-Regals", aus dem die Kund*innen haltbare, meist regionale und/oder biologische Waren (z.B. Reis) selbst in bereitgestellte Papiersackerl oder selbst mitgebrachte, vor dem Abpacken austarierte Behältnisse abfüllen können. Das System wurde bislang in sieben Testmärkten in der Steiermark eingeführt und wurde im Rahmen von 1, 2, 3 laufend evaluiert und weiterentwickelt. Eine intensive Begleitforschung untersucht Motive, Bedenken und Wünsche der KundInnen. Im Beitrag werden sowohl das System als auch die Begleitforschung vorgestellt und aus diesem Fallbeispiel allgemeine Erkenntnisse für die Gestaltung von verpackungsfreien Systemen in Supermärkten abgeleitet.

1 PROBLEMSTELLUNG, ZIELSETZUNG UND METHODE

Verkaufsverpackungen in Supermärkten dienen unterschiedlichen Zwecken, unter anderem auch der Vermeidung von Lebensmittelabfällen durch verlängerte Haltbarkeit. Verkaufsverpackungen aus Supermärkten verursachen aber auch eine erhebliche Menge an Abfällen. Deren Verringerung durch so genannten verpackungsfreien Einkauf und Einkauf von Mehrwegverpackungen steht im Zentrum des Projekts 1, 2, 3 – Verpackungsfrei (im Folgenden 1, 2, 3), getragen von Uni Graz, SPAR Steiermark und Österreichischem Ökologieinstitut. Hauptinhalt sind die Entwicklung und Einführung eines "Unverpackt-Regals" für haltbare Lebensmittel (z.B. Reis), aus dem die Kund*innen die angebotenen Waren selbst entnehmen können. Dabei interessierten die folgenden Forschungsfragen:

- Welche Effekte erwarten sich Handel und Konsument*innen vom Unverpackt-Regal
- Wie muss ein solches Regal physisch gestaltet sein, um hygienischen, lebensmittelrechtlichen und verkaufsbezogenen Anforderungen zu genügen?
- Inwieweit sind die Kund*innen bereit, dieses Unverpackt-Regal anzunehmen?
- Welche Konsequenzen ergeben sich für den dauerhaften, flächendeckenden Roll-Out?

Als Methode dienten neben der von SPAR gemeinsam mit Regalbauern umgesetzten Entwicklung des Systems, das im Rahmen der Laufzeit von 1, 2, 3 mehrfach umgebaut bzw. erweitert wurde, der Etablierung in sieben Test-Supermärkten in unterschiedlichen urbanen und ländlichen Situationen und der intensiven Bewerbung des Regals in den Test-Supermärkten mehrere qualitative und quantitative Befragungen bei Supermarktkund*innen im Allgemeinen sowie bei SPAR Kund*innen, Mitarbeiter*innen und einigen der Lieferant*innen im Besonderen. Im vorliegenden Beitrag gehen wir insbesondere auf zwei im Abstand von einem Jahr durchgeführte quantitativ-statistische Befragungen von Supermarkt-Kund*innen im Allgemeinen (2020) sowie von SPAR Kund*innen im Besonderen (2021), auf eine qualitative Erhebung bei Super-Markt-Kund*innen im Allgemeinen (2021) und eine gezielte quantitativ-statistische Befragung bei den direkten Kund*innen des Unverpackt-Regals (2021). Zu den Befragungen ist einschränkend zu erwähnen, dass die ursprünglich geplanten Erhebungen vor Ort im SPAR Supermarkt wegen Corona nicht durchgeführt werden konnten und größtenteils auf Online-Befragungen ausgewichen werden musste. Dem Nachteil der fehlenden Repräsentativität der Ergebnisse steht der Vorteil

gegenüber, dass in erster Linie tatsächlich diejenigen Kund*innen die Befragung ausgefüllt haben, die sich bereits für „nachhaltiges“ Einkaufen interessieren, wodurch wiederum die Validität der Daten vergrößert wird.

Im Folgenden wird zunächst das Teilprojekt „Unverpackt-Regal“ näher vorgestellt, sodann auf die Befragungen der Kund*innen eingegangen, wobei einerseits die Ergebnisse allgemein im Hinblick auf Verpackungsreduktion im Supermarkt dargestellt werden, andererseits im Besonderen auf die Effekte des Unverpackt-Regals eingegangen wird.

2 ERWARTETE EFFEKTE AUS DEM UNVERPACKT-REGAL

Vor allem für die das Segment der umweltbewussten Einkäufer*innen wird neben der Frage von regionalen und/oder biologisch-organischen Lebensmitteln auch die Frage der Verpackung der Lebensmittel zunehmend zum kaufentscheidenden Faktor (Habermehl et al. 2021). Daher entschließen sich seit einigen Jahren neben speziellen Geschäften, in denen Lebensmittel unverpackt eingekauft werden können (Kröger et al. 2018), auch konventionelle Supermärkte, ihr Angebot an unverpackten Produkten bzw. an Produkten, die in Mehrwegverpackungen angeboten werden, auszuweiten (Sattlegger 2020).

Um dieses Anliegen umzusetzen, wurde bei SPAR schon vor dem Start von 1, 2, 3 ein Edelstahltablett eingeführt, das die Verwendung von den Kund*innen selbst mitgebrachter Behältnisse für die Feinkosttheke ermöglicht. Ebenfalls wurde das Angebot von unverpacktem Obst und Gemüse erweitert bzw. dafür Mehrwegsackerl angeboten. In die Laufzeit des Projektes fallen die (Wieder-)Einführung von Mehrwegflaschen für Softgetränke und für Milch (Gelbmann & Edlinger 2022). Das Hauptaugenmerk lag während 1, 2, 3 aber auf der Einführung und Erprobung eines Unverpackt-Regals für lagerfähige Lebensmittel.

Als Nutzen werden dabei ökonomische, ökologische, aber auch soziale Aspekte gesehen (Ketelsen et al. 2020). Ökonomische Nutzen bestehen in der Möglichkeit der Kund*innen, eine individuell gewünschte und an die eigene Haushaltsgröße angepasste Menge an den jeweiligen Produkten zu erwerben. Damit wird auch den Wünschen von kleineren Haushalten besser Rechnung getragen. Erwartet wurde, dass sich für das Unverpackt-Regal vor allem Kund*innen aus der ökologisch bewussteren Schicht interessieren, der auch überdurchschnittlich viele Personen mit höherem Einkommen angehören. Danach wurde auch das angebotene Sortiment ausgerichtet. Gerade für dieses ökologisch interessierte Segment stellt die Vermeidung von Verpackungs- und Lebensmittelabfällen einen wahrgenommenen ökologischen Vorteil dar.

Insgesamt soll dadurch die Menge an Verpackungsabfällen aus dem Lebensmittelhandel sinken, was in weiterer Konsequenz zu Ressourcenschonung und CO₂-Reduktionen sowie zu einer erhöhten Materialeffizienz führt (Marken et al. 2020). Für den Lebensmitteleinzelhandel, im Konkreten Projektpartner SPAR, sollen die Aktivitäten auch zu einer Steigerung der Markenpräsenz und zur Erzielung von Wettbewerbsvorteilen dienen und damit auch zu einer erhöhten Kund*innenloyalität führen. Schließlich können bei einer flächendeckenden und umfassenden Etablierung des Systems auch Arbeitsplätze geschaffen werden, da in Bezug auf das Unverpackt-Regal höherer Handling-Bedarf im Supermarkt besteht.

3 KONZEPTION DES „UNVERPACKT-REGALS“

Im Rahmen von 1, 2, 3 - Verpackungsfrei umgesetzt und erprobt wurde das so genannte Unverpackt-Regal (dazu und im Folgenden Holzer & Lückl (2022)), in dem lose, rieselfähige haltbare Lebensmittel ohne zusätzliche Verkaufsverpackung angeboten werden (vgl. Abb. 1). Das System besteht aus Spendern (so genannten Bins), aus denen die Kund*innen berührungsfrei mittels Drückens eines Hebels Waren entnehmen können, und Laden (so genannten Scoops), aus denen Waren mithilfe einer Schaufel entnommen werden können. Die Waren werden entweder in bereitgestellte Papiersackerl abgepackt (was ja eigentlich dem verpackungsfreien Einkauf widerspricht) oder besser in von den Kund*innen mitgebrachte, vor dem Abpacken austarierte Behältnisse gefüllt. Das bei der Erprobung angebotene Sortiment umfasst Waren entweder aus biologischem oder aus regionalem Anbau oder beides, unter anderem Müsli, Haferflocken, verschiedene Nussorten, österreichischer Reis und Schokoladenvariationen eines bekannten steirischen Chocolatiers. Dieses Sortiment wurde während der Erprobungszeit mehrfach anhand

der gemachten Erfahrungen geändert und erweitert, insbesondere wurde auch die Anzahl der Scoops vergrößert. Der Preis der angebotenen Produkte entspricht demjenigen, für den dasselbe jeweilige Produkt im Supermarkt auch verpackt erhältlich ist.



Abb. 1: Das Unverpackt-Regal in erster und erweiterter Version ©SPAR

Angeliefert werden die Waren in Großgebinden (meistens Säcken), auf denen Inhaltsstoffe und Allergene deklariert sind. Diese sind auch auf den Bins/Scoops angegeben. Die Bins/Scoops selbst werden vor der Befüllung hygienisch gereinigt, berührungslos befüllt und auch nach Aufstellung regelmäßig auf Sauberkeit kontrolliert.

Das System wurde in sieben Testmärkten in der Steiermark, davon fünf in Graz eingeführt und laufend evaluiert und weiterentwickelt. Ein Blick auf die Umsatzstatistik zeigt, dass vor allem diverse Nussorten, allen voran Bio Jumbo Cashews, steirischer Reis und getrocknete Bio-Mangos gekauft werden.

4 ERGEBNISSE AUS DEN KUND*INNENBEFRAGUNGEN

Nachfragend stellen wir die Ergebnisse der Begleitforschung zu verpackungsreduziertem Einkaufen bzw. konkret zum Einkaufen am Unverpackt-Regal dar. Die ebenfalls durchgeführten Analysen bei Mitarbeiter*innen und Lieferant*innen können aus Platzgründen nicht ausgeführt werden.

4.1 Quantitative Online-Kund*innenbefragung 2020

Die erste Umfrage im Rahmen von 1, 2, 3 wurde im Frühjahr 2020 coronabedingt online durchgeführt (vgl. dazu und im Folgenden Edlinger & Gelbmann (2020)). Dadurch kam es naturgemäß zu einer gewissen Verzerrung der Stichprobe, da vor allem jüngere, weibliche und höher gebildete Menschen teilnahmen. Da diese aber auch gut mit der „Speerspitze“ der ökologisch interessierten und motivierten Käufer*innenschicht übereinstimmen und so einen guten Einblick geben, bilden die Ergebnisse dennoch eine gute Basis für weitergehende Untersuchungen. Dies gilt umso mehr, als laut Ergebnissen 90 % der Proband*innen bereits über Wissen zu verpackungsreduziertem Einkaufen verfügen und auch mit dem (vor Einführung des Unverpackt-Regals) vorhandenen Sortiment vertraut sind. Trotzdem nutzen nur ca. 20 % der Proband*innen nach ihren eigenen Angaben Möglichkeiten wie das Mitbringen eigener Behältnisse in die Feinkost, während die Bereitschaft, Mehrwegsackerl etwa für Obst und Gemüse zu verwenden, sehr groß ist. Insgesamt sehen wir die Bereitschaft der Proband*innen Verpackungen beim Einkauf zu reduzieren, als sehr hoch an, und die meisten der Proband*innen wünschen sich einen weiteren Ausbau des Angebots an unverpackten bzw. verpackungsreduzierten Lebensmitteln vor allem in den

Bereichen Obst und Gemüse sowie Mehrwegprodukte und eventuell auch Milchabfüllautomaten im Bereich der Molkereiprodukte. Dieser Wunsch erstreckt sich auch auf den Non-Food-Bereich vor allem im Hinblick auf nachfüllbare Reinigungsmittel. Die Ergebnisse der Studie waren nur bedingt repräsentativ, dienten aber als fruchtbare Basis für weitere Studien zum Thema im Jahr 2021.

*4.2 Quantitative Online-Kund*innenbefragung 2021*

Im Frühjahr 2021 war eine quantitative Untersuchung vor Ort in SPAR Märkten geplant, die wegen des COVID-Lockdowns nicht umgesetzt werden konnte. Stattdessen wurde wieder eine Online-Befragung durchgeführt (vgl. dazu und im Folgenden Edlinger & Gelbmann (2022)), die wiederum zu der bereits aus 2020 bekannten Verzerrung hin zu eher weiblichen und jüngeren Proband*innen geführt hat. Im Rückschluss lässt das darauf schließen, dass vor allem Personen mit Interesse an Nachhaltigkeit erreicht wurden, die abseits von geringerer statistischer Repräsentativität besonders wertvolle Hinweise für die weitere Ausgestaltung des Programms liefern können. Auch wurde deutlich, dass, obwohl die Befragung nicht in SPAR-Märkten durchgeführt wurde und dieser Verzerrungsaspekt daher entfiel, SPAR-Supermärkte von den Proband*innen als besonders weit fortgeschritten im Hinblick auf die Reduktion von Verpackungen wahrgenommen werden.

Weiterhin wurde daraus klar, wo die wichtigsten Ansatzpunkte für die weitere Mobilisierung der Bevölkerung liegen, nämlich bei männlichen Personen, bildungsfernen Schichten und der älteren Generation. Auch lassen sich große Unterschiede in Bezug auf Wissen um verpackungsärmere Alternativen und deren Nutzung auch bei bereits aktivierten Nutzer*innen erkennen (etwa bei der Nutzung des Angebotes unverpackten Einkaufens an der Feinkosttheke). Interessant ist, dass sich die Proband*innen sowohl ausreichend wie auch nicht ausreichend informiert fühlen. Diese Diskrepanz dürfte wohl auf den Unterschied zwischen vom Handel zur Verfügung gestellter Information und dem eigenen Informationsbeschaffungsverhalten zurückzuführen sein.

*4.3 Qualitative Online-Kund*innenbefragung 2021*

Die qualitative Befragung (Gelbmann & Edlinger 2022) von 30 Personen erreichte anders als die quantitativen Erhebungen eine breite Streuung hinsichtlich Alter, Geschlecht und Bildung. Sie wurde mittels qualitativer Inhaltsanalyse ausgewertet und erzielte eine theoretische Sättigung. Hier wurde ein bereits hohes Wissen über verpackungsarmes Einkaufen im Supermarkt insbesondere im Hinblick auf Produktgruppen wie Obst und Gemüse oder Feinkost deutlich, und Mehrwegprodukte im Supermarkt sind fast allen bekannt.

Dennoch entscheiden meist vorhandenes Wissen über verpackungsärmere Alternativen und deren Verfügbarkeit und besonders der Preis über die Nutzung dieser Alternativen. Mehrere der Befragten gaben an, verpackungsarme Alternativen als deutlich teurer zu empfinden – diese Einschätzung deckt sich im Übrigen mit den Ergebnissen aus der Befragung der Kund*innen des Unverpackt-Regals. Bezüglich des Wissens über die Umweltverträglichkeit nehmen die Befragten zum Großteil Kunststoff als am umweltschädlichsten wahr, während sie vor allem Verpackungen aus Glas und Papier als umweltfreundlich einschätzen und die Möglichkeit des Recyclings als positiv hervorheben. Eine wichtige Information, an der für weitere Aktionen angesetzt werden kann, ist, dass quer durch alle sozialen Schichten das Thema bereits mit Freund*innen und im Familienkreis erörtert wird. Schließlich wünschen sich viele der Befragten ein Mehr an Informationen, eine breitere öffentliche Diskussion und vor allem strengere rechtliche Vorgaben in Bezug auf den Umgang mit Verpackungen.

*4.4 Befragung der Kund*innen des Unverpackt- Möbels 2021 2021*

Eine besonders umfangreiche Studie wurde im Frühjahr 2021 im Hinblick auf das Unverpackt-Regal unternommen (vgl. dazu und im Folgenden Gelbmann et al. (2022)), um ein ungefähres Kund*innen-Profil zu erstellen und die Entwicklung des Unverpackt-Regals zu verfolgen. Evaluiert wurden dabei die Marketingmaßnahmen einerseits und die Nutzbarkeit des Unverpackt-Regals durch die Kund*innen bzw. deren Zufriedenheit andererseits. Genutzt wurde dazu ein standardisierter Fragebogen, der im Rahmen von drei Aktionstagen von den Mitarbeiter*innen

direkt an Kund*innen, die beim Unverpackt-Regal einkauften, ausgegeben wurde und vor Ort im Geschäft abgegeben werden konnte, Auch ein online Ausfüllen war möglich. Der Rücklauf war mit 218 Fragebögen relativ hoch, was bedeutet, dass sehr viele der Kund*innen des Unverpackt-Regals auch an der Umfrage teilnahmen und so gut Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit möglich sind. Diese Grundgesamtheit kann als „Kund*innen des Unverpackt-Regals“ angegeben werden und ist statistisch nicht genau bekannt. Wie bei den anderen Umfragen überwiegen auch hier jüngere und besser gebildete Frauen.

Der überwiegende Anteil der Proband*innen quer durch alle Altersgruppen und Geschlechter nutzte das Unverpackt-Regal, um Verpackungsmüll zu reduzieren, auch die frei wählbare Menge des jeweiligen Lebensmittels stellte ein wesentliches Kaufargument dar.

Die meisten der Proband*innen wurden im direkten Gespräch bzw. direkt durch Freund*innen oder Bekannte auf das Unverpackt-Regal aufmerksam, gefolgt von den Aktionen des „Unverpackt Montags“, bei dem an Montagen im Geschäft 15 %-Rabatt Gutscheine für den Einkauf beim Unverpackt-Möbel ausgegeben wurden. Großflächig angelegte klassische Werbeaktionen wurden im Versuchszeitraum nicht durchgeführt, aber auch Social Media oder die Website spielten nur eine untergeordnete Rolle bei der Bekanntheit. Wesentlich waren also Mundpropaganda und Bewusstseinsbildung direkt am Point of Sale.

Interessant ist, dass wiederum quer durch alle Geschlechter sowie Alters- und Ausbildungsgruppen nicht einmal die Hälfte der Proband*innen ein eigenes Behältnis mitbringt, sondern zum Abfüllen die vor Ort angebotenen Gratis-Papiersackerl nutzt. Damit ist strenggenommen der Effekt des „verpackungsfreien“ Einkaufens wieder obsolet, denn ob ein Produkt vorverpackt ist oder in eine Einweg-Verpackung vor Ort abgefüllt wird, ist ökologisch eigentlich egal. Als positiver Effekt verbleibt jedoch das gesteigerte Bewusstsein der Konsument*innen, das, so bleibt zu hoffen, längerfristig zu tatsächlich nachhaltigerem Handeln führt. Als Gründe für ihr Handeln geben die Kund*innen mit überwältigender Mehrheit an, dass sie ihre Behälter daheim vergessen haben. Hier könnte sich im Zeitverlauf ein Lerneffekt einstellen, ähnlich wie beim „Mehrweg-Einkaufssackerl“, wenn man vor Ort auf die negativen Effekte der zusätzlichen Einwegverpackung hinweist.

Bezüglich des Handling am Unverpackt-Regal selbst stellte der Großteil der Proband*innen fest, dass die Entnahme und das Abwiegen problemlos funktionierten. Als Probleme wurde in Einzelfällen angegeben, dass sich etwa Nudeln verklemmt hatten oder Mangoscheiben aneinander kleben, was ein Portionieren erschwerte. Als für weitere Verbesserungen wesentlich ist der Hinweis zu werten, dass kleine Öffnungen das Entnehmen der Ware erschweren und insbesondere, dass die Beleuchtungsverhältnisse die Sichtbarkeit der Ware im System erschweren. Auch die dunkle Gestaltung der Rückwand wurde als wenig einladend bezeichnet. Besonders interessant sind die Antworten auf die Frage nach der Preiswürdigkeit der Produkte. Diese haben denselben Preis pro Kilogramm wie dieselben vorverpackten Produkte. Generell halten die Proband*innen die Produkte eher für ihren Preis wert, doch gibt es hier auch einige, die die Produkte als nicht preiswert sehen, vor allem bei den älteren Proband*innen, bei denen immerhin 50 % so empfinden. Hier gibt es auch einen Unterschied bezüglich der Geschlechter, der zeigt, dass die Frauen eher preiskritisch sind. Ein großer Teil hält die unverpackten Produkte für teurer als die vorverpackten, was vermutlich an der fehlenden Einschätzbarkeit der entnommenen Menge liegt. Auch andere Gründe als der Preis selbst wurden mit geringer Häufigkeit für eine negative Beurteilung angegeben, etwa dass das Ablaufdatum fehlt oder dass im Unverpackt-Regal tatsächlich nur extrem hochpreisige Artikel angeboten werden. Hier ist an Nachjustierungen noch zu arbeiten.

Letztlich gab aber die überwältigende Mehrheit der Proband*innen an, wieder am Unverpackt-Regal einkaufen zu wollen.

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Konsumenten*innen interessieren sich zunehmend für nachhaltiges Einkaufen und in diesem Zusammenhang für verpackungsarmes Einkaufen. Einige der Angebote in dieser Richtung, wie etwa die Mehrweg-Milchflasche, werden gut angenommen, auch bei Obst und Gemüse wird vermehrt unverpackt eingekauft. Expert*innenmeinungen und statistische Daten zeigen, dass Corona diese Entwicklung gebremst hat, da Abgepacktes als hygienischer empfunden wird.

Das gilt wohl auch für das Unverpackt-Regal für haltbare Lebensmittel, dessen Umsatz im Test-Zeitraum leider nicht ganz die Erwartungen erfüllt hat. Generell kann man aus dem Projekt 1, 2, 3 aber sehr viele Schlussfolgerungen für das weitere Vorgehen im Hinblick auf Verpackungsreduktion ableiten: Die Menschen sind bereit, sich auf verpackungsreduziertes Einkaufen einzulassen, es bedarf dazu aber eines längeren Lernprozesses, sowohl innerhalb des umweltbewussten Käufer*innensegments (z.B. nicht vergessen oder lernen, eigene Behältnisse mitzubringen), als auch und vermehrt im noch nicht sensibilisierten Segment. Hier hoffen wir auf breit angelegte Informationskampagnen seitens der öffentlichen Hand und auf einen langen Atem bezüglich des angebotenen Sortiments seitens des Lebensmitteleinzelhandels, wobei nicht nur Premium- und Bio-Produkte verpackungsreduziert angeboten werden sollten, sondern auch Produkte, die das (noch) nicht sensibilisierte Publikum zum Kauf motivieren.

6 DANKSAGUNG

Dieser Beitrag wurde ermöglicht durch unsere Arbeit im Projekt „1, 2, 3, -Verpackungsfrei“. Wir danken den Kooperationspartner*innen SPAR Österreichische Warenhandels AG – Steiermark und dem Österreichischen Ökologieinstitut sowie unserer Fördergeberin, der Österreichischen Verpackungskoordinierungsstelle, für die Unterstützung des Projekts.

LITERATUR

- Edlinger, J., Gelbmann, U. (2020) 1, 2, 3 - Verpackungsfrei Ergebnisse der Befragung „Einkaufsverhalten im Supermarkt“. Teilbericht des Projekts 1, 2, 3 - Verpackungsfrei, VKS - Universität Graz, SPAR Steiermark und Österreichisches Ökologieinstitut, Graz.
- Edlinger, J., Gelbmann, U. (2022) 1, 2, 3 - Verpackungsfrei Quantitative Kund*innenbefragung 2021. VKS - Universität Graz, SPAR Steiermark und Österreichisches Ökologieinstitut, Graz.
- Gelbmann, U., Edlinger, J. (2022). 1, 2, 3 - Verpackungsfrei Qualitative Kund*innenerhebung. VKS - Universität Graz, SPAR Steiermark, Österreichisches Ökologieinstitut, Graz.
- Gelbmann, U., Holzer, C., Edlinger, J. (2022) 1, 2, 3 - Verpackungsfrei Kund*innenbefragung zum Unverpackt-Möbel. VKS- Universität Graz, SPAR Steiermark, Österreichisches Ökologieinstitut, Graz.
- Habermehl, T., Decker, T., Menrad, K. (2021) Welche Maßnahmen wünschen sich Konsument*innen? Ausgewählte Vorschläge zur Reduktion von Plastikverpackungen. In B. f. (Hrsg.), Verbraucherreaktionen bei Plastik und dessen Vermeidungsmöglichkeiten am Point of Sale (VerPlaPoS) (S. 19-26).
- Holzer, C., Lückl, S. (2022) 1, 2, 3 - Verpackungsfrei Konzeption des Unverpackt-Regals. VKS - Universität Graz, SPAR Steiermark, Österreichische Ökologieinstitut, Graz.
- Ketelsen, M., Janssen, M., Hamm, U. (01. 05 2020) Consumers' response to environmentally-friendly food packaging - A. *Journal of Cleaner Production*, 154.
- Kröger, M., Wittwer, Alexandra, Pape, J. (2018) Unverpackt einkaufen: Mit neuen Routinen aus der Nische? *Ökologisches Wirtschaften-Fachzeitschrift*, 4, S. 46-50.
- Marken, G., Wagenfeld, N., Dangel, V., Hettich, E., Kitzberger, M., Nestele, J., Rubik, F. (2020) Einkaufsgewohnheiten und Einflussfaktoren beim Unverpackt-Einkauf. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Heidelberg.
- Sattlegger, L. (23. 12 2020) Making Food Manageable – Packaging as a Code of Practice for Work Practices at the Supermarket. *Journal of Contemporary Ethnography*, 50(3), S. 1341-367.

Ressourceneffizienz der Rückgewinnung von Indium mittels chlorhaltiger Abfälle auf der "Chlor-Plattform"

M. Peer^{1,2}, M. Bär¹, B. Berninger¹, M. Mocker¹ & W. Kunz³

¹⁾ Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Amberg, Deutschland

²⁾ Fraunhofer UMSICHT, Abteilung Kreislaufwirtschaft, Sulzbach-Rosenberg, Deutschland

³⁾ Universität Regensburg, Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, Regensburg, Deutschland

KURZFASSUNG: Messgrößen für Technologien und Maßnahmen, die zu einer Steigerung ressourceneffizienten Handelns führen, können ebenso mannigfaltig sein, wie die Wege zu einer Steigerung der Ressourceneffizienz selbst. Um Empfehlungen für unternehmerische und politische Entscheidungsprozesse aussprechen zu können ist jedoch eine Vergleichbarkeit solcher Messgrößen relevant. Vor diesem Hintergrund wurde eine für Ökobilanzen nutzbare Methodik entwickelt, die den abiotischen Ressourcenverbrauch ganzheitlich messbar macht. Am Beispiel der Rückgewinnung von Indium mittels chlorhaltiger Abfälle vom Projekt „Chlor-Plattform“ wird die Ressourceneffizienz und eine Ökobilanzierung in der Kategorie Treibhauspotential aufgezeigt.

1 EINLEITUNG

Ressourceneffiziente Arbeitsweisen ermöglichen es Unternehmen, Kosten, Importabhängigkeiten und die mit dem Rohstoffverbrauch verbundenen Umweltauswirkungen zu verringern. Anerkannte Strategien hierzu sind die generelle Verringerung des Ressourceneinsatzes zum Erreichen eines bestimmten Nutzens oder die Erhöhung des Nutzens aus einem gegebenen Ressourceneinsatz. In beiden Fällen steigt der Quotient – die Ressourceneffizienz – aus Nutzen zum dafür nötigen Aufwand an. Der Freistaat Bayern unterstützt in diesem Zusammenhang die Entwicklung von Innovationen durch anwendungsorientierte Forschung im Bereich Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft. Die Messgrößen für Technologien und Maßnahmen, die zu einer Steigerung ressourceneffizienten Handelns führen, können ebenso mannigfaltig sein, wie die Wege zu einer Steigerung der Ressourceneffizienz selbst. Um Empfehlungen für politische sowie unternehmerische Entscheidungsprozesse aussprechen zu können ist jedoch eine Vergleichbarkeit solcher Messgrößen relevant. Für den Projektverbund ForCYCLE II (Mocker et al. 2018), welcher durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert wird, werden im Projekt NetCYCLE II unter Federführung der OTH Amberg-Weiden geeignete Kennzahlen zur Bewertung und Vergleichbarkeit von Ressourceneffizienz erarbeitet. Ziel ist es hierbei, die in verschiedenen Einheiten erfassten Einsparungseffekte mittels einer aggregierten Kenngröße ähnlich dem Energieeffizienzlabel vergleichbar zu machen.

Bei der Rückgewinnung von Indium mittels chlorhaltiger Abfälle im Projekt „Chlor-Plattform“ (Peer et al. 2020) wird durch ein neues innovatives Recyclingverfahren die Ressourceneffizienz und eine Ökobilanzierung in der Kategorie Treibhauspotential aufgezeigt.

2 RESSOURCENEFFIZIENZ UND ÖKOBILANZIERUNG IN DER KATEGORIE TREIBHAUSPOTENTIAL BEI DER RÜCKGEWINNUNG VON INDIUM MITTELS CHLORHALTIGER ABFÄLLE

Mittels Pyrolyse werden PVC-Abfälle thermochemisch behandelt. Der halogenhaltige Dampf wird zur Chlorierung der kritischen Metalle in einem nachgeschalteten Reaktor verwendet. Diese verdampfen, kondensieren in einer anschließenden Kühleinheit aus und bilden somit ein metallreiches Kondensat aus dem die kritischen Metalle zurückgewonnen werden. Hierbei wurden in einer Versuchsreihe verschiedene PVC-haltige Abfälle wie beispielsweise PVC-Profile thermochemisch im Technikumsmaßstab behandelt, um Indium aus LCD-Panels zurückzugewinnen. Durch anschließendes Mischen des Metallkonzentrates mit Wasser und Filtration mit einem Partikeldurchmesser von 2 µm konnten kohlenstoffhaltige Partikel entfernt werden. Anschließend

wurde das Filtrat destilliert. Das Indium reichte sich im Destillationssumpf an und konnte durch Elektrolyse zurückgewonnen werden. Die chlorarmen Fraktionen und die von kritischen Metallen befreiten Fraktionen können dem Wirtschaftskreislauf wieder zur Verfügung gestellt werden. Dieser Ansatz ist in der Abbildung 1 schematisch stark vereinfacht dargestellt.

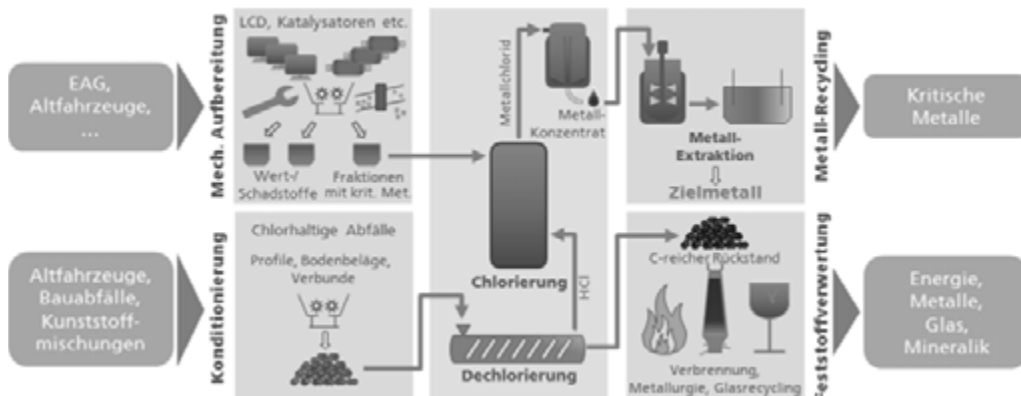


Abb. 1: Projektschema „Chlor-Plattform“

2.1 Daten der Chlor-Plattform

Für die Betrachtung der Ressourceneffizienz und eine vergleichende Ökobilanzierung in der Kategorie Treibhauspotential zur Rückgewinnung von Indium mittels chlorhaltiger Abfälle werden eigene Daten aus dem Demonstrations-, Technikums- und Labormaßstab verwendet, um eine erste Abschätzung durchzuführen.

Bei der thermochemischen Behandlung von chlorhaltigen Abfällen mit hohem PVC-Gehalt werden die Daten aus dem oben genannten PVC-haltigen Stoffstrom PVC-Fensterprofile verwendet. Hierbei beträgt der PVC-Gehalt etwa 50 %. Die benötigte thermische Energie für die Konversion wird mit 2.582 MJ/t angenommen. Der Bedarf an thermischer Energie wird mit der erzeugten Energie aus dem Pyrolysegas von 6.940 MJ/t verrechnet und somit ergibt sich ein Überschuss von 4.358 MJ, welcher als Gutschrift thermische Energie in die Betrachtung einfließt. Als weitere Gutschrift stehen die Vermeidung von 235 kg Calcium-hydroxid (Ca(OH)_2) bei der stöchiometrischen Neutralisation bei der thermischen Verwertung, Vermeidung von der Deponierung der Salze bei der Rauchgasreinigung der thermischen Verwertung (350 kg), die Bereitstellung des dechlorierten gereinigten Koks (167 kg) und Salzsäure (HCl 100%) (222 kg). Dem gegenüber steht ein Ausstoß bei der Deponierung von Salz (CaCl_2) aus dem Waschen des Koks (137 kg), Abfall aus der Reinigung des Pyrolysegas zur Deponierung unter Tage (96 kg), Natronlauge (96 kg), Wasser zum Waschen des Koks (178 kg) und Strom für den Betrieb der Pyrolyseanlage (5 kWh).

Bei der Versuchsreihe mit den verschiedenen PVC-Abfällen wurde bei der Chlorierung der LCD-Panels je Tonne 60 kg Metallkonzentrat mit einem Gehalt von 550 ppm Indium generiert. Als Einsatzstoffe werden 5 kWh Strom und 1.511 MJ thermische Energie betrachtet. Das Filtermaterial wird nicht mitbetrachtet. Der Filtrationsrückstand kann wieder in den Chlorierungsprozess zurückgeführt werden und konvertiert dort hauptsächlich zu Gas, welches verbrannt wird. Eine Gutschrift der daraus erzeugten Wärme wird nicht mitbetrachtet, um einen Ausgleich zum nicht betrachteten Filtermaterial herzustellen. Die erzeugten Produkte Essigsäure (12 kg), Aceton (2,4 kg), Ethylacetat (2,4 kg), Essigsäuremethylester (9 kg) und Indium (18,7 g) stehen dem Wirtschaftskreislauf zur stofflichen Nutzung zur Verfügung.

2.1.1 Ressourceneffizienz und Treibhauspotential

Bei der Aufstellung der Ressourceneffizienz und Ökobilanzierung in der Kategorie Treibhauspotential des Prozesses für chlorhaltige Abfälle mit hohem PVC-Gehalt und LCD-Panels werden in

Anlehnung an die Methodik zur Erstellung von Ökobilanzen nach DIN EN ISO 14040 / 14044 durchgeführt. Die benötigten und erzeugten Mengen an Chemikalien, Stoffströme, elektrischen Stroms, Wärmeenergie stammen aus eigenen Daten. Deren Wirkungsindikatorenwerte sind aus der Datenbank Ecoinvent Version 3.7.1 entnommen. Für überschüssige sowie benötigte Wärme bei den Prozessen wird der Wirkungsindikatorenwert für thermische Energie durch Verbrennung von Erdgas verwendet. Hierbei wird je eine Tonne Abfall, der durch den im Rahmen des Projektes entwickelten Recyclingprozesses hinsichtlich der Wirkungskategorie Treibhauspotential betrachtet und damit der Einfluss auf die Erderwärmung. Für die Verbrennung wird rein der freigesetzte enthaltene Kohlenstoff in den Abfällen betrachtet.

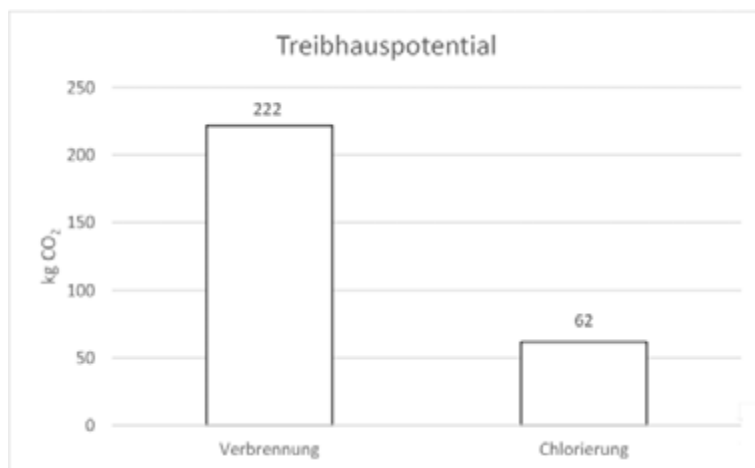


Abb. 2: Treibhauspotential für die Chlorierung und Verbrennung von einer Tonne LCD-Panels

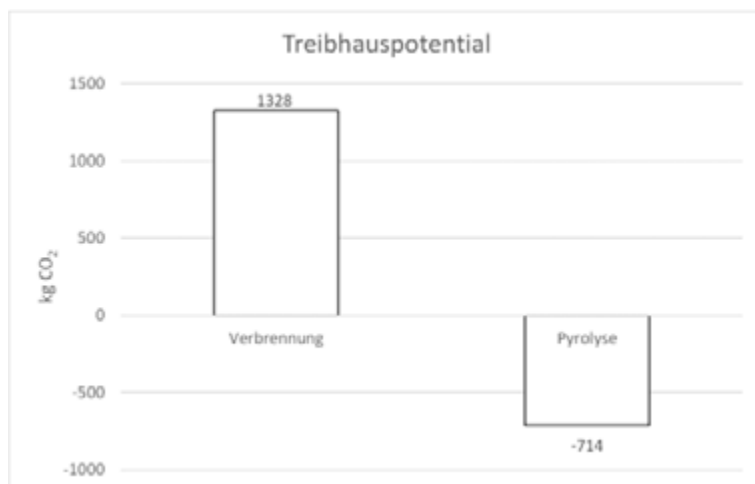


Abb. 3: Treibhauspotential für die Pyrolyse und Verbrennung von einer Tonne PVC-Abfälle

Bei der Behandlung von LCD-Panels kann durch den neu entwickelten Recyclingprozess der CO₂-Ausstoß um 72 % gesenkt werden und zusätzlich Indium als kritisches Metall zurückgewonnen werden.

Im Falle von den chlorhaltigen Kunststoffabfällen können durch die stoffliche Nutzung des Chlors, Pyrolyseöl sowie –gas erhebliche Mengen an CO₂ eingespart werden.

3 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Bei der Behandlung der Abfallströme chlorhaltige Kunststoffabfälle und LCD-Panels mit dem neu entwickelten Recyclingprozess können erhebliche CO₂-Einsparungen realisiert werden, deren großtechnische und flächendeckende Umsetzung in Bayern, Deutschland oder ganz Europa einen Betrag zur Senkung des CO₂-Ausstoßes in der Kreislaufwirtschaft leisten kann.

Zusätzlich kann hierbei noch Indium zurückgewonnen, der Primärabbau dadurch reduziert und die Abhängigkeit der bayerischen oder sogar europäischen Wirtschaft von Importen verringert werden.

Wie eingangs aufgeführt, ist die Betrachtung des Ressourcenverbrauchs nur ein Baustein auf dem Weg zu einer respektive wenigen Kennzahlen, welche weitreichend für politische und/oder unternehmerische Entscheidungsprozesse genutzt werden können. Beispielsweise ließen sich die wichtigsten Ergebnisse einer vergleichenden Ökobilanzierung in den Kategorien Treibhauspotenzial, Ressourceneffizienzpotenzial und nicht-erneuerbare Energienutzung parallel darstellen.

4 DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz für die Finanzierung des Projektes NetCYCLE II und „Chlor-Plattform“ im Rahmen des Projektverbunds ForCYCLE II.

LITERATUR

- Mocker, M., Hense, P., Neidel, J. (2018) Projektverbund zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der bayerischen Wirtschaft - ForCYCLE II. in: Pomberger, R. et al. (Hrsg.): 14. Recy & DepoTech-Konferenz 2018, Montanuniversität Leoben, S. 381 - 386.
- Peer, M., Berninger, B., Hofmann, A., Franke, M., Kunz, W. (2020) Chlor-Plattform – Verwertung chlorhaltiger Kunststoffabfälle und Rückgewinnung kritischer Metalle. in: Pomberger, R. et al. (Hrsg.): 15. Recy & DepoTech-Konferenz 2020, Montanuniversität Leoben, S. 623 - 626.

Rechtliche Umsetzung der Abfallhierarchie

T. Katalan¹ & M.S. Reitingner¹

¹⁾ E+H Rechtsanwälte GmbH, Praxisgruppe Öffentliches Recht, Graz/Wien/Klagenfurt, Österreich

KURZFASSUNG: Im Zusammenhang mit der Abfallhierarchie ist eine Vielzahl an rechtlich relevanten Regelungen zu beachten. Die einschlägigen Vorschriften zu finden gestaltet sich mitunter als schwierig, denn zuallererst ist zu bedenken, dass nicht nur nationales Recht von Bedeutung ist, sondern auch europarechtliche Vorgaben zumindest "mitgedacht" werden müssen – beispielsweise die Abfallrahmenrichtlinie, die die Prioritätenfolge für national festzulegenden Maßnahmen vorgibt. Auch im nationalen Recht ist zu differenzieren: Die wichtigsten Materien sind zwar auf Bundesebene durch das Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) geregelt, jedoch ist teilweise auch der Landesgesetzgeber zuständig, beispielsweise für die Organisation der Müllabfuhr. Zudem besteht ein Bundes-Abfallwirtschaftsplan, der die Ziele und Grundsätze des AWG verwirklichen soll. Daneben sind schließlich auch die BVT-Merkblätter und BVT-Schlussfolgerungen zu bedenken, wobei BVT für "beste verfügbare Techniken" steht. Darin werden die bei industriellen Tätigkeiten angewandten Verfahren beschrieben sowie die bei Anwendung dieser Verfahren auftretenden Emissionen und mögliche Emissionsminderungsmaßnahmen erläutert. Die Praxis hat oft mit der Unübersichtlichkeit dieser Regelungen zu kämpfen.

1 ALLGEMEINES

Die rechtliche Umsetzung der Abfallhierarchie ist in Österreich nicht ganzheitlich in einem Gesetz, sondern in unterschiedlichen Bundes- und Landesgesetzen sowie Verordnungen erfolgt, die größtenteils europarechtlich getrieben sind. Einige der relevantesten Regelungen wurden zudem nicht als – allgemein verbindliche – Gesetze, sondern als "technische Standards" bzw. Genehmigungsgrundlagen festgelegt. Insofern ist es nicht immer ganz einfach, auf eine rechtliche Frage eine schnelle und eindeutige Antwort zu finden.

2 EUROPARECHTLICHE RECHTSGRUNDLAGEN

Neben den nationalen Bestimmungen gibt es eine Vielzahl von europarechtlichen Rechtsvorschriften, die teils unmittelbar in Österreich zu vollziehen sind (z.B. die grenzüberschreitende Verbringung von Abfällen nach Artikel 30 der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006) und teils in nationales Recht umzusetzen waren bzw. sind (z.B. die Abfallrahmenrichtlinie, RL 2008/98/EG sowie die – nicht nur für die Abfallwirtschaft relevante – Industrieemissionen-RL, RL 2010/75/EU). Mit Letzterer wurden sieben separate EU-Richtlinien (IPPC, Großfeuerungsanlagen, Abfallverbrennung, 3xTitandioxid, VOC-flüchtige organische Verbindungen) in einer einzigen Richtlinie zusammengefasst.

In der Abfallrahmenrichtlinie wird die sogenannte 5-stufige Hierarchie für den Umgang mit Abfällen festgelegt, die den Mitgliedstaaten eine Prioritätenfolge für ihre national festzulegenden Maßnahmen (von oben nach unten) vorgibt:



Abb. 1: Abfallhierarchie

Im Jahr 2015 wurde zudem das EU-Kreislaufwirtschaftspaket als "Aktionsplan" beschlossen. Ziel ist die Schaffung einer kreislaforientierten Wirtschaft, in der Rohstoffe und Güter möglichst lange im Verkehr bleiben und genutzt werden. Durch Maßnahmen in den Bereichen Produktdesign, Wiederverwendung und Recycling sollen nur geringe Mengen an Abfall entstehen und die Lebenszyklen von Produkten geschlossen werden – sodass aus Alt wieder Neu wird.



Abb. 2: Modell der Kreislaufwirtschaft, Quelle: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile>

3 NATIONALE RECHTSGRUNDLAGEN

Die wichtigste nationale gesetzliche Grundlage für die Abfallwirtschaft in Österreich bildet zweifellos das Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG). Dem AWG liegt ausdrücklich die oben dargestellte Abfallhierarchie zugrunde. Es gliedert sich in allgemeine Bestimmungen, Bestimmungen betreffend die Abfallvermeidung und -verwertung, allgemeine Pflichten für Abfallbesitzer, Sammel- und Verwertungssysteme, Behandlungsanlagen (inkl. Anzeige- und Genehmigungsverfahren), grenzüberschreitende Verbringung sowie Bestimmungen betreffend behördlich zu erteilende Behandlungsaufträge und behördliche Überprüfungen.

Im AWG finden sich zudem die wesentlichen Definitionen des Abfallrechts, wie etwa der Begriff des Abfalls, des Abfallendes, des Nebenprodukts etc. Zudem finden sich darin auch jene Bestimmungen, die letztlich die Einhaltung der Abfallhierarchie von der Vermeidung bis zur Beseitigung sicherstellen sollen.

So werden etwa abfallrechtliche Genehmigungsverfahren, in denen es um die Frage der Bewilligungsfähigkeit neuer Abfallbehandlungsanlagen oder Änderungen derselben geht, nach dem AWG abgehandelt; im Wesentlichen sind dabei – je nach Gefährlichkeit der behandelten Abfälle – das ordentliche und das vereinfachte Genehmigungsverfahren sowie das Anzeigeverfahren zu unterscheiden. Besonderheit des AWG ist die Vollkonzentration, d.h. die umfassende Verfahrens- (betreffend Landesgesetze, v.a. Naturschutz- und Raumordnungsrecht) und Entscheidungskonzentration (betreffend Bundesgesetze, v.a. GewO 1994, das WRG, ForstG, LFG, EIWOG). Es ergeht sohin kurz gesagt nur ein Bescheid, obwohl auch andere Gesetze berührt werden.

Erforderlichenfalls hat die Behörde im Bescheid Auflagen, Bedingungen und Befristungen vorzuschreiben. Der Genehmigungsbescheid hat jedenfalls auch Maßnahmen für die Unterbrechung des Betriebs und vorläufige Maßnahmen für die Auflassung der Behandlungsanlage oder zur Stilllegung der Deponie (Stilllegungsplan) zu enthalten.

Wenn Abfälle nicht gemäß den abfallrechtlichen Vorschriften gesammelt, gelagert, befördert, verbracht oder behandelt werden oder die schadlose Behandlung der Abfälle zur Vermeidung von Beeinträchtigungen der öffentlichen Interessen geboten ist, hat die Behörde die erforderlichen Maßnahmen dem Verpflichteten mit Bescheid aufzutragen oder das rechtswidrige Handeln zu untersagen (Behandlungsaufträge). Bei Gefahr im Verzug hat die Behörde die erforderlichen Maßnahmen unmittelbar anzuordnen und gegen Ersatz der Kosten durch den Verpflichteten nötigenfalls unverzüglich durchführen zu lassen.

Verpflichteter ist dabei jedenfalls der Verursacher, also derjenige, der den Abfall gesammelt, gelagert, befördert, verbracht oder behandelt hat. Da dieser oftmals nicht feststellbar ist, haftet subsidiär auch der Liegenschaftseigentümer. Im AWG finden sich zahlreiche Strafbestimmungen, unter anderem für die Ausübung der Tätigkeit des Sammlers oder Behandlers von gefährlichen Abfällen ohne entsprechende Erlaubnis, für Errichtung, Betrieb oder Änderung einer Behandlungsanlage ohne entsprechende Genehmigung oder eine mobile Behandlungsanlage ohne entsprechende Genehmigung aufstellt oder betreibt. Es drohen zum Teil empfindliche Verwaltungsstrafen bis EUR 100.000,-.

Neben dem Bundes-AWG stehen in allen neun Bundesländern Landesgesetze in Geltung, die jene abfallwirtschaftsrechtlichen Aspekte regeln, die sich in der Zuständigkeit der Landesgesetzgeber befinden. Dies betrifft vor allem die Festlegung der Müllgebühren und die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Organisation der Müllabfuhr. Diese werden auf Gemeindeebene durch Verordnungen ergänzt.

Eine Vielzahl abfallrechtlicher Verfahren kann über das Elektronische Datenmanagement (EDM) Portal des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie elektronisch abgewickelt werden. Das EDM ist ein Verbundsystem von Internetanwendungen und Datenbanken zur Unterstützung komplexer Abläufe bei umweltschutzbezogenen Dokumentations-, Melde- und Berichtspflichten.

Über das EDM müssen etwa Abfallsammler und Abfallbehandler (u.a. aufgrund der Abfallbilanzverordnung) zu Art, Menge, Herkunft und Verbleib von Abfällen melden. Deponieinhaber und Inhaber von bestimmten Anlagen im Zusammenhang mit Deponien müssen gemäß der Deponieverordnung einmal jährlich jeweils über das vorangegangene Kalenderjahr eine Abfall-Input-Output-Meldung erstatten. Nach der Abfallnachweisverordnung können schließlich Begleitscheindaten, die bei der Übergabe von gefährlichen Abfällen deklariert werden müssen, von Meldepflichtigen über diese Anwendung direkt an die Behörde übermittelt werden.

Weitere wichtige Rechtsgrundlage auf nationaler Ebene ist das Altlastensanierungsgesetz (ALSAG). Dieses stellt die rechtliche Grundlage zur Führung des Verdachtsflächenkatasters und des Altlastenatlas dar. Ziel des ALSAG ist die Finanzierung der Sanierung von Altlasten. Darüber hinaus enthält es Regelungen der bundesweiten Erfassung, Abschätzung und Bewertung von Verdachtsflächen. Der Altlastenatlas ist als Verordnung zu qualifizieren und wird laufend entsprechend den Ergebnissen der Untersuchungen aktualisiert. Das Rechtsregime des ALSAG kommt nur im Fall der Eintragung einer Fläche als Altlast in der Altlastenatlasverordnung zur Anwendung. Zur Verwirklichung der Ziele und Grundsätze des AWG hat der BMLRT mindestens alle sechs Jahre einen Bundes-Abfallwirtschaftsplan (BAWP) zu erstellen. Die aktuelle Version ist der BAWP 2017 in der 7. Auflage, der BAWP 2022 befindet sich zum Zeitpunkt der Abgabe dieses Beitrags in Konsultation. Seit der AWG-Rechtsbereinigungsnovelle 2019 sind die Einhaltung des AWG sowie der auf dessen Grundlage erlassenen Verordnung "einschließlich" des BAWP Voraussetzung der Zulässigkeit der Verwertung (§ 15 Abs 4a AWG). Der BAWP selbst stellt jedoch nach wie vor keine Verordnung dar. Der Hinweis auf den BAWP ist daher wohl als Verweis auf den "Stand der Technik" zu verstehen, der jedoch grundsätzlich auch auf andere, geeignete Weise (sachverständig) nachgewiesen werden kann.

Ebenfalls praxisrelevant sind die BVT-Merkblätter und BVT-Schlussfolgerungen. BVT ist die Abkürzung für "beste verfügbare Techniken" sowie die daraus abgeleiteten, zusammengefassten BVT-Schlussfolgerungen. In den BVT-Merkblättern werden die bei industriellen Tätigkeiten angewandten Verfahren beschrieben sowie die bei Anwendung dieser Verfahren auftretenden Emissionen, mögliche Emissionsminderungsmaßnahmen sowie nähere Angaben dazu (Einsatzbedingungen, Kosten von Emissionsminderungsmaßnahmen etc.) erläutert. In den BVT-Schlussfolgerungen schließlich finden sich darauf aufbauend die besten verfügbaren Techniken sowie damit assoziierte BAT-Emissionswerte, die dann als Grundlage für die Erteilung von Genehmigungen heranzuziehen sind. Dadurch soll erreicht werden, dass innerhalb der EU ähnliche Standards bei der Vorschreibung umweltrelevanter Auflagen angewendet werden.

BVT-Merkblätter bzw. Schlussfolgerungen liegen etwa zu folgenden Tätigkeiten vor: Abfallbehandlung, Abfallverbrennung, Abwasser- und Abgasbehandlung, Energieeffizienz, Eisen- und Stahlerzeugung, Intensivtierhaltung.

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Wie sich aus Obenstehendem ergibt, ist die rechtliche Umsetzung der Abfallhierarchie in Österreich keineswegs einheitlich oder zentral erfolgt. Damit haben naturgemäß nicht nur Juristen, sondern auch Praktiker oftmals zu kämpfen. Dazu kommt, dass bei Missachtung der Rechtsvorschriften insbesondere empfindliche Strafen sowie eine weitreichende Haftung drohen.

Es empfiehlt sich sohin, immer wieder zu prüfen, ob die aktuelle Tätigkeit in Einklang mit der Rechtslage erfolgt und dabei auch die Entwicklungen auf EU-Ebene im Blick zu behalten.

LITERATUR

Altlastensanierungsgesetz, Bundesgesetz zur Finanzierung und Durchführung der Altlastensanierung (ALSAG), BGBl I Nr 299/1989

Abfallwirtschaftsgesetz 2002, Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (AWG 2002), BGBl. I Nr. 102/2002

Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017 (BAWP 2017)

Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19.11.2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (Abfallrahmenrichtlinie)

Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24.11.2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Industrieemissionen-RL)

Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14.06.2006 über die Verbringung von Abfällen

Kreislaufschließung von Polyolefin-Verpackungen

N. Krempf¹ & T. Lucyshyn¹

¹) Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Der derzeitige Widerspruch zwischen dem hohen Aufkommen an Kunststoffverpackungsabfällen in Österreich (35 kg/Kopf/Jahr = 300.000 t/Jahr) und der vergleichsweise geringen Recyclingquote, die seit 15 Jahren bei ca. 26 % liegt und bis 2025 auf 50 % gesteigert werden soll, erfordert neue Strategien im Kunststoffrecycling. Insbesondere die Integration von Rezyklaten in die Produktion neuer gleichwertiger Produkte, die immer noch eine große Herausforderung darstellt, ist ein viel-versprechender Ansatz. Zu diesem Zweck hat die ecoplus. Niederösterreichs Wirtschaftsagentur GmbH gemeinsam mit dem Forschungsverband aus der Montanuniversität Leoben mit dem Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung, die Technische Universität Wien mit dem Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie und der Fachhochschule Campus Wien mit dem Fachbereich Verpackungs- und Ressourcenmanagement das branchenübergreifende Kooperationsprojekt Pack2theLoop, mit 18 weiteren Projektpartnern aus der Industrie, ins Leben gerufen, das auf das Recycling von Einweg-Kunststoffverpackungen aus Polyolefinen und Polystyrol (PS) abzielt. Der Schwerpunkt dieses Projekts liegt auf der Entwicklung von qualitätsgesicherten Rezyklaten aus Post-Consumer-Verpackungen, die dann bei der Herstellung neuer Verpackungen eingesetzt werden, wodurch der Wertschöpfungskreislauf geschlossen wird.

1 PROJEKTKONZEPT

Das Projektkonzept wird anhand von zwei Use Cases demonstriert, die (I) das Blasformen von Flaschen aus Polypropylen (PP) oder High Density Polyethylen (HDPE) für Kosmetikanwendungen und (II) das Thermoformen von Bechern aus PS oder PP für Lebensmittelanwendungen umfassen. Am Ende des Projekts wird der Kunststoffindustrie ein Handbuch zur Verfügung gestellt, das wissenschaftlich fundiertes Grundlagenwissen über (a) eine qualitative Verarbeitung von Post-Consumer-Rezyklaten und (b) die Etablierung eines "Design for/from Recycling" für nachhaltige und wiederverwertbare Verpackungen zusammenfasst. Dieses Handbuch berücksichtigt die Ziele der Europäischen Union in Bezug auf das Recycling von Kunststoffverpackungen auf kurze Sicht und wird langfristig zu den UN-Zielen für nachhaltige Entwicklung beitragen.

1.1 Innovationsziele

Das Projekt umfasst 5 Innovationsziele.

(1) Definition der Anforderungen an Verpackungen in Form von (a) „Design for Recycling“, das die Anforderungen an das Material, ein zirkuläres Verpackungsdesign und die damit verbundene Optimierung bestehender Entsorgungsstrukturen festlegt, sowie (b) „Design from Recycling“, welches das Design von Verpackungen unter Berücksichtigung von Verunreinigungen, Abbau und Zusatzstoffen bewertet, um recycelte Polymere wieder zu Verpackungen verarbeiten zu können. Auch die lebensmittelrechtlichen Anforderungen an Verpackungen werden in Form einer Risikobewertung berücksichtigt.

(2) Eine End-of-Life-Betrachtung von Kunststoffverpackungsabfällen in Österreich wird durch die Simulation der möglichen Zusammensetzung von Sortierproben durchgeführt. Ausgehend von einer manuellen Sortierung werden anhand von Szenarioanalysen die erforderlichen Sortiertiefen und Qualitäten von Polyolefin- und PS-Verpackungsabfällen für ein effektives Recycling und für eine mögliche Lebensmittelkontaktzulassung untersucht.

(3) Die Verbesserung der Verwertbarkeit von Verpackungsprodukten bildet die Grundvoraussetzung für das werkstoffliche Recycling. Daher werden Charakterisierungstechniken zur Qualitätsbeurteilung von rezyklierten Kunststoffen und die Ableitung von Qualitätsstandards analysiert und definiert.

(4) Im Use Case II, der das Tiefziehen von Bechern aus PS oder PP inkludiert, wird eine Sicherheitsbewertung von Rezyklaten im Lebensmittelkontext durchgeführt. Es werden die Bedingungen in den einzelnen Prozessschritten (Sammlung, Sortierung, Waschung, Recycling und Produktion) erarbeitet. Diese liefern detaillierte Ergebnisse hinsichtlich der zukünftig zu erfüllenden lebensmittelrechtlichen Qualitätskriterien.

(5) Schließlich wird die Verarbeitbarkeit von Rezyklaten untersucht, einschließlich der Definition von Materialparametern, des Einsatzes einer Online-Qualitätskontrolle beim Compoundieren und der Entwicklung eines Maßnahmenkatalogs für die Materialgruppen der beiden Anwendungsfälle.

2 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Aus Umweltgesichtspunkten wird Pack2theLoop dazu beitragen, eine optimale Recyclingquote für Hohlkörperverpackungen zu ermitteln. Durch das Recycling dieser Verpackungen wird der Nutzen für verschiedene Umweltaspekte maximiert. Der fakten- und methodenbasierte Ansatz wird dazu beitragen, die gesellschaftliche und politische Diskussion um Recyclingquoten weiter zu versachlichen und der Industrie eine wissenschaftlich fundierte Strategie für das Verpackungsrecycling zur Verfügung zu stellen.

Charakterisierungen von wertstoffhaltigen Materialströmen aus einer Abfallsortieranlage in Österreich

A.-M. Lipp^{1,2}, D. Blasenbauer^{1,2} & J. Lederer^{1,2}

¹⁾ Christian Doppler Labor für recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, Technische Universität Wien (TU Wien), Wien, Österreich

²⁾ Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Technische Universität Wien (TU Wien), Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Das EU-Kreislaufwirtschaftspaket beinhaltet unter anderem materialspezifische Recyclingzielquoten für Verpackungsabfälle. Für deren Einhaltung besteht vor allem für Kunststoffe noch Aufholbedarf innerhalb der EU und in Österreich. Eine Möglichkeit zur Erhöhung bieten die technische Sortierung von Outputs aus mechanischen Abfallbehandlungsanlagen für gemischte Siedlungsabfälle. Dafür ist allerdings die genaue Kenntnis dieser Outputs nötig. Hierzu wurde eine Probenahmekampagne in einer Anlage, bestehend aus Shredder, Siebung, Störstoffentfrachtung, Metallentfernung und ballistischer Separation, durchgeführt. Anschließend folgte eine zweistufige Handsortierung. Knapp unter 50% Wertstoffanteil konnte festgestellt werden, mit großen Potentialen an Kunststoffen und Papier. Der potentielle Beitrag durch die untersuchte Anlage zu den Recyclingquoten wurde im unteren Prozentbereich veranschlagt, darf aber im Hinblick auf die nötigen Entwicklungen im Bereich der Kreislaufwirtschaft nicht vernachlässigt werden.

1 EINLEITUNG

Das Kreislaufwirtschaftspaket der EU setzt neue Maßstäbe innerhalb der Abfallwirtschaft, insbesondere in Hinsicht auf Recycling. Gerade die Änderung der Richtlinie 94/62/EG beinhaltet ambitionierte Recyclingzielquoten für Verpackungsabfälle aus Kunststoffen: 50% bis 2025 bzw. 55% bis 2030 (Europäisches Parlament und Rat 2018). Im Jahr 2019 lagen 18 Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU) noch unter der Zielquote von 2025, und auch in Österreich gibt es noch Verbesserungsbedarf (Eurostat 2019). Für die Erreichung dieser herausfordernden Ziele gilt es neue und innovative Technologien zu untersuchen, entwickeln und nutzen. Aufgrund anwachsender Kosten und gleichbleibenden Erfassungsgraden innerhalb der getrennten Sammlung, stellt eine dieser Optionen die Gewinnung wertstoffhaltiger Materialien aus gemischten Siedlungsabfällen mithilfe von Upgrades bereits bestehender mechanischer Abfallbehandlungsanlagen (MA), dar (Feil et al. 2017). Somit können Recyclatströme mit Kunststoffverpackungsabfällen, sowie mit Papier, Pappe und Karton (PPK), aus Restmüll ergänzt werden (Gundupalli et al. 2017). Eine Grundvoraussetzung hierbei ist die genaue Charakterisierung der Outputs und wertstoffhaltigen Ströme vorhandener MAs. Im vorliegenden Beitrag, welcher Teil des *Christian Doppler Labors für recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft* ist, sollen die Wertstoffgehalte und -zusammensetzungen von Outputströmen aus industriellen MAs erhoben werden, um in weiterer Folge Möglichkeiten zur Gewinnung recyclebarer Materialien zu ermitteln. Die Betrachtungen fokussieren sich auf saisonale Analysen im Normalbetrieb.

2 DIE UNTERSUCHTE MECHANISCHE ABFALLBEHANDLUNGSANLAGE FÜR GEMISCHTE SIEDLUNGSABFÄLLE (REST- UND SPERRMÜLL)

Die beschriebene MA befindet sich in Österreich und besitzt eine Jahreskapazität von ca. 80.000 Tonnen. In der Anlage werden gemischte Siedlungsabfälle - 65% Restmüll aus Haushalten, sowie 35% Sperr- und Gewerbemüll - aus einem Einzugsgebiet mit knapp 400.000 Einwohner*innen (Statistics Austria 2021) aufbereitet. Am Anfang der steht eine Zerkleinerung mit anschließender Siebung auf eine Korngröße von 40 bis 250 mm und einer Störstoffentfrachtung. Das Unterkorn (< 40 mm) wird nach einer Abscheidung von Eisen- (Fe) und Nichteisenmetallen (NFe) als Output mit dem geringsten Heizwert definiert (Niederkalorik) und thermisch verwertet. Die Fraktion 40–

250 mm wird mithilfe eines ballistischen Separators in flächiges zweidimensionales 2D-Material (PPK, Folien, Textilien) und rollendes dreidimensionales 3D-Material (Hohlkörper, Flaschen) überführt. Aufgrund des höheren Wassergehalts der 2D-Fraktion ist diese heizwertärmer als die 3D-Fraktion, weswegen erstere als Mittel- und zweitere auch als Hochkalorik bezeichnet wird. Anschließend werden auch diese beiden Ströme einer Metallentfernung (Fe und NFe) unterzogen, in Ballen verpresst und zur thermischen Verwertung verliebert. Folgende Outputströme werden, gereiht nach Massenoutput und bezogen auf 100% Input, produziert: 45% Niederkalorik (0–40 mm), 36% Mittelkalorik (40–250 mm, 2D-Fraktion), 14% Hochkalorik (40–250 mm – 3D-Fraktion), sowie 4% Fe- und 1% NFe-Metalle. Die Beschreibung der Anlage und der Outputs stammt aus Betreiberinformationen.

3 METHODISCHE VORGEHENSWEISE

Zwei der insgesamt drei Outputströme der Anlage wurden in vier (Hochkalorik) bzw. drei (Mittelkalorik) Probenahmen über den Zeitraum von einem Jahr beprobt, um saisonale Schwankung der Abfallzusammensetzung und Trennleistung der Anlage auszugleichen (Ashkikiet al. 2019). Die Entnahme erfolgte dabei mit einem Probenahmegerät aus dem fallenden Materialstrom an den entsprechenden Abwurfbändern, kurz vor den jeweiligen Ballenpressen. Charakterisiert wurden die Outputs mit den größten Anteilen an Wertstoffen, die Hoch- und Mittelkalorik. Alle Proben wurden anschließend einer Handsortierung auf einem Sieb mit der Maschenweite 50 mm unterzogen. Insgesamt wurde in erster Ebene in 13 Fraktionen unterschieden: *Folien* (flächig, aus Kunststoff), *Kunststoff (KST)-Verpackungen* (rigid, Lebensmittel sowie Nicht-Lebensmittel), *Hartkunststoffe*, *PET-Flaschen* (Getränkeflaschen aller Farben), *Expandiertes Polystyrol (EPS)*, *Kunststoffverbunde und elastische Kunststoffe*, *PPK* gemeinsam mit Getränkeverbundkartonen (GVK; Tetrapack, Saft- und Milchverpackungen), *Hygieneabfälle* (Windeln, Taschentücher, Verbandsmaterial etc.), *Textilien*, *Metalle* (Fe und NFe), *Glas*, *Sonstiges* (nicht kunststoffhaltig z.B. Holz, Organik) und *Feinstoffe* (< 50 mm). In der zweiten Ebene wurden Folien nach Material, Oberfläche (Aufdruck) und Farbe, in farblos, farbig, schwarz, bedruckt, metallisiert und biogen, unterschieden. Verpackungen und Hartkunststoffe wurden in Polymere eingeteilt: Polyethylenterephthalat (PET), High Density Polyethylene (HDPE), Polyvinylchlorid (PVC), Low Density Polyethylene (LDPE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS), andere Polymere, Multilayer und nicht zuordenbare (unbekannt).

4 ERGEBNISSE

Abb. 1 zeigt die durchschnittliche Verteilung der Sortierfraktionen auf die Outputs Mittel- und Hochkalorik. Für die Hochkalorik liegt der Kunststoffanteil bei ca. 44%, der Anteil anderer Wertstoffe bei 14% (wobei ca. 80% dieser auf PPK/GVK entfallen) und 42% restlicher Nichtwertstoffe. Näherungsweise 25% der Kunststoffe liegen als rigid Monomaterialien vor, davon 18% PET-Flaschen mit hohem ökonomischem Wert. Die überbleibenden 19% sind Verbundstoffe oder elastische Kunststoffe. Ca. 20% Kunststoffe treten innerhalb der Mittelkalorik auf, 29% andere Wertstoffe (davon 55% PPK/GVK) und 51% Rest. Im Mittel kommen 11% der Mittelkalorik als Monokunststoff vor, wovon 70% Folien sind. Metalle und Glas fallen nur in sehr geringen Mengen an, das erstens auf eine gute Trennleistung der Metallabscheidung und zweitens auf das gut etablierte getrennte Sammelsystem für beide Materialien hindeutet. Die höheren Anteile an Folien, PPK/GVK und Textilien in der Mittelkalorik, sowie überwiegende Vorkommen von KST-Verpackungen, Hartkunststoffen und PET-Flaschen innerhalb der Hochkalorik, lassen auf eine gute Trennleistung des ballistischen Separators schließen. Der hohe Anteil *Sonstiges* in der Hochkalorik ist zurückzuführen auf die Mitverarbeitung von Sperrmüll in der Anlage und besteht hauptsächlich aus Holzpartikeln und Mineralik. Der höhere Feinstoffanteil der Mittelkalorik könnte an der Bauweise des ballistischen Separators, speziell der fehlenden integrierten Siebung liegen: Feinstoffe werden aufgrund ihrer Größe mit den Stufen nach oben gefördert oder haften besser an zweidimensionalen Partikeln an, zumal diese auch nicht durch Aufprall von den flächigen Abfällen gelöst werden können, wie das bei den 3D-Partikeln der Fall ist. Innerhalb der Fraktion KST-Verpackungen sind im Mittel über Hoch- und Mittelkalorik 30% als PP, 24% als PET und 11% als HDPE anzutreffen, sowie ca. 10% Multilayer. Hartkunststoffe liegen bei 36% PP, 20%

HDPE und 14% anderen Kunststoffe, die nicht näher spezifiziert werden Durchschnittlich 40% der Folien der Hoch- und Mittelkalorik sind farblos und 10% farbig. Bedruckte und metallisierte Folien treten häufiger in der Hochkalorik (31% und 14%) als in der Mittelkalorik (16% und 2%) auf. Schwarze Folien finden sich im Gegenzug mit 9% vermehrt in der Mittel- und weniger in der Hochkalorik (2%). Das theoretische Potential für einen Austrag an Monokunststoffen bei optimaler Wiedergewinnungsrate beträgt insgesamt 6.200 t/a, davon 2.600 t/a Folien, 1.150 t/a Verpackungen und 560 t/a PET-Flaschen. Diese Mengen (exkl. Verpackungsfolien) würden eine maximale Erhöhung der inputbezogenen Recyclingquote für Kunststoffverpackungen von wenigen Prozent im Einzugsgebiet der Anlage bedeuten. Als Basis für die gesamte Menge an recycelten Kunststoffverpackungen dienen hier die Werte aus dem Jahr 2018 (BMK 2021).

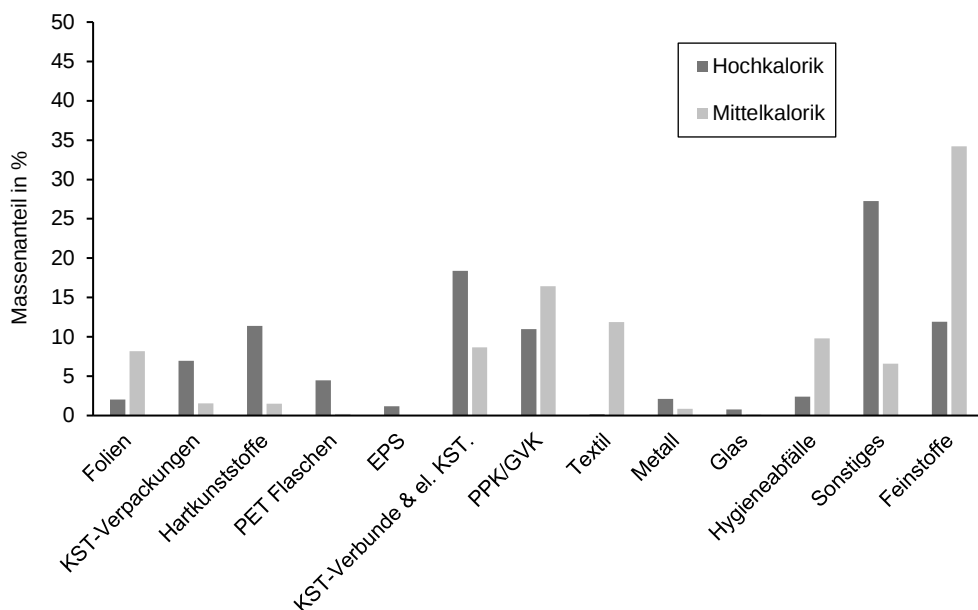


Abb. 1: Anteile der Fraktionen an den Outputs in m.-%, Mittelwerte aller durchgeführten Probenahmen. Insgesamt wurden 30 Proben für die Hochkalorik und 22 Proben für die Mittelkalorik zur Beurteilung herangezogen

5 DISKUSSION UND FAZIT

Durch die Charakterisierung der wertstoffhaltigen Outputs einer mechanischen Abfallbehandlungsanlage konnten Potentiale zum Austrag und zur Erhöhung der Recyclingquoten festgestellt werden. Momentan sind diese aus Restmüll gewonnenen Materialien in der EU noch wenig genutzt. Zukünftige Entwicklungen, nicht zuletzt durch das Kreislaufwirtschaftspaket, lassen jedoch eine nahe Änderung der Rahmenbedingungen in Bezug auf das Recycling jener Stoffströme erwarten. Ein potentieller Zuwachs zur Recyclingquote von Kunststoffverpackungen von auch nur wenigen Prozent vermag gering sein, jedoch besitzt die untersuchte Anlage selbst nur eine Jahreskapazität von 80.000 t/a. Im Vergleich dazu betrug das Aufkommen an gemischten Siedlungsabfällen in Österreich 2019 ca. 1,5 Mio. Tonnen (BMK, 2021). Da es innerhalb Österreichs noch weitere MAs für gemischte Siedlungsabfälle gibt, kann durch den aggregierten Zuwachs eine signifikantere Erhöhung der Recyclingquote bewirkt werden. Nicht nur für die Erreichung der Recyclingquoten, sondern genereller gesprochen für die Entwicklung hin zu einer kreislaforientierten Wirtschaft, bedarf es der Ausschöpfung aller technologischer Möglichkeiten sowie die Berücksichtigung auch kleinerer Materialströme.

6 DANKSAGUNG

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Forschungsinitiative *CD-Labor für Recyclingbasierte 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. Gleichzeitig bedanken wir uns bei unseren Unternehmenspartnern Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoffrecycling Austria AG, Borealis AG, Brantner Österreich GmbH, Lenzing AG, Linz Service GmbH, MM Board and Paper AG, OMV Downstream GmbH, Wien Energie GmbH und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H.

LITERATUR

- Ashkiki, A., Felske, C., McCartney, D. (2019) *Impacts of seasonal variation and operating parameters on double-stage trommel performance*. Waste Management, 86, S. 36–48.
- BMK (2021) *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2021 (Referenzjahr 2019)*. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- Europäisches Parlament und Rat (2018) *Richtlinie (EU) 2018/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle*. OJ, 50(150), S. 141–157.
- Eurostat (2019) *Packaging waste by waste management operations*. Abgerufen am 27. 05 2022 von http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_waspac&lang=en
- Feil, A., Pretz, T., Vitz, P., & van Velzen, E. U. (2017) *A methodical approach for the assessment of waste sorting plants*. Waste Management & Research, 35(2), S. 147–154.
- Gundupalli, S. P., Hait, S., & Thakur, A. (2017) *A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling*. Waste management, 60, S. 56–74.
- Statistics Austria (2021) *Bevölkerung der Politischen Bezirke mit 1.1.2021*. Abgerufen am 23. 05 2022 von https://www.statistik.at/web_de/klassifikationen/regionale_gliederungen/politische_bezirke/index.html

Bestimmung von Mikroplastik in der Donau

S. Lenz¹, J. Mayerhofer¹ & G. Obersteiner¹

¹⁾ Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Trotz steigender Mikroplastikverschmutzung unserer Gewässer werden harmonisierte Methoden für die Probenahme, Probenaufbereitung und Analyse der Mikroplastikproben vermisst. Diese sind jedoch notwendig, um ein zuverlässiges Mikroplastik-Monitoring sowie eine Vergleichbarkeit sowie die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen zu gewährleisten. Anhand von Netzproben aber auch Sedimentationsbox-Proben aus der Donau werden im Rahmen des Projekts Tid(y)Up unter Berücksichtigung von Qualitätssicherung und -kontrolle Protokolle zur Aufbereitung und Analyse von Mikroplastikproben aus Flüssen entwickelt. Proben entlang der Donau und Theiß werden untersucht, um die Verschmutzungssituation entlang der Donau bis zum Schwarzen Meer zu beurteilen, sowie die Qualität unterschiedlicher Probenahmemethoden zu vergleichen.

1 UNTERSUCHUNG VON MIKROPLASTIK IN DER DONAU

Im Rahmen des Projektes Tid(y)Up wurden entlang der Donau und der Theiß an acht verschiedenen Stellen (in Österreich, Ungarn, Serbien, Rumänien und Bulgarien) unterschiedliche Mikroplastik (MP) Probenahmemethoden parallel getestet und evaluiert, um ein praktikables MP-Monitoring Tool zu entwickeln. Die Probenaufbereitung und -analyse von heterogenen Netzproben aber auch Sedimentationsbox-Proben aus Flüssen wird derzeit am Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft untersucht und optimiert.

2 METHODE

2.1 Probenahmemethoden im Fließgewässer großer und mittelgroßer Flüsse

Im Zuge der MP-Messkampagne in der Donau wurden eine weiterentwickelte Netzmethode, die die Tiefenvarianz und die räumliche Verteilung über das Querprofil berücksichtigt (Liedermann et al. 2018), die sogenannte Kaskadenpumpmethode (höhere Auflösung für kleine Partikelgrößen) und eine Sedimentationsbox verglichen (ICPDR 2020). Das Hauptaugenmerk der Messungen lag nicht per se auf den Ergebnissen, vielmehr sollten Faktoren wie Praktikabilität in der Umsetzung, Benutzerfreundlichkeit, Fehleranfälligkeit, etc. auch in Abhängigkeit der fluvialen Rahmenbedingungen in den verschiedenen Ländern bewertet werden (Obersteiner et al. 2022).

2.2 Probenaufbereitung und Analyse

Ziel der Probenaufbereitung ist die Isolation der Mikroplastikpartikel für die nachfolgende Detektion. Die Isolation der Mikroplastikpartikel aus Netz-Flussproben, die sowohl hinsichtlich Zusammensetzung (Gehölze, Sedimente, Wasserlebewesen, Blätter etc.), als auch Größenverteilung sehr heterogen sind, stellt ein sehr zeitaufwändiges und mühsames Unterfangen dar.

Um unerwünschte organische und anorganische Beifänge abzutrennen sind unterschiedliche Aufbereitungsschritte notwendig, die im Rahmen des Projektes Tid(y)Up für Netzproben aber auch Sedimentationsbox-Proben unter Berücksichtigung von Qualitätssicherung und -kontrolle evaluiert und optimiert werden. Eine Degradation oder chemischer Abbau der Mikroplastikpartikel soll dabei ebenso vermieden werden wie Sekundärkontaminationen.

Während in Netzproben vor allem große Mengen an unerwünschter Organik entfernt werden müssen, überwiegen in Sedimentationsboxen anorganische Beifänge. Für beide Probenarten werden hierfür derzeit am Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft Protokolle entwickelt und laufend adaptiert. Diverse Aufbereitungsschritte variieren je nach Probenart in ihrer Reihenfolge. Die jeweiligen Kunststoffarten der isolierten Partikeln sowie deren Größe werden im Anschluss mittels

FT-IR Spektrometer sowie FT-IR Mikroskop bestimmt und in Relation zur beprobten Wassermenge gesetzt, um so die Mikroplastik-Fracht (z.B. Tonnen pro Jahr) in der Donau abschätzen zu können. Die Belastungssituation entlang der Donau bis zum Schwarzen Meer kann so untersucht und bewertet werden. Ergebnisse unterschiedlicher Probenahme-Methoden sowie variierende Belastungssituationen innerhalb der Wassersäule (Tiefenvarianz) werden verglichen. Ein praktikables Aufbereitungs- und Analysen-Protokoll für reproduzierbare vergleichbare Ergebnisse wird zur Verfügung gestellt.

3 ERGEBNISSE

Für die Abtrennung der organischen Beifänge aus der Donau stellt sich für Netzproben derzeit folgendes Prozedere als optimal heraus: Entwässerung der Probe mittels 50 µm Sieb, händisches Abtrennen von größeren MP-Partikeln im Wasserbad (> 1000 µm), die Abtrennung der Organik mittels Fenton-Aufschlusses und langwieriger enzymatischer Behandlung (Laccase, Amylase und Cellulase) sowie Abtrennung der Anorganik mittels Dichtentrennung in Zinkchlorid-Lösung ($\rho = 1,7 \text{ g/ml}$). Begleitet werden diese Aufbereitungsverfahren von Trocknungs-, Siebungs- und Filtrationsschritten.

Vor allem der Fenton-Aufschluss (Probenmassenverlust von 57% bis zu 95%) sowie die Behandlung mit Laccase und Cellulase (Probenmassenverlust bis zu 50%) konnten Verunreinigungen stark reduzieren und somit Mikroplastikpartikel für weiterführende Analysen anreichern. Kontrolluntersuchungen mit Referenzpartikel (PE, PP) zeigen einen vernachlässigbaren Einfluss des Aufschlusses auf die zu untersuchenden Mikroplastikpartikel.

Erste Analyseergebnisse der Netzproben aus Budapest weisen auf einen hohen Anteil an Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) unter den MP-Partikeln hin. Weiters wurden beträchtliche Mengen an Kaugummiresten aus der Donau gefischt. Weitere Ergebnisse werden im Herbst 2022 erwartet.

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Neben einer repräsentativen Probenahme sind vor allem eine passende Mikroplastik-Probenaufbereitung bzw. Analyse von großer Bedeutung. Die Herausforderung bei der Probenvorbereitung besteht darin, sämtliche Kunststoffpartikel von allen anderen unerwünschten organischen und anorganischen Verunreinigungen in der Probe zu isolieren, ohne die Mikroplastikpartikel in irgendeiner Weise zu verändern oder gar zu zerstören. Unterschiedliche Aufbereitungsschritte und Analysemethoden führen zu Ergebnissen unterschiedlicher Qualität und Aussagekraft und verhindern somit die Vergleichbarkeit von MP-Studien an Fließgewässern. Harmonisierte Protokolle oder standardisierte Ansätze zur Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle bei der Probenahme und Auswertung von Mikroplastik müssen daher entwickelt werden.

5 DANKSAGUNG

Tid(y)Up wird kofinanziert durch die EU im Rahmen des Danube Transnational Programme des ERDF sowie vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), dem Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) und von viadonau als assoziierte Partner unterstützt. Link zur Webseite: <http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/tid-y-up>

LITERATUR

- ICPDR (2020) Joint Danube Survey 4 Scientific Report: A Shared Analysis Of The Danube River. www.danubesurvey.org.
- Liedermann M, Gmeiner P, Pessenlehner S, Haimann M, Hohenblum P, Habersack H. (2018) A Methodology for Measuring Microplastic Transport in Large or Medium Rivers." *Water* (Basel) 10.4 (2018): 414. Web.
- Obersteiner G, Lenz S, Mayerhofer J. (2022) Vergleich und Bewertung unterschiedlicher Probenahmemethoden zur Untersuchung von Mikroplastik in Flüssen. Recy & DepoTech 2022.

On the road to 2050: The path to achieving a circular economy for mobility and renewable energy

M.T. Kügerl¹, J. Betz² & S. Degreif²

¹) Montanuniversität Leoben, Chair for Mining Engineering and Mineral Economics, Leoben, Austria

²) Oeko-Institut e.V., Division Resources & Transport, Darmstadt, Germany

ABSTRACT: The importance of recycling for the provision and reuse of raw materials in the energy transition is indisputable. However, we are still a long way from a functioning circular economy and numerous obstacles still need to be overcome, with regards to both the technology and policy including legislation. The RE-SOURCING project is developing recommendations in the form of roadmaps on how the value chains for renewable energy and mobility can be made more sustainable. The starting point is an analysis of the State of Play, where numerous problems and obstacles to successful implementation of a circular economy with a focus on recycling in both sectors have been identified. Recommendations for industry, civil society organisations, and European policy makers to address these challenges, particularly the recycling of lithium-ion batteries, wind turbines, and solar photovoltaic panels are provided. These recommendations range from improved transport safety to the substitution of non-recyclable materials and the revision of regulations that have a potentially negative impact on companies' recycling efforts. Furthermore, chances for re-use/repurposing were evaluated. We are aware that circular economy is even broader, but due to the RE-SOURCING project's focus on raw materials, recycling and reuse are at the centre of our research.

1 INTRODUCTION

Climate change is one of the biggest crises humanity is facing at this time (Zwane E. M. 2019). Two of the largest emitters of greenhouse gas (GHG) emissions are the mobility (14% of global GHG emissions in 2018) and energy (34%) sector (Lamb et al. 2021), which require a major shift towards renewable energy and alternative fuel systems to successfully contribute to GHG emission goals (O'Neill et al. 2018). However, this transition comes with its own set of challenges, in particular an increased resource intensity, its dependence on critical minerals and metals, as well as sustainability challenges in the technologies' supply chains (Mancini & Nuss 2020, Wang et al. 2020). These challenges highlight the need for more sustainable resource management from mining, to consumption, to reuse and recycling, and progress towards a clean and circular economy (Smol et al. 2020). In this regard, responsible sourcing (RS) as an approach to address sustainability risks in mineral supply chains has gained interest (van den Brink et al. 2019) and RS considerations are expanding from a previous focus on primary raw materials to secondary raw materials (Bilham 2021) as in e.g., the Circular Economy Action Plan of the European Union (EU) (European Commission 2020a).

In this paper we will explore the development of the RE-SOURCING project's roadmaps for the renewable energy and mobility sectors. Particularly, the paper outlines the issues of collection, reuse and recycling in these two sectors and investigates the question what can be done to advance the circularity of solar photovoltaic (PV) panels, wind turbines, and lithium-ion batteries (LIBs) for vehicles.

1.1 RE-SOURCING – A Global Stakeholder Platform for Responsible Sourcing in Mineral Value Chains

Policy makers, businesses, and civil society organisations (CSOs) are faced with the increasing demand for responsibly sourced mineral raw materials from both primary and secondary sources. In response to this challenge, the RE-SOURCING project, funded under the Horizon 2020 research and innovation programme by the EU, launched its Global Stakeholder Platform for Responsible Sourcing in Mineral Value Chains. The aim of this platform is to establish and advance RS as a minimum requirement in international value chains. RE-SOURCING will develop a comprehensive RS framework following a holistic approach by integrating all stakeholder groups, up- and downstream as well as across mineral value chains. The focus of the project is on three sectors critical for the clean energy transition: renewable energy, mobility, and electric and electronic equipment. For this purpose, RE-SOURCING will deliver three sectoral roadmaps as well as good practice guidance documents providing recommendations for all relevant actors on how to achieve RS and sustainable mineral value chains.

2 METHOD

For the development of the sectoral roadmaps, the “roadmapping” method has been deployed, which allows for the consultation and involvement of all relevant supply chain actors (policy makers, industry, CSOs, academia, and research institutions) (Degreif et al. 2020). The roadmap development is conducted following a predefined process that is the same for all three sectors, but as the sectors are elaborated with a time lag, a learning process between the sectors is facilitated. At the start of the RE-SOURCING project the technologies and mineral raw materials to be investigated in more detail were determined based on recommendations from experts, expected market and technological developments, and currently existing sustainability challenges. The next step was a detailed assessment of the current situation in the defined supply chains, the ‘State of Play Report’, including relevant actors, key issues, standards and initiatives for RS. The report is based on desk research supported by consultation meetings with the project’s advisory board and platform steering committee. The consultation meetings also supported the development of a vision for each sector of what needs to be achieved for the respective sector to be truly sustainable by 2050. The RE-SOURCING project applied the concepts of planetary boundaries and strong sustainability as a conceptual basis for defining this ‘Vision 2050’.

The issues including current company practices and mitigation strategies, available standards and regulations identified in the State of Play Report form the starting point for concrete recommendations for actions outlined in the roadmaps. These recommendations address EU policy makers, industry, CSOs, academia and research and are developed by means of extensive consultation processes; including open webinars, semi-structured interviews, feedback from the project partners, the project’s advisory board and platform steering committee, as well as written feedback via the project’s homepage. The roadmaps are supported by ‘Good Practice Guidelines’ that elaborate good practice cases from different actors and aim at supporting peer learning to achieve the recommendations of the roadmap.

3 RESULTS

The initial consultations undertaken by the RE-SOURCING project indicated the key technologies that need to be considered for the roadmaps of the renewable energy and mobility sectors: solar PV, wind turbines, and LIBs. The respective State of Play Reports showed various challenges that are currently hindering the successful implementation of a circular economy (Betz et al. 2021; Kügerl & Tost 2020). However, these challenges also clearly outline where and what action is required to increase recycling and reuse rates, and resource efficiency. The reports further highlighted some of the efforts (such as standards and guidelines) that are currently being made to address these challenges.

While there are certainly many sector- or technology-specific challenges for recycling, many issues are similar especially when considering regulations and economics. One of the main challenges is the cost for collection and treatment of end-of-life (EoL) products. At the moment, the volumes of waste streams for all three technologies are relatively small, often resulting in uneconomical processes (Betz et al. 2021; Kügerl & Tost 2020). This is partly owed to their long lifespans, and partly to the lack of demand for secondary raw materials. It is therefore important to realize an economy of scale and a market for secondary raw materials. Policies that can support the creation of a market for secondary raw materials including tradable recycling credit schemes and circular economy and product reuse targets accompanied by measuring and monitoring mechanisms (Miliot 2021; Söderholm & Ekvall 2020). Another shared challenge is the design of the products, that often prevents an efficient disassembly or repair. Disassembly, recycling or repair respectively needs to be a consideration from the very beginning of product development. The introduction of eco-design policies (partly already under development, see EU Ecolabel for solar PV (Dodd & Espinosa 2019)) and enhanced cooperation between manufacturers and recyclers are only some of the recommendations included in the roadmaps.

3.1 Renewable Energy Sector

Wind turbines and solar PV generally show a high recyclability of approximately 90%. A recycling plant operated by Veolia in cooperation with PV Cycle and Syndicat des Énergies Renouvelables even achieved a record recovery rate of 94.7% in 2019 (Rollet & Beetz 2020). However, this recovery rate requires specialized plants rather than currently often used glass recycling facilities. Additionally, the collection of solar PV is still not up to par. While some panel manufacturers such as First Solar have already set up their own recycling facilities in combination with a takeback scheme, the transport of EoL solar panels to the facilities is often impeded by regulations prohibiting the import and export of waste (Kügerl & Ammerer 2021). If PV equipment is disposed and not treated appropriately after it is decommissioned, the negative environmental impacts can be high. The uncontrolled release of substances such as lead, cadmium, and phosphorus can affect water, air and soil quality and lead to serious health issues (Qi & Zhang 2017). In the EU, the Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE directive) covers solar PV and provides collection targets for Electrical and Electronic (EEE). However, there are no specific targets for PV panels and waste flows remain largely unmonitored (WEEE Forum 2021). The RE-SOURCING project's Roadmap for the Renewable Energy Sector not only recommends the revision of waste policies (including import and export policies to foster (cross-)national material flows for efficient recycling), but also the introduction of concrete recycling and reuse targets. This will certainly require further research to determine the maximum potential input rate of secondary raw materials in the production of PV to avoid negative impacts on their efficiency.

The main issue regarding the recycling of wind turbines are the (currently) unrecyclable blade materials. Considering the expected quantities of wind turbines reaching their EoL in the upcoming years (approximately 15,000 turbine blades) and even more so in the future it is crucial to investigate and develop new technologies for recycling and/or possibilities for reuse. This also requires a legal basis enabling reuse and enhanced collaboration between supply chain actors and sectors.

3.2 Mobility Sector

Over the next 10 to 15 years, the return of LIBs from the electromobility sector to recycling is expected to increase to 0.7 Mt per year in the EU and then continue to grow exponentially (Stahl et al. 2021). The massive growth of the battery market leads to high resource demand. Therefore, recycling is crucial to recover resources and manage the battery waste stream (Stahl et al. 2021). However, battery recycling is associated with several challenges. Among the greatest challenges regarding occupational health and safety is the control of thermal runaway and the high fire load of an LIB. Also, e.g., in order to save weight, common designs for LIBs do not always provide for the possibility to disassemble cells or modules from packs, which would facilitate recycling.

For the last few years, cobalt has been the most valuable material in LIB recycling, but nickel and copper have also been recovered. Lithium has hardly been recovered so far as it has been technically difficult and hardly worthwhile financially. However, the recent sharp rise in commodity prices, especially for lithium, may trigger a shift of the current situation. The European Commission's proposal for a new battery regulation, in order to further circularise the resources of the collected batteries, sets recovery targets for metals as well as targets for recycling efficiency (European Commission 2020b). Furthermore, new batteries must contain certain amounts of secondary lithium, nickel and cobalt (12% cobalt; 4% lithium and 4% nickel by 2030, increasing until 2035). To simplify the reuse and repurposing of LIBs, more information about the LIBs has to be provided by extended labelling and a battery passport.

In addition to the sustainable management of EoL LIBs, attention must also be paid to battery cell production. There, the main challenges are the very energy intensive processes which depending on the energy mix used lead to GHG emissions and result in large carbon footprints (Larcher & Tarascon 2015). The RE-SOURCING project's roadmap for the mobility sector therefore recommends the introduction of policies concerning design for recycling, recycling targets, extended reuse/repurposing as well as a significant increase in resource efficiency for batteries.

4 CONCLUSION & OUTLOOK

The RE-SOURCING project's reports investigate sustainability challenges specific for the renewable energy and mobility sectors, two sectors crucial for the transition to clean energy systems. Given the exacerbated pressure on the environment and social issues due to increasing demands for mineral raw materials, advances in circularity of solar PV, wind turbines, and LIBs are key for achieving responsible supply chains and international goals, such as the targets of the Paris Agreement. However, the recycling sector for all three technologies is still in its infancy and progress on all sides, from collection to technologies and legislation, is urgently needed.

In the RE-SOURCING project the work on renewable energy and mobility will be followed by State of Play and Roadmap reports for the EEE sector with focus on the supply chains of tin, tantalum, tungsten, gold, and mica. The results of the three sectors and further local workshops in Latin America, South Africa, and Asia will be used to develop a global framework for RS.

5 ACKNOWLEDGEMENTS

This article is based on project reports and results of the H2020 project RE-SOURCING, which is funded by the Horizon 2020 Research and Innovation Programme of the European Union [Grant number 869276/ Topic: H2020-SC5-2019-1].

REFERENCES

- Betz, J., Degreif, S., Dolega, P. (2021) *State of Play and Roadmap Concept: Mobility Sector: RE-SOURCING Deliverable 4.2*. Darmstadt. Öko-Institut e.V. https://re-sourcing.eu/files/sop_mobility_sector.pdf.
- Bilham, N. T. (2021) *Responsible mining and responsible sourcing of minerals: opportunities and challenges for cooperation across value chains*. Geological Society, London, Special Publications, 508 (1), 161–186. <https://doi.org/10.1144/SP508-2020-130>.
- Degreif, S., Farooki, M., Endl, A., Barriere, N., Berger, G., Schluep, M., Manoochehri, S., Leeuw, B. de, Kügerl, M.-T., Tost, M., Robam, K., Karu, V. (2020) *D1.2 The RE-SOURCING Common Approach: Horizon 2020 Project Deliverable*.
- Dodd, N., Espinosa, N. (2019) *Solar photovoltaic modules, inverters and systems: options and feasibility of EU Ecolabel and Green Public Procurement criteria: (Draft) Preliminary report v1.0*. https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/content/product_group_documents/1581689975/190410_PV_Prep_study_Ecolabel_and_GPP_Preliminary_Consultation_Draft.pdf.
- European Commission (2020a) *A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe, March 11, 2020*. COM/2020/98 final. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en.
- European Commission (2020b) Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU), December 10, 2020. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF.
- Kügerl, M.-T., Ammerer, G. (2021) *First Solar: Developing an effective collection & treatment system for End of Life (EoL) solar PV modules*. Leoben. Montanuniversität Leoben.
- Kügerl, M.-T., Tost, M. (2020) *State of play and roadmap concepts: Renewable Energy Sector: RE-SOURCING Deliverable 4.1*. Leoben. Montanuniversität Leoben. https://re-sourcing.eu/files/08.02.2021_re-sourcing_wp4_d4.1_v2_res.pdf.
- Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J. G. J., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Khourdajie, A. A., House, J., Pachauri, S., Figueroa, M., Saheb, Y., Slade, R., Hubacek, K., Sun, L., Ribeiro, S. K., Khennas, S., La Rue Can, S. de, Minx, J. (2021). *A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018*. Environmental Research Letters, 16 (7), 73005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abee4e>.
- Larcher, D., Tarascon, J.-M. (2015) *Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage*. Nature Chemistry, 7 (1), 19–29. <https://doi.org/10.1038/nchem.2085>.
- Mancini, L., Nuss, P. (2020) *Responsible Materials Management for a Resource-Efficient and Low-Carbon Society*. Resources, 9 (6), 68. <https://doi.org/10.3390/resources9060068>.
- Milios, L. (2021) *Overarching policy framework for product life extension in a circular economy—A bottom-up business perspective*. Environmental Policy and Governance. Advance online publication. <https://doi.org/10.1002/eet.1927>.
- O'Neill, D. W., Fanning, A. L., Lamb, W. F., Steinberger, J. K. (2018) *A good life for all within planetary boundaries*. Nature Sustainability, 1 (2), 88–95. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0021-4>.
- Qi, L., Zhang, Y. (2017). *Effects of solar photovoltaic technology on the environment in China*. Environmental Science and Pollution Research International, 24 (28), 22133–22142. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9987-0>.
- Rollet, C., Beetz, B. (2020) *Recycling PV panels: Why can't we hit 100%?* <https://www.pv-magazine.com/2020/08/26/recycling-pv-panels-why-cant-we-hit-100/>.
- Smol, M., Marcinek, P., Duda, J., Szoldrowska, D. (2020) *Importance of Sustainable Mineral Resource Management in Implementing the Circular Economy (CE) Model and the European Green Deal Strategy*. Resources, 9 (5), 55. <https://doi.org/10.3390/resources9050055>.
- Söderholm, P., Ekvall, T. (2020) *Metal markets and recycling policies: impacts and challenges*. Mineral Economics, 33 (1-2), 257–272. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00184-5>.
- Stahl, H., Mehlhart, G., Gsell, M., Sutter, J., Dolega, P., Baron, Y., Löw, C., Neumann, T., Oliva, J., Montevicchi, F. (2021) *Assessment of options to improve particular aspects of the EU regulatory framework on batteries: Final report*. Publications Office of the European Union.
- van den Brink, S., Kleijn, R., Tukker, A., Huisman, J. (2019) *Approaches to responsible sourcing in mineral supply chains*. Resources, Conservation and Recycling, 145, 389–398. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.040>.
- Wang, P., Li, N., Li, J., Chen, W. Q. (2020) *Metal-energy nexus in the global energy transition calls for cooperative actions*. In A. Bleicher & A. Pehlken (Eds.), The Material Basis of Energy Transitions (pp. 27–47). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819534-5.00003-9>.

- WEEE Forum (Ed.) (2021) *Issues associated to photovoltaic panels and compliance with EPR legislation*. Brussels. <https://weee-forum.org/wp-content/uploads/2021/06/WEEE-Forum-PV-Panels-Issue-Paper-2021-Final.pdf>.
- Zwane E. M. (2019). Impact of climate change on primary agriculture, water sources and food security in Western Cape, South Africa. *Jamba: Journal of Disaster Risk Studies*, 11(1), 1–7. <https://doi.org/10.4102/jamba.v11i1.562>.

Experimental Methods to Assess the Thermal Stability of Reactive Chemical Waste stored in Large Waste Tanks

R. Obermüller^{1*}, G. Schoppel¹ & M. Prochaska¹

¹⁾ Thermo Fisher Scientific, Linz, Austria

ABSTRACT: The storage of a reactive chemical waste in large storage tanks can lead to a thermal explosion, as was the case recently in July 2021 at Currenta in Leverkusen-Bürriig (Germany). Therefore, a process safety risk assessment prior to mixing of different organic waste in large storage tanks is mandatory. The thermal stability of single chemical waste streams can be assessed by the chemical structure. If the formula of the chemical substances contains unstable functional groups (explosophores or self-reactive functional groups) a more detailed investigation is required. In case of mixing different waste streams, an easy desktop method for a quick hazard assessment is the chemical reactivity matrix. Thermal safety testing methods in the safety lab are Reaction Calorimetry (RC1), Differential Scanning Calorimetry (DSC), Thermal Activity Monitor (TAM) and Accelerating Rate Calorimetry (ARC) or Vent Sizing Package 2 (VSP2). Industrial heat confinement situations can be assessed by a systematic decision tree.

1 INTRODUCTION

The storage of a reactive chemical waste in large storage tanks can lead to a thermal explosion, as was the case recently in July 2021 at Currenta in Leverkusen-Bürriig (Germany) (Currenta 2022). In addition to considerable property damage, 7 people were killed and 31 injured. Therefore, the thermal risk for the storage of reactive waste must be assessed in advance and appropriate risk-minimizing measures must be taken.



Fig. 1: Thermal runaway in tank # 3 at Currenta (Germany) in July 2021

2 DESKTOP METHODS AND CHEMICAL JUDGEMENT

First, so-called desktop methods are applied to obtain a quick overview for possible thermal hazards that may arise during uncontrolled mixing and storage of reactive substances. These methods are based on theoretical considerations in combination with chemical expertise and require only information about the chemical composition of the different waste streams. However, they

do not replace experimental testing in the safety laboratory. The thermal stability of single chemical waste streams can be assessed by the chemical structure. In case the formula of the chemical substances contains unstable functional groups (explosophores or self-reactive functional groups) (UN 2019) a more detailed investigation is required.

Tab. 1: Unstable chemical bonds related to “explosophores” and examples of unstable functional groups

N-O bond	N-X bond	N-N bond	N-metal C-metal bond	O-O bond	O-X bond	C=C bond
R-NO R-NO ₂	NCl ₃ NI ₃	R-N ⁺ ≡N	R ₂ N-Li	R-O-O-R	R-ClO ₄	R≡R
R-O-NO R-O-NO ₂		R-C=N ₂ H	R-MgX R-Li			R≡X
H ₂ N-OH R=N-OH		R-N=N-R RNH-NHR				R≡metal ⁺
		R-N ₃ Triazoles Tetrazoles				

An easy desktop method for a quick hazard assessment in case of mixing different waste streams is the chemical reactivity matrix. Free of charge computer programs are available (e.g., CAMEO Chemicals (CAMEO Chemicals Software 2022)). The chemical reaction classes can help to assess suspected chemical interactions. In Tab. 2 some examples are shown. Mixing of an alcohol (R-OH) and a ketone (RCOR) is a safe operation. No exothermic chemical reaction would be expected. In other words, the chemical structure of alcohols and ketones are not related to explosophores or self-reactive functional groups. On the contrary, mixing of a primary amine (R-NH₂) and a peroxide (R-O-O-R) is a hazardous operation. Most likely the peroxide can oxidize the amine in an exothermic chemical reaction and the reaction product would be thermally unstable too. In addition, the chemical structure of peroxides is related to explosophores. In the circumstance of large waste tanks this could lead to a thermal runaway reaction.

Tab. 2: Example of a chemical reactivity matrix

	R-OH		R-O-O-R	R-NH ₂
R-OH		safe	hazard	safe
			hazard	safe
R-O-O-R				hazard
R-NH ₂				

Tab. 3: Chemical reaction classes applied in organic chemistry

	Chemical reaction classes in case of mixing different chemical waste streams
A	Acid-Base reaction
B	Aliphatic nucleophilic substitution
C	Aromatic nucleophilic substitution
D	Aliphatic electrophilic substitution
E	Aromatic electrophilic substitution
F	Addition to carbon-carbon or carbon-hetero multiple bonds
G	Elimination
H	Oxidation and reduction

3 THERMOANALYTICS

The data for a systematic risk assessment can be determined easily by applying experimental methods, which are already used for the thermal process safety of chemical manufacturing processes (Stoessel 2020). The method of choice for the determination of the heat release caused by mixing of different (reactive) material streams is the Reaction Calorimetry (RC1). The thermal stability of reactive wastes can be determined using Differential Scanning Calorimetry (DSC). Accelerating Rate Calorimetry (ARC). Additionally, testing in the Vent Sizing Package 2 (VSP2) is required if the pressure build-up in case of a thermal runaway reaction must be known. Assessment criteria for the recorded data are those which are used for the evaluation of the thermal risk of a chemical manufacturing process. Assessment values may depend on equipment and controls.

Fig. 2 shows the data of a reaction calorimetry experiment (mixing of Allylamine- and Isopropanol-waste in the mass ratio of 1 : 1). If mixing is done at 25°C, the final temperature in the waste tank would become 33°C at adiabatic conditions, based on recorded heat of mixing (22 kJ/kg) and the calculated adiabatic temperature rise of 8 K.

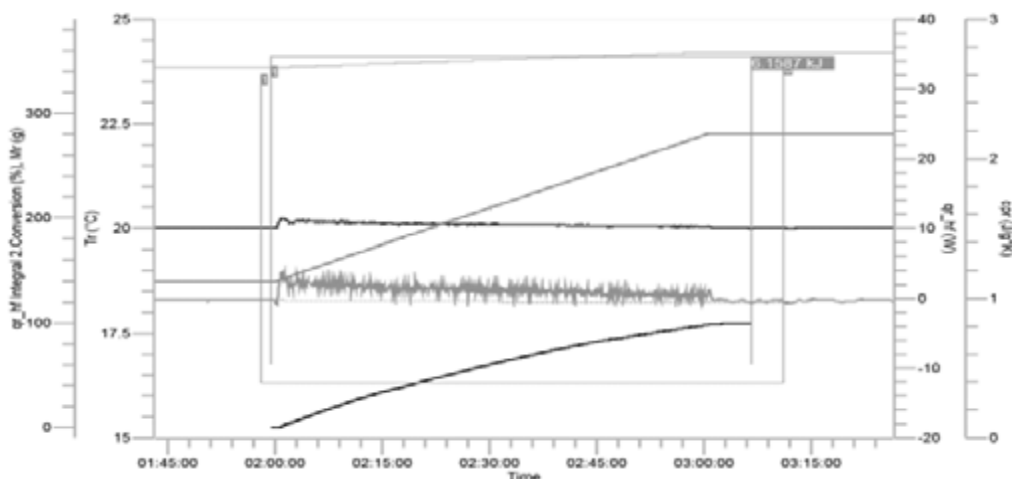


Fig. 2: Reaction calorimetry data: Heat of mixing of Allylamine- and Isopropanol-waste (1 : 1 w/w). $\Delta_m H' = 22$ kJ/kg, $c_p = 2.75$ kJ/(kg.K), $\Delta T_{ad} = 8$ K

Fig. 3 shows the thermal stability of the final waste in the temperature range between 0°C and 400°C after mixing in the reaction calorimeter. Three exothermic events were recorded. For the first one (left), a specific energy of 31 kJ/kg starting at 129°C was recorded. For the second one (middle), a specific energy of 27 kJ/kg starting at 176°C was measured and for the third one (right), a specific energy of 429 kJ/kg starting at 224°C was recorded. Therefore, the total specific

energy is 487 kJ/kg which is equal to an adiabatic temperature rise of 177 K (based on a c_p -value of 2.75 kJ/(kg ·K) measured in the reaction calorimeter).

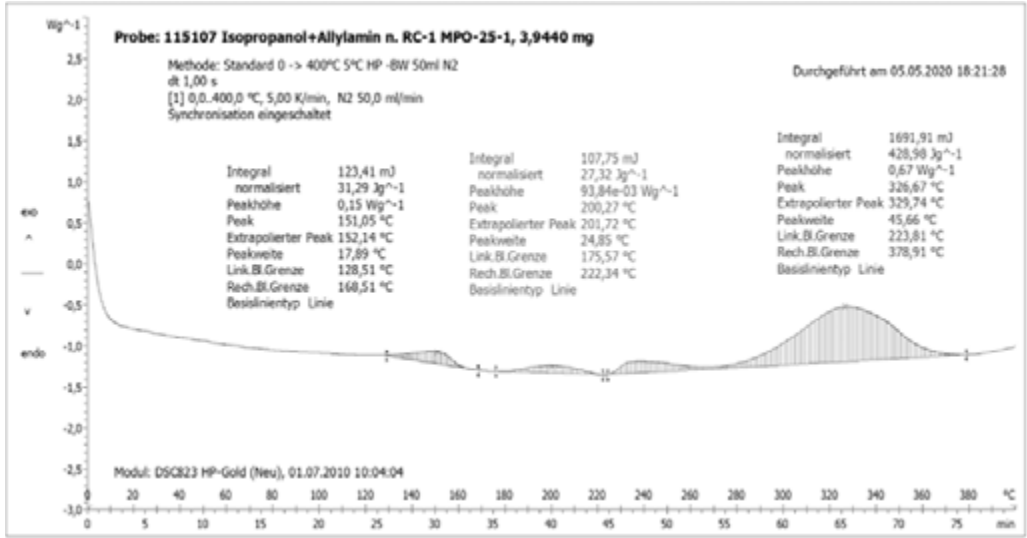


Fig. 3: Differential scanning calorimetry data: Thermal stability of the final waste mixture (Allylamine- and Isopropanol-waste (1 : 1 w/w)) in the temperature range between 0°C and 400°C measured in a sealed gold plated high pressure crucible. Heating rate: 5 K /min. $\Delta_d H'(1) = 31$ kJ/kg @ 129°C. $\Delta_d H'(2) = 27$ kJ/kg @ 176°C. $\Delta_d H'(3) = 429$ kJ/kg @ 224°C. TOTAL: $\Delta_d H' = 487$ kJ/kg. $\Delta T_{ad} = 177$ K

In addition, the adiabatic time to maximum rate (TMR_{ad}) can be estimated based on this single dynamic DSC thermogram assuming a zero-order decomposition reaction kinetics (1). At 33°C ($=T_0$) the TMR_{ad} becomes 130 h. A conservative activation energy of 50000 J/mol is used for the calculation. T_{ref} is equal to the left integration limit of the first exothermic peak (129°C) and q_{ref} is estimated to be 10 W/kg at T_{ref} .

$$TMR_{ad}(T_0) = \frac{c_p \cdot R \cdot T_0^2}{q_0 \cdot E_a} \quad (1)$$

$$q_0 = q_{ref} \cdot \exp \left[-\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (2)$$

As criteria the TMR_{ad} is used to limit residence/storage time of a mixture in the applicable conditions (see chapter 4) or avoid it at all. Limit levels depend on the equipment and controls.

4 SYSTEMATIC ASSESSMENT OF HEAT CONFINEMENT AT INDUSTRIAL SCALE

Industrial heat confinement situations can be assessed by a systematic decision tree (Stoessel 2020). Assuming adiabatic conditions, the storage time ("time of confinement"; t_{conf}) in the waste tank must be much shorter than the adiabatic time to maximum rate (TMR_{ad}). Typically, the TMR_{ad} must be more than 4 times longer than the storage time in the tank. If this is the case, the heat confinement situation becomes non-critical. If this is not the case, the decision tree must be followed until a non-critical or a critical situation is obtained. In the latter case, hazardous heat confinement could not be excluded, and a process change is required. The decision tree elaborates further whether local heat accumulation is systematically abated or not (Fig.4).

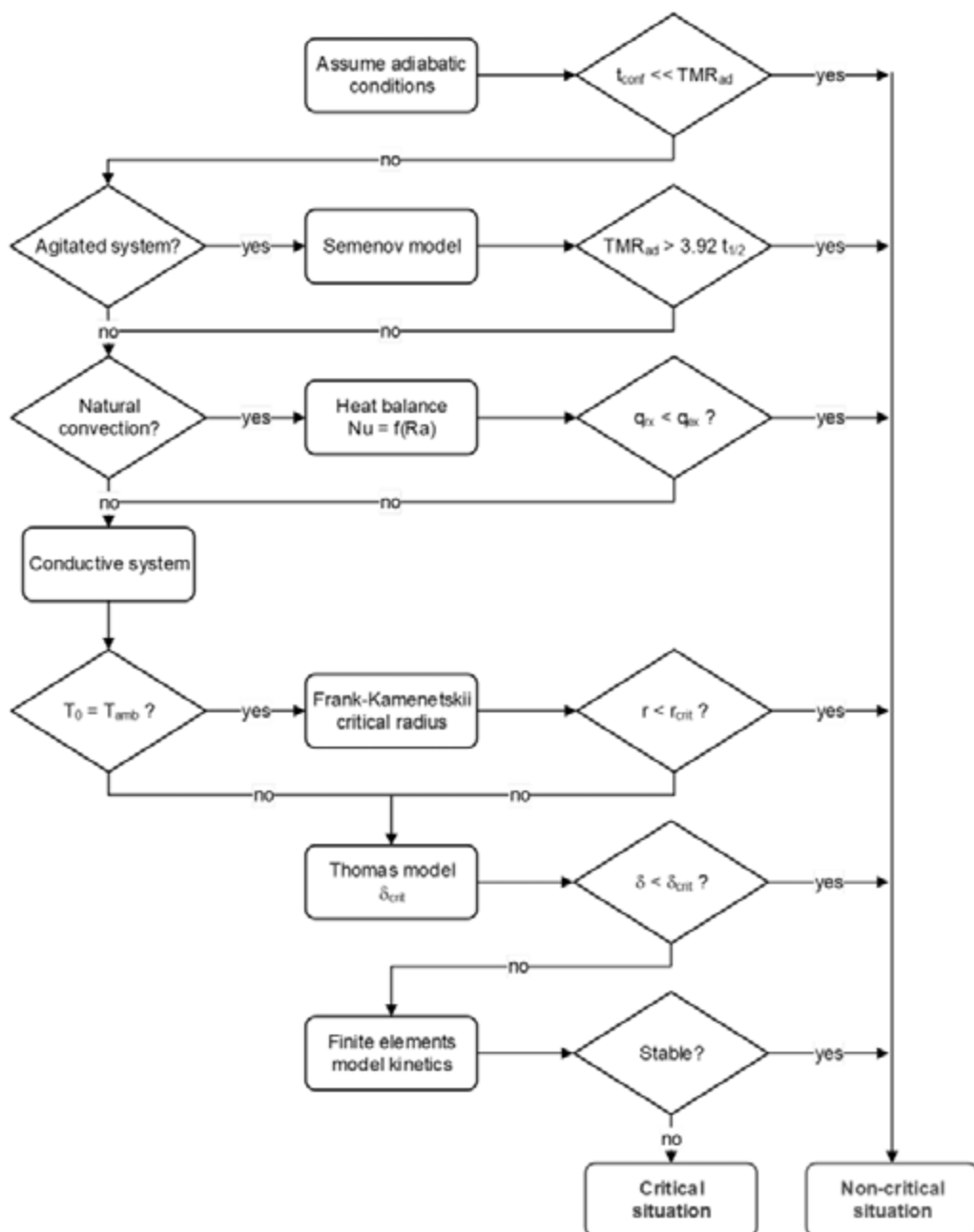


Fig. 4: Decision tree for the systematic assessment of heat confinement at industrial scale

5 SUMMARY AND CONCLUSIONS

- Storage of organic waste in large scale storage tanks is pretty much adiabatic caused by the poor surface-to-volume ratio of the large container. In addition, active cooling of the tank is not common in industrial practice.

- Even a quite small heat release of an exothermic chemical decomposition reaction in the organic waste could lead to a thermal runaway reaction followed by a pressure build up in the tank.
- In case of a thermal explosion release of flammable material and a secondary fire is likely.
- Therefore, a process safety risk assessment prior to mixing of different organic waste in large storage tanks is mandatory!
- An easy desktop method for a quick hazard assessment is the chemical reactivity matrix and the evaluation of the chemical structure (unstable functional groups). Free of charge computer programs are available (e.g., *CAMEO Chemicals*).
- Thermal safety testing methods in the safety lab are Reaction Calorimetry (RC1), Differential Scanning Calorimetry (DSC), Thermal Activity Monitor (TAM) and Accelerating Rate Calorimetry (ARC) or Vent Sizing Package 2 (VSP2).
- Industrial heat confinement situations can be assessed by a systematic decision tree.

REFERENCES

- CAMEO Chemicals Software (2022) Retrieved from <https://www.epa.gov/cameo/cameo-chemicals-software>
- United Nations (UN) (2019) *Manual of Tests and Criteria, 7th revised edition*.
- Stoessel, F. (2020) *Thermal Safety of Chemical Processes – Risk Assessment and Process Design*, 2nd edition. Wiley-VCH.
- Currenta (2022) www.currenta-info-buerrig.de.

Mögliches Verfahrenskonzept und Versuch einer Kostenabschätzung zur mechanischen Auftrennung von Photovoltaikmodulverbunden

H.M. Menapace¹, B. Schmuck¹, G. Schneeberger¹, A. Brugger¹ & P. Seppel¹

¹⁾ Peter Seppel Gesellschaft m.b.H., Feistritz/Drau, Österreich

KURZFASSUNG Zu entsorgende Photovoltaikmodule stellen eine Kategorie bei den Elektroaltgeräten dar, für die in den kommenden Jahren und Jahrzehnten ein sukzessiver Anstieg im Abfallaufkommen prognostiziert werden kann. Bedingt durch diesen Trend hat der Gesetzgeber einerseits für PV-Module ab 01.01.2022 eigene Abfallschlüsselnummern im Abfallverzeichnis (35215 sowie 35216) geschaffen und bereits im Rahmen der Neufassung der Abfallbehandlungspflichtenverordnung im Jahre 2017 Vorgaben zur Sammlung von PV-Modulen festgeschrieben. In der EAG-VO wurden im Jahr 2019 PV-Module als eigene Gerätekategorie etabliert und Verwertungsquoten für diese festgeschrieben. Behandlungs- und Verwertungskonzepte für ein größeres Aufkommen dieser Module in der Abfallwirtschaft fehlen bis dato aber noch. Im Rahmen dieses Beitrages soll ein mögliches Verfahren zur Übernahme, manuellen Vorbehandlung und mechanischen Auftrennung eines Photovoltaikverbundes skizziert werden. Die Basis hierzu bilden Zerlegeversuche, die im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsprojektes durchgeführt bzw. teilweise auch fremdvergeben wurden. Über den mechanischen Trennaufwand sowie unter Berücksichtigung der erzielten Qualitäten der Outputfraktionen Aluminium, Glas und einer Mixfraktion aus Kunststoff- und Leiterplattenresten wird der Versuch einer monetären Abschätzung für dieses Verfahrenskonzept unternommen und Verwertungsmöglichkeiten beleuchtet.

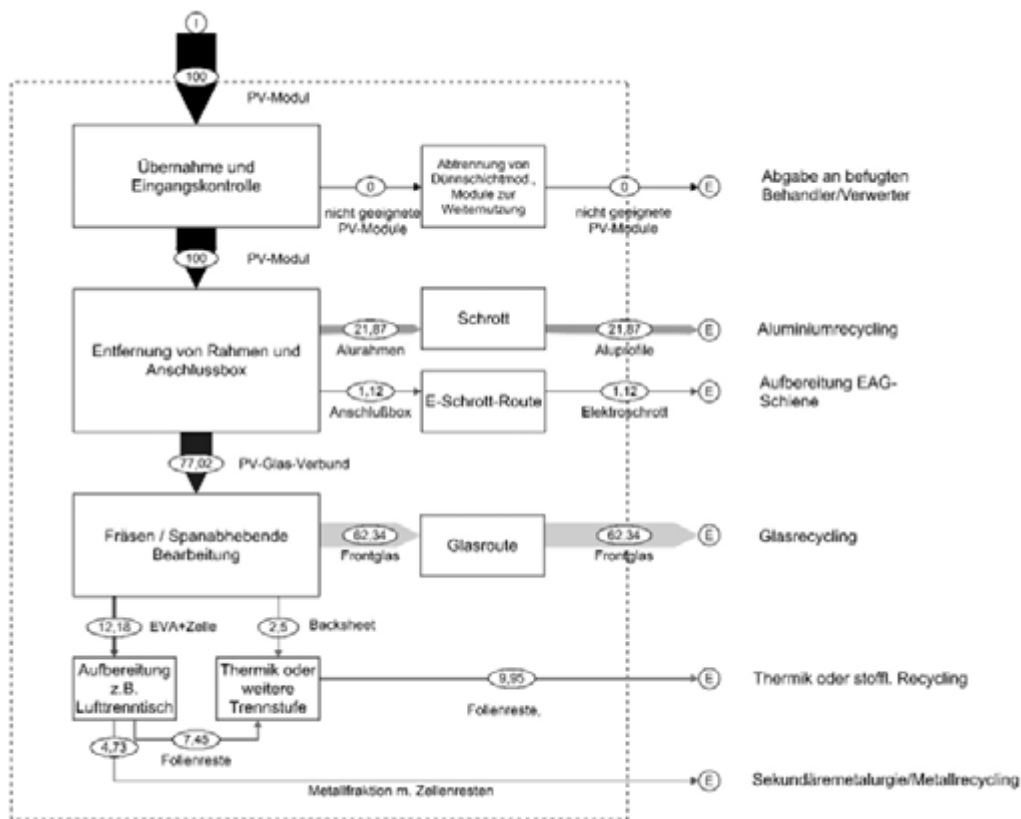
1 RECHTLICHE VORGABEN UND AUFKOMMEN

Für die Übernahme von Photovoltaikmodulen zur Entsorgung sind neben den Allgemeinen Vorgaben des Abfallwirtschaftsgesetzes und der Abfallverzeichnisverordnung die WEEE (in Österreich über die Elektroaltgeräteverordnung festgelegt) sowie die Abfallbehandlungspflichtenverordnung heranzuziehen. Während sich durch die Pflichtenverordnung detaillierte Vorgaben hinsichtlich Transportes und getrennter Erfassung von Photovoltaikmodulen ergeben, ordnet die Verzeichnisverordnung den Modulen eine Abfallschlüsselnummer zu. Über die EAG-VO ergeben sich Vorgaben hinsichtlich der zu erzielenden Verwertungsquoten bei der Zerlegung der PV-Module.

Anhand der durchschnittlichen Produktlebensdauer von etwa 25 Jahren und den vorliegenden Daten zu den verbauten PV-Modulen in Österreich, läßt sich für die nächsten Jahre ein starker Anstieg im Aufkommen von PV-Modulen zur Entsorgung prognostizieren (Dobra et al. 2020). Mangels Anlagenkapazitäten zur Behandlung dieser „neuen“ Abfallart ergibt sich somit der Bedarf an einem modularen Behandlungsverfahren, welches sukzessive mit dem steigenden Abfallaufkommen Schritt halten kann.

2 MÖGLICHES VERFAHREN

Bei den Überlegungen zur Entwicklung eines Behandlungsverfahrens für kristalline PV-Module (vgl. Abb. 1) wurde als Vorgabe eine möglichst abwasser- und chemiefreie Behandlung definiert. Hierdurch soll einerseits die Einbindung in eine bestehende Infrastruktur eines Abfallsammler- und Behandlers (Anlagentechnik, Personal) erleichtert werden und gleichzeitig auch positive Auswirkungen auf Emissionen aus dem Behandlungsprozeß haben (vgl. etwa der Wegfall von aggressiven Chemikalien wie Säuren und/oder Lösemittel zur Verbundauftrennung). Zudem ist durch die EAG-VO eine Recyclingquote von 85 % für die Photovoltaikmodule vorgegeben.



Mögliches Verfahren zur Zerlegung von PV-Modulen, 2022, Bezug auf ein Modul in %

Abb. 1: Mögliches Ablaufschema, Stoffstrom bezogen auf ein Modul

2.1 Eingangskontrolle

Im Zuge der Eingangskontrolle erfolgt eine optische Überprüfung ob neben kristallinen auch Dünnschicht-PV-Module vorliegen. Diese werden dann separiert und befugten Behandlern übergeben. Sofern vorhanden, könnte via Etiketten auf den Modulen eine weitere Unterteilung erfolgen, angesichts der Vielzahl an Herstellern und der großen Zeitspanne von der Herstellung bis zur Entsorgung (25–30 Jahre) erscheint das aber wenig praktikabel. Diese Daten wären allerdings für die Prüfung der weiteren Einsetzbarkeit (Reuse) von Modulen hilfreich. Neben der Funktionsüberprüfung und Leistungsdatenaufnahme müßten hierbei auch Qualitätssicherungen für einen sicheren Betrieb bei einer Weiterverwendung der Module definiert und sichergestellt werden. Aus diesem Grund sollte eine Abtrennung dieser Module durch elektrotechnische Fachbetriebe im Zuge der Wartung von PV-Anlagen bzw. beim Modultauch erfolgen. Hierdurch würden auch keine abfallrechtlichen Fragestellungen (Abfallende) aufgeworfen.

2.2 Zerlegung

Nach der Prüfung auf die Behandlungsfähigkeit werden die Module manuell – mit der Glasseite nach unten – auf einem Zerlegetisch fixiert und der Aluminiumrahmen sowie die Anschlußbox mittels Hammer und Handschaber entfernt (Abb. 2). Anhand mitgestoppter Behandlungsversuche ergibt sich für diese ersten Trennschritte ein Aufwand von etwa 1 bis 5 Minuten pro Modul. Durch Automatisierungsschritte sollte der zeitliche Aufwand reduziert werden können.

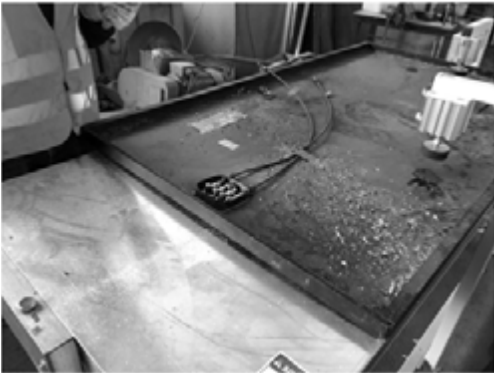


Abb. 2: PV-Modul auf Zerlegetisch zur Abtrennung des Rahmens und der Anschlußbox

Nach der Entfernung des Rahmens und der Anschlußbox erfolgt die Abtrennung der Rückfolie sowie der mit Laminierfolie eingekapselten Solarzellen. In Versuchen im Labormaßstab wurden mit Hobeln, Dünnschichtsägen und Fräsmaschinen diverse Trennversuche durchgeführt. Hierbei hat sich die Verbundauftrennung mittels CNC-Fräse bis dato als praktikabelste Technik erwiesen. Neben der Frontglasschreibe konnte durch das Fräsen je nach Anzahl der Fräsdurchgänge eine Mischfraktion (Rückseitenfolie, Laminierfolien und Zellmaterial) bzw. bei zwei Durchgängen eine „reine“ Rückseitenfolien-Fraktion und eine Mischfraktion aus Laminierfolien und Solarzellen erhalten werden (vgl. 3.1.). Die Späne wurden gesammelt und einer Analyse zugeführt um Aussagen zu den möglichen Verwertungsoptionen je Fraktion treffen zu können.

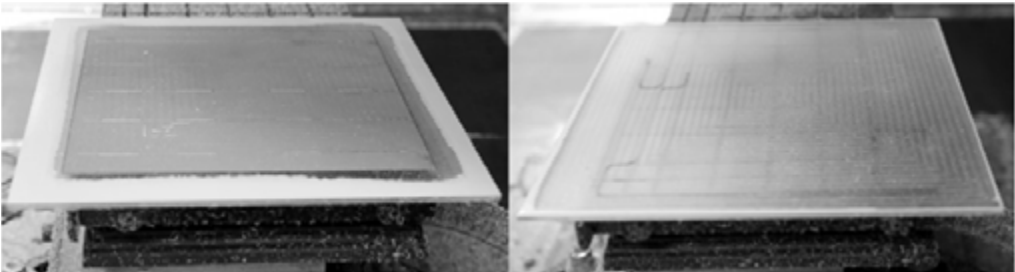


Abb. 3: Monozelle mit abgefräster Rückfolie (l.), Frontglas nach zweitem Fräsdurchgang (r.)

Nach dem Fräsvorgang erfolgt eine optische Kontrolle und Freigabe der Glasplatte für die weitere Verwertung im Glasrecycling. Sollten noch Folien- bzw. Zellreste auf dem Frontglas vorliegen, könnten diese durch einen punktuellen weiteren Fräsdurchgang entfernt werden.

2.3 Nachgeschaltete Aufbereitungsstufe für Mischfraktionen

Die Späne-Fraktion (Abb. 4) können über die Absaugung der CNC-Fräse erfasst und einem weiteren physikalischen Trennschritt (z.B. Lufttrenntisch) zugeführt werden. So wäre etwa durch die unterschiedliche Dichte der eingesetzten Kunststoffe (vgl. Polyvinylfluorid/Tedlar 1,4 bis 1,7 g/cm³; Ethylenvinylacetat/EVA 0,9 g/cm³) ein weiterer Aufkonzentrierungsschritt möglich um möglichst sortenreine Kunststofffraktionen für ein stoffliches Recycling zu erhalten. Da großtechnische Versuche auf Fräsmaschinen noch nicht durchgeführt werden konnten, lagen bis dato allerdings noch keine ausreichenden Mengen an Spänen für solche weiterführenden Trennversuche vor.

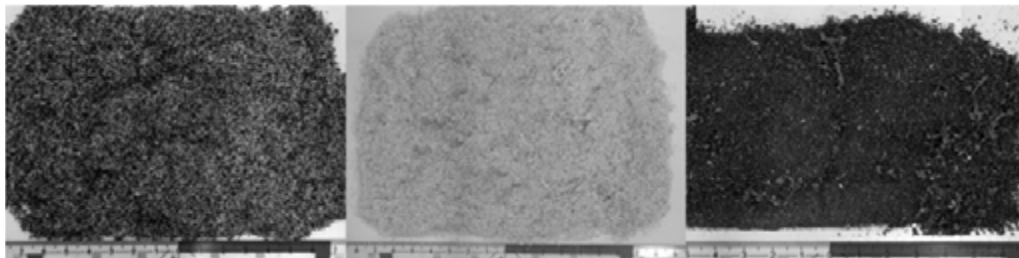


Abb. 4: Spänefraktionen aus dem Versuch an der TU-Wien (links: Mischfraktion aus einem Fräsdurchgang, mitte & rechts: zwei Fräsdurchgänge – Rückseitenfolie sowie Laminierfolie + Zellenmaterial)

3 VERWERTUNGSOPTION FÜR DIE OUTPUTSTRÖME

Nachfolgend soll für die aus den Versuchen erhaltenen Fraktionen Verwertungsoptionen aufgezeigt werden.

3.1 Glas

Das hochtransparente Frontglas von PV-Modulen stellt mit etwa 62 % den Hauptanteil aller abgetrennten Fraktion bei PV-Modulen dar. Im Hinblick auf die in der EAG-VO geforderte Verwertungsquote von 85 % kommt einer Verwertungsschiene für diese Fraktion eine entsprechend große Bedeutung zu. Im Glasrecycling existieren strikte Qualitätsvorgaben hinsichtlich Störstoffanteilen, was einen Einsatz von PV-Gläsern in der Verpackungs- und Flachglasproduktion stark limitiert (Lohmann & Scholz 2019). Für den Einsatz/Downcycling in der Produktion von Schaumglas (Dämmstoffproduktion) sowie als Einsatzstoff für Spezialanwendung (Reflektionsfarben) sollten die qualitativen Vorgaben geringer ausfallen. Bei der Zerlegung der PV-Verbunde mittels CNC-Fräse konnte im Laborversuch das Frontglas von den anderen Fraktionen befreit werden. Nach großtechnischen Versuchen sollen Proben der Glasfraktion an Glasrecycler zur Bewertung übergeben werden. Denkbar wäre dann etwa eine getrennte Erfassung der anfallenden PV-Gläser und die anschließende Rückführung in die Produktion von Frontgläser für die PV-Modulproduktion (Oreski et al. 2022).

3.2 Aluminium

Die Aluminiumfraktion stellt mit etwa 22 % die zweitgrößte Fraktion bei der Auftrennung von kristallinen PV-Modulen dar. Für die abgetrennten Aluminiumprofile kann auf existente Verwertungsrouten für Aluminiumschrotte verwiesen werden. Die manuelle Abtrennung der Profile und anschließende Weitergabe zur stofflichen Verwertung deckt sich mit anderen potentiellen Verfahren zur Aufbereitung von PV-Modulen und wird so von Abfallsammlern und Behandlern durchwegs bereits durchgeführt (Lohmann & Scholz 2019).

3.3 Silizium/Leiterplatten/Zellverbunde

Neben dem Silizium sind in diverse Metalle (Kupfer, Silber) zu finden. Eine Aufbereitung kann dabei pyro- oder hydrometallurgisch erfolgen (Benedek et al. 2014), (Silva de Oliveira et al. 2020). Hier gibt es auch Untersuchungen das abgetrennte Silizium Verwertungsmöglichkeiten zuzuführen (EUWID 2019)

3.4 Anschlußbox

Bei den Anschlußboxen macht der Kunststoffanteil (Gehäuse, Kabelummantelungen) etwa zwei Drittel und der Kupferanteil etwa ein Drittel aus. In der Zusammensetzung sind diese Anschlußboxen mit Elektrokleingeräten vergleichbar, entsprechend können hier bestehende Recyclingrouten (z.B. Querstromzersetzer, Metallabscheider usw.) von Behandlern für Elektroaltgeräte genutzt werden.

3.5 Kunststofffraktionen

Hierbei handelt es sich um die Rückseitenfolien sowie die Laminatfolien. Je nach Hersteller und Modul kann es sich dabei um unterschiedliche Kunststoffarten handeln. Hierdurch ergeben sich unterschiedliche Kombinationen an eingesetzten Kunststoffarten. Da keine öffentlich zugängliche Materialdatenbanken für in der Vergangenheit verbaute PV-Module bekannt sind, könnte durch den Einsatz mobiler NIR-Scanner grobe Einteilungen der Module vorgenommen werden (Oreski et al. 2022).

Bei bis dato verbauten Modulen kamen zumeist Tedlar (Polyvinylfluorid) und Ethylenvinylacetat (EVA) sowie Polyamid (PA) und Polyethylenterephthalat (PET) zum Einsatz. Bei anderen mechanischen Aufbereitungsverfahren für PV-Anlagen werden die Kunststofffraktionen zumeist einer Thermischen Behandlung zugeführt oder durch Einsatz von Lösemitteln von den anderen Fraktionen abgetrennt (Lohmann & Scholz 2019), (Green jobs Austria 2013).

Polyvinylfluorid stellt in der thermischen Behandlung durch seinen Fluorid-Anteil ein Problem dar. Bei der Gewinnung von sortenreinen Fraktionen würde sich bei den technischen Kunststoffen ein stoffliches Recycling bzw. eine Kreislaufschließung bei der Produktion von neuen Photovoltaikmodulen anbieten. Hierbei müssten allerdings die Abbaueffekte bei den 30 Jahre alten Kunststoffen in die Überlegungen aufgenommen werden. Weiters wurden in den vergangenen Jahren auch auf Herstellerseite bei den eingesetzten Kunststoffen Änderungen vorgenommen. So kommen Tedlar-basierte Rückseitenfolien mittlerweile fast nur mehr in Asien zum Einsatz, während in Europa mittlerweile andere Folientype verwendet werden. Gängige Rückseitenfolientypen, so wie sie aktuell in Europa eingesetzt werden, befinden sich in einem Preisbereich von ca. EUR 1,50,- bis EUR 2,50,- pro m², Tedlar-basierte Rückseitenfolien liegen deutlich darüber. (Kioto Solar 2022)

4 ABSCHÄTZUNG VON AUFWAND UND KOSTEN

Für die Abschätzung des zeitlichen und finanziellen Aufwands zur Verbundauftrennung wurden Zeiterfassungen bei den Eingangskontrollen und manuellen Demontageversuchen (Entfernung Alurahmen und Anschlußboxen) herangezogen. Weiters erfolgte ein Upscaling der Fräszeiten ausgehend von Laborversuchen, welche 2021 an der TU Wien durchgeführt wurden. Für die Eingangskontrolle und manuelle Entfernung der Aluminiumrahmen und Anschlußboxen (reale Module) wurde von einem zeitlichen Bedarf von etwa 5 Minuten pro Modul ausgegangen. Dies deckt sich in etwa mit Daten aus den Zerlegeversuchen von (Lohmann & Scholz 2019). Durch eine automatisierte Einspann- und Abtrennvorrichtung sollten sich in einem großtechnischen Betrieb deutlich geringere Zeitspannen für den ersten Abtrennschritt erzielen lassen.

Für die Fräsversuche an der TU-Wien – durchgeführt auf einer Präzoplan 300 von Krause & Mauser – wurde ausgehend vom Größenverhältnis Fräsquerschnitt (4-schneidiger Schaftfräser mit einem Durchmesser von 6 mm) zu Zellenmodul (Monozellen mit einer Größe von 200 x 200 mm) ein Umrechnungsfaktor von 40,5 ermittelt. Hieraus würde sich bei der Bearbeitung von regulären Modulen (1.000 mm x 1.600 mm) für einen Schaftfräser ein Durchmesser von ca. 250 mm ergeben. Die Bearbeitungszeit pro Modul und Fräsdurchgang läge in etwa bei 4 Minuten.

Ausgehend von den Rohdaten wurde ein Angebot für eine CNC-Fräse, eine Späneabsaugung und benötigtes Werkzeug eingeholt. Zusammen mit den Personalkosten für die manuelle Zerlegung der Module und die Bedienung der Fräse (Einspannen, Überwachung des Fräsvorganges, Ausspannen) ergeben sich hochgerechnet Kosten von etwa 3 bis 4 €/Modul bei einem Fräsdurchgang. Bei wie weiteren Durchgängen erhöhen sich die Kosten entsprechend.

Für eine grobe „Kosten-Nutzen“-Abschätzung wurde nun unter Zuhilfenahme bestehender Recyclingschienen Erlösmöglichkeiten gegengerechnet. Unter Annahme der Verwertung der Fraktionen Glas, Alu und Elektroschrott würde sich bei einem Fräsdurchgang ein Nettoerlös von etwa 1,50 – 2,50 € pro Modul ergeben, ein zweistufiger Fräsprozeß läge je nach erzielten Erlösen bei 0 bis 1 €/Modul. Unter der Annahme eines erzielbaren Erlöses für die Kunststofffraktionen (EVA,

Tedlar) von etwa 1 bis 2 €/Modul (Frischware liegt im Einkauf derzeit bei etwa 3 €/m² für EVA) könnte man die Nettoerlöse pro Modul noch erhöhen, die damit einhergehenden Kosten für zusätzliche Aufbereitungsschritte (z.B. Lufttrenntisch zur Dichteseparierung der Fraktionen) sind hierbei allerdings mangels Daten zum Durchsatz nicht berücksichtigt.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Anhand der im Projekt "Sustainable Photovoltaics – PVRe2" durchgeführten Versuchen konnte nachgewiesen werden, daß eine spanabhebende Trenntechnik für die Behandlung von Photovoltaikmodulverbunden möglich ist. Fräsen ist durch den geringeren Werkzeugverschleiß und die kürzeren Bearbeitungszeiten gegenüber dem Hobeln vorteilhafter. Durch CNC-Fräsen können eine Kunststoff-Zellen-Fraktion und eine Glasfraktion gewonnen werden. Die Zielvorgabe der EAG-VO nach einer Verwertung von zumindest 85 % kann somit (Glas, Alurahmen, Anschlußbox) erfüllt werden.

Die abgetrennte Glasfraktion weist ausreichende Reinheiten auf, um weiter als Spezialglasfraktion genutzt werden zu können (Dobra et al. 2022). Zudem wäre das angedachte Verfahrenskonzept in der Grundkonfiguration (Vorbehandlung – Fräsen) abwasserfrei und verzichtet auf den Einsatz aggressiver bzw. umweltschädlicher Chemikalien. Weiterführende Kosten-Nutzen-Abschätzungen für die Abtrennung der Zellfraktionen (Metalle, Silizium) müssen allerdings noch durchgeführt werden.

Schwierigkeiten ergeben sich bei der Fixierung der regulären PV-Module beim Fräsen. Während die Verwendung eines Vakuumschisches bei Monozellen im Labor gut funktionierte, gestaltet sich eine sichere Fixierung bei beschädigten Modulen (Risse) als schwierig. In einem bereits eingereichten Nachfolgeprojekt sollen daher auch noch alternative Fixierungs- und Behandlungsmethoden untersucht werden.

6 DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde auf Basis des Projektes PVRe2 erstellt, welches durch die Forschungsförderungsgesellschaft (Energieforschungsprogramm 2017 – Leitprojekte, FFG-Nr.: 867267) gefördert wurde. Die Autoren möchten sich bei allen Projektpartner für die bereitgestellten Daten zu dieser Verfahrensabschätzung bedanken.

LITERATUR

- Benedek L., Luidold, S., Schnideritsch, H., Antrekowitsch, H. (2014) Recyclingkonzept für Photovoltaikmodule. In Recycling und Rohstoffe (Bd. 7, S. 231-250). Neuruppin-Nietwerder: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH.
- Dobra T., Thajer, F., Wiesinger, G., Vollprecht, D., Pomberger, R. (2022) Selective delamination by milling as a first step in the recycling of photovoltaic modules. *Environment Technology*. doi: 10.1080/09593330.2022.2061380
- Dobra T, Wellacher, M., Pomberger, R. (2020) End-of-Life-Management of photovoltaic Panels in Austria: Current Situation and Outlook. *Detritus* (10), S. 75-81.
- EUWID (2019) Aufbereitung alter Solarmodule - Recyceltes Silizium soll in Batterien eingesetzt werden. *EUWID Recycling und Entsorgung*, S. 30.
- Green jobs Austria (2013) Recycling von PV-Modulen - Hintergrundpapier zum Round Table 2013. Wirtschaftskammer Österreich.
- Kioto Solar (2022) Anfrage zu Marktpreisen von EVA und Tedlar (23.06.2022).
- Lohmann I., Scholz., T. (2019) Gemeinsame Aufbereitung verschiedenartiger Photovoltaikmodule zur Wertstoffrückgewinnung. Duisburg.
- Oreski, G., Eder, G., Dobra, T., Fedbacher, S., Neumaier, L., Hilweg, M., Aarnio-Winterhof, M., Menapace, H., Feichtner, M., Lenck, M., N. (2022). Sustainable Photovoltaics - PV Re². Abschlußbericht.
- Silva de Oliveira, L., Weitzel, M., Lima, D., Yamane, L., Siman, R. (2020). *Silver Recovery from End-of-Life Photovoltaic Panels*. *Detritus*, 10(2020), S. 62-74.

Stop Littering - Situationsanalyse der Litteringabfälle im Fördergebiet INTERREG V-A Österreich-Tschechische Republik und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Reduzierung von Litteringabfällen als wichtiger Beitrag zur Kreislaufwirtschaft

P. Hietler¹ & C. Pladerer¹

¹⁾ pulswerk GmbH, Ressourcenmanagement, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Littering bedeutet das achtlose Liegenlassen und Wegwerfen von Abfällen (Verpackungen, Zeitungen, Zigarettenstummel usw.) an ihrem Entstehungsort im öffentlichen Raum, ohne die dafür vorgesehenen kostenlosen Entsorgungsmöglichkeiten (öffentliche Abfalleimer) zu benutzen. Der Begriff Littering stammt aus dem Englischen: „Litter“ heißt Überreste oder Abfälle, „to litter“ bedeutet wegwerfen, verstreuen. Es unterscheidet sich klar von der illegalen Entsorgung von Haushaltsabfällen oder Sperrmüll, da diese Abfälle im Haushalt entstehen und erst später in den öffentlichen Raum transportiert und dort abgelagert werden. Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Zusammensetzung und Menge der gesammelten bzw. gelitterten Abfälle aus den Flurreinigungsaktionen zu ermitteln.

1 AUSGANGSLAGE UND EINLEITUNG

Littering bedeutet das achtlose Liegenlassen und Wegwerfen von Abfällen (Verpackungen, Zeitungen, Zigarettenstummel usw.) an ihrem Entstehungsort im öffentlichen Raum, ohne die dafür vorgesehenen kostenlosen Entsorgungsmöglichkeiten (öffentliche Abfalleimer) zu benutzen. Der Begriff Littering stammt aus dem Englischen: „Litter“ heißt Überreste oder Abfälle, „to litter“ bedeutet wegwerfen, verstreuen.

Es unterscheidet sich klar von der illegalen Entsorgung von Haushaltsabfällen oder Sperrmüll, da diese Abfälle im Haushalt entstehen und erst später in den öffentlichen Raum transportiert und dort abgelagert werden.

Typische Littering-Abfälle gehen Hand in Hand mit sehr kurzlebigen Konsumgütern oder mit Take-Away-Produkten. Diese werden konsumiert (meist unterwegs) und die übriggebliebenen Verpackungen oder auch Zigarettenstummel an Ort und Stelle oder aus dem Fahrzeug weggeworfen.

Die Vermüllung der Natur passiert natürlich nicht nur durch achtloses Wegwerfen und Liegenlassen von Abfällen, sondern auch durch beabsichtigte Abfallablagerungen. Diese Abfälle werden im Zuge von Flurreinigungsaktionen ebenfalls eingesammelt.

Oberösterreich engagiert sich sehr gegen das Littering und es gibt zahlreiche Anti-Littering-Kampagnen. Eine davon ist „Hui statt Pfui“. Diese Aktion wird vom Landesabfallverband und den Bezirksabfallverbänden organisiert. Dabei können sich Gemeinden, Vereine, Organisationen, Unternehmen oder Schulen zur Flurreinigungsaktion anmelden und erhalten dadurch einerseits Unterstützung in Form von Handschuhen, Zangen und Müllsäcken und andererseits nehmen diese dann an einem Gewinnspiel teil. Die besten Gemeinden mit den meisten Teilnehmerinnen und Teilnehmern können gewinnen.

Im Rahmen von „Hui statt Pfui“ wurden im Jahr 2021 fast 1.000 Aktionen aus 245 Gemeinden mit rd. 32.000 Teilnehmerinnen und Teilnehmer durchgeführt.

Neben den Flurreinigungsaktionen im Rahmen von „Hui statt Pfui“ gibt es auch noch weitere Flurreinigungsaktionen in Oberösterreich, wobei auch hier durch die Ausgabe von Handschuhen, Zangen und Säcken unterstützt wird.

Die gesammelten Abfälle konnten im Rahmen der Flurreinigungsaktionen in Oberösterreich analysiert werden. Es ist zu beobachten, dass viele typische Littering-Abfälle aber auch sonstige Abfälle, wie bspw. landwirtschaftliche Abfälle oder auch Restabfall von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern eingesammelt wurden.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Zusammensetzung und Menge der gesammelten bzw. gelitterten Abfälle aus den Flurreinigungsaktionen in Oberösterreich zu ermitteln. Die fachliche Basis für den gegenständlichen Beitrag wurde in zwei aktuellen Veröffentlichungen untersucht (Hietler 2020, Hietler 2021).

2 METHODE

Im Zuge der Flurreinigungsaktionen in Oberösterreich im Jahr 2021 wurden vier ländliche und urbane Gemeinden aus zwei Bezirken in Oberösterreich analysiert. Die Genauigkeit sollte dabei auf Bundeslandebene bei maximal $\pm 2,5\%$ bei einer Sicherheit von 95 % auf die Leitfraktion der Getränkeverpackungen liegen. Dafür sind rd. 1.700 kg Probemasse nötig (im Vorfeld auf Basis von Erfahrungswerten aus dem Bundesland Salzburg ermittelt). Die Anzahl an analysierten Säcken sowie die Anzahl an beprobten Gemeinden war dabei nicht im Fokus.

Die gesammelten Säcke aus den Flurreinigungsaktionen wurden für die Sortierung aufbewahrt und analysiert. Es wurden 24 Fraktionen nach Masse, Volumen und teilweise nach Stück analysiert. Das Volumen wurde mit Abfallbehälter, Kübel oder Maurertrögen abgeschätzt.

3 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse basieren auf einer repräsentativen Probemasse mit einer Sicherheit von 95 % und können als Gesamtergebnis der Littering-Situation in Oberösterreich betrachtet werden.

3.1 Gesamtergebnisse

Die Gesamtergebnisse der Analyse der Flurreinigungsaktionen in Oberösterreich im Jahr 2021 zeigen:

- Getränkeverpackungen (GVP) mit rd. 26,7 Masse-% ($\pm 2,1\%$) und mit rd. 37,3 Volums-% ($\pm 2,3\%$)
- Sonstigen Abfällen (Restabfall) mit rd. 22,9 Masse-% ($\pm 2,0\%$) und 10,4 Volums-% ($\pm 1,4\%$),
- Kunststoff Nicht-Verpackungen (wie bspw. Agrarfolien oder Spielzeug) mit rd. 10,6 Masse-% ($\pm 1,4\%$) und 17,6 Volums-% ($\pm 1,8\%$)
- Sonstige Leichtverpackungen (LVP, wie bspw. Kunststoffverpackungen oder Kunststofftragetaschen) mit rd. 5,6 Masse-% ($\pm 1,1\%$) und rd. 13,8 Volums-% ($\pm 1,6\%$).

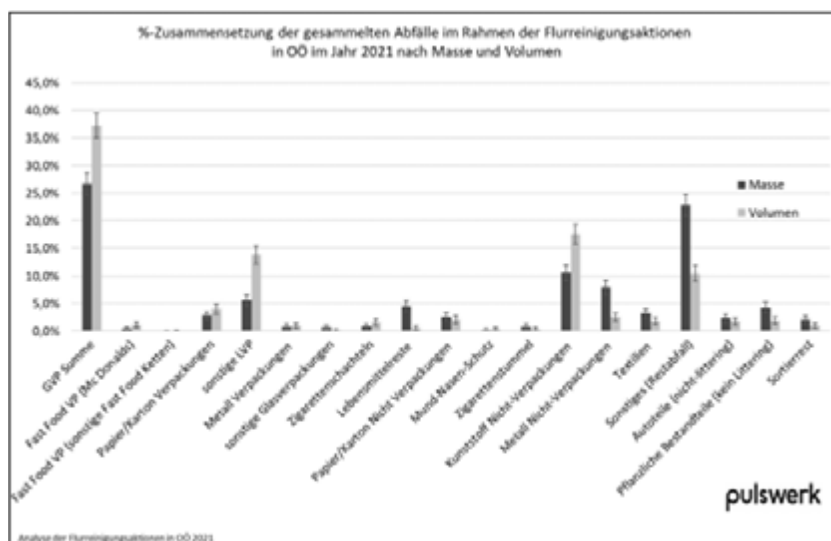


Abb. 1: %-Zusammensetzung der gesammelten Abfälle im Rahmen der Flurreinigungsaktionen in OÖ nach Masse und Volumen

3.2 Detailergebnisse der typischen Littering-Abfälle

Die Fraktionen der typischen Littering-Abfälle wurden neben der Wiegung und der Volumsabschätzung (z. b. über den Füllgrad der standardisierten Abfallbehälter) auch gezählt, da die weg-geworfenen Stückzahlen beim Littering oftmals aussagekräftiger ist als die Masse und das Volumen.

Es zeigt sich ganz klar, dass nach Stück die Zigarettenstummel mit rd. 48,8 Stück-% (+/- 2,3 %) mit Abstand am meisten in die Natur oder den öffentlichen Raum geworfen werden, gefolgt von den Getränkeverpackungen mit rd. 17,7 Stück-% (+/- 1,8 %) und sonstigen Leichtverpackungen (LVP) mit rd. 15,3 Stück-% (+/- 1,7 %).

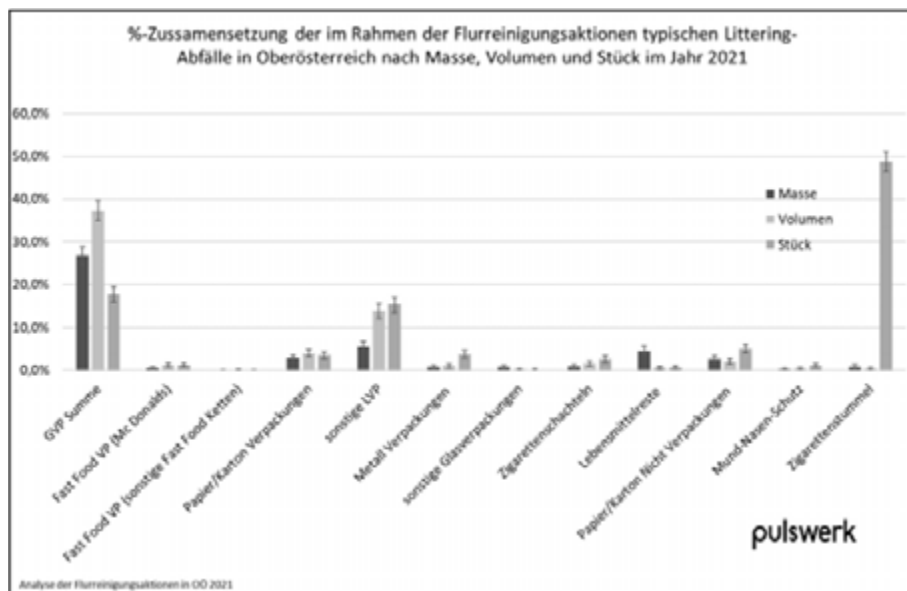


Abb. 2: %-Zusammensetzung der im Rahmen der Flurreinigungsaktionen typischer Littering-Abfälle in OÖ nach Masse, Volumen und Stück

Bei Getränkeverpackungen zeigt sich, dass nach Masse die Einweg-Glasflaschen mit rd. 13,3 % (+/- 1,6 %), gefolgt von den Getränkedosen mit 4,5 % (+/- 1,0 %) und der PET-Flasche mit rd. 4,3 % (+/- 0,9 %) am häufigsten gelittert werden.

Bei der Betrachtung des gelitterten Volumens je Getränkeverpackungen liegt die PET-Flasche an erster Stelle mit rd. 17,6 Volums-% (+/- 1,8 %), gefolgt von den Getränkedosen mit rd. 13,3 Volums-% (+/- 1,6 %).

Die Ergebnisse nach den gelitterten Stückzahlen zeigt, dass die Getränkedose mit rd. 9,6 Stück-% (+/- 1,4 %) und der PET-Flasche mit rd. 5,0 Stück-% (+/- 1,0 %) den größten Anteil an den gelitterten Getränkeverpackungen haben. Die Mehrweg-Glasflaschen spielen beim Littering so gut wie keine Rolle. Littering bei Getränkeverpackungen werden zu rd. 98 % durch Einweg-Getränkeverpackungen verursacht.

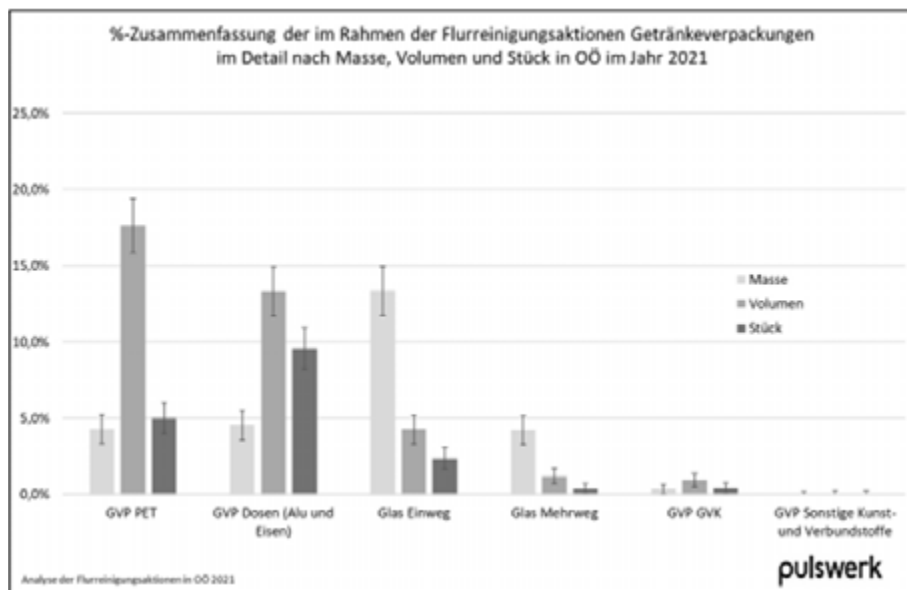


Abb 3: %-Zusammensetzung der im Rahmen der Flurreinigungsaktionen OÖ gesammelten Getränkeverpackungen nach Masse, Volumen und Stück

An dieser Stelle ist festzuhalten, dass durch die Einführung eines Einwegpfandes auf Getränkedosen und PET-Flaschen sowie die Einführung einer Mehrweg 0,33 Liter Bierflasche das Littering von fast allen Getränkeverpackungen verhindert werden würde. Dadurch werden sich die Littering-Mengen erheblich verringern.

4 WEITERE ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Littering ist das achtlose Liegenlassen und Wegwerfen von Abfällen (Verpackungen, Zeitungen, Zigarettenstummel usw.) an ihrem Entstehungsort im öffentlichen Raum, ohne die dafür vorgesehenen kostenlosen Entsorgungsmöglichkeiten (öffentliche Abfalleimer) zu benutzen.

Typische Littering-Abfälle gehen Hand in Hand mit sehr kurzlebigen Konsumgütern oder mit Take-Away-Produkten. Diese werden meist unterwegs konsumiert und die übriggebliebenen Verpackungen oder auch Zigarettenstummel werden an Ort und Stelle weggeworfen oder aus dem Fahrzeug geworfen.

Es zeigt sich, dass nach Masse sowie nach Volumen, die am häufigsten gesammelte und gelitterte Fraktion der Flurreinigungsaktion in OÖ die Getränkeverpackungen mit rd. 26,7 Masse-% (+/- 2,1 %) und 37,3 Volums-% (+/- 2,3 %) darstellen, gefolgt von Sonstigen Abfällen (bzw. Restabfall) mit rd. 22,9 Masse-% (+/- 2,0 %) und 10,4 Volums-% (+/- 1,4 %), Kunststoff Nicht-Verpackungen (wie bspw. Agrarfolien oder Spielzeug) mit rd. 10,6 Masse-% (+/- 1,4 %) und 17,6 Volums-% (+/- 1,8 %) und sonstige Leichtverpackungen (wie bspw. Kunststoffverpackungen oder Kunststofftragetaschen) mit rd. 5,6 Masse-% (+/- 1,1 %) und rd. 13,8 Volums-% (+/- 1,6 %). Bei der gesonderten Betrachtung der typischen Littering-Abfälle nach Stück zeigt sich, dass die Zigarettenstummel mit rd. 48,8 Stück-% (+/- 2,3 %) mit Abstand am meisten in die Natur oder den öffentlichen Raum geworfen werden, gefolgt von den Getränkeverpackungen mit rd. 17,7 Stück-% (+/- 1,8 %) und sonstigen Leichtverpackungen (LVP) mit rd. 15,3 Stück-% (+/- 1,7 %).

Im Rahmen der Flurreinigungsaktionen wurden ländliche und urbane Flurreinigungsaktionen in Oberösterreich untersucht und dabei Unterschiede in der Zusammensetzung der gelitterten Abfälle zwischen Stadt und Land nach Masse gefunden.

Es zeigt sich, dass Getränkeverpackungen nach Masse in städtischen Strukturen einen signifikant höheren Anteil an der Zusammensetzung aufweisen als in ländlichen Strukturen. Dies lässt sich durch den sehr hohen Gewichtsanteil der Einweg-Glasflaschen im städtischen Raum erklären. Ebenfalls auffällig und signifikant höhere Anteile haben die weggeworfenen Lebensmittel im

städtischen Raum. Diese setzten sich zusammen aus Getränke-, Snack- oder Fast-Food-Resten. Im ländlichen Raum zeigen sich signifikant höhere Anteile bei Kunststoff Nicht-Verpackungen und Metall Nicht-Verpackungen sowie Autoteile. Diese höheren Anteile an Kunststoff Nicht-Verpackungen im ländlichen Raum lassen sich zum großen Teil durch landwirtschaftliche Abfälle wie Silofolien erklären. Ebenfalls sehr schwere Metallteile wurden gesammelt wie bspw. Kurbelwellen, Bleche oder Teile von Bauzäunen.

Grundsätzlich zeigt sich ein sehr hoher Anteil an gelitterten Zigarettenstummel im städtischen Raum im Gegensatz zum ländlichen Raum. Bei den Getränkeverpackungen sowie bei den sonstigen Leichtverpackungen (LVP) zeigen sich im ländlichen Raum höhere Anteile in der Zusammensetzung der gelitterten Stücke als in städtischen Strukturen.

Die hochgerechneten Abfallfraktionen der Littering-Analyse nach Masse zeigen, dass jährlich in Oberösterreich rd. 10.890 kg (+/- 7,7 %) an Getränkeverpackungen gelittert werden, gefolgt von sonstigen Abfällen bzw. Restabfall im Ausmaß von rd. 9.325 kg (+/- 8,6 %). Ebenfalls eine größere Menge an Kunststoff Nicht-Verpackungen mit rd. 4.321 kg (+/- 13,5 %) sowie Metall Nicht-Verpackungen mit rd. 3.261 kg (+/- 15,8 %) werden in der Natur entsorgt. Weiters zeigt sich eine Auffälligkeit, dass auch Lebensmittelreste mit rd. 1.872 kg (+/- 21,3 %) in die Natur bzw. in den öffentlichen Raum geworfen werden.

Bei der Betrachtung der hochgerechneten Menge für Oberösterreich zeigen die Ergebnisse, dass mit Abstand die am meisten gesammelten bzw. gelitterten Abfälle die Zigarettenstummel nach Stück sind. Es ist allerdings davon auszugehen, dass eine viel größere Mengen davon jedes Jahr gelittert wird, da ebenfalls viele Zigarettenstummel von regelmäßigen Straßenreinigungen erfasst werden und insbesondere in ländlichen Gebieten, diese nicht gefunden werden und in der Natur verbleiben. Die am zweit häufigste gelitterte Fraktion sind die Getränkeverpackungen (GVP).

Getränkeverpackungen haben nach Masse und Volumen den größten Anteil an der Vermüllung der Natur und stehen an zweiter Stelle nach Stück.

Im Zuge der Analyse der Flurreinigungsaktion in Oberösterreich wurden insgesamt 9.068 Stück gezählt, davon waren 4.899 Getränkedosen und 2.550 PET-Flaschen. Weiters wurden noch 1.202 Einweg-Glasflaschen sortiert sowie 199 Getränkeverbundkartons (GVK) und 29 sonstige Getränkeverpackungen (LDPE oder HDPE). Bei den Mehrweg-Glasflaschen wurden 190 Stück in Summe erfasst, den größten Anteil davon hat die 0,5 Liter Bierflasche. Dies zeigt, dass nach Stück betrachtet, die Einweg-Getränkeverpackungen für rd. 98 % der gesamten gelitterten Getränkeverpackungen verantwortlich sind. Mehrwegflaschen spielen somit keine große Rolle beim Littering, obwohl diese gerade mal einen Pfandwert von 9 Cent aufweisen.

Bei der Hochrechnung der Anzahl an gesammelten bzw. gelitterten Getränkeverpackungen zeigt sich, dass in Summe rd. 209.000 Stück in die Natur oder öffentlichen Raum achtlos weggeworfen werden. Bei der Betrachtung der Getränkedosen wird ersichtlich, dass diese im Ausmaß von rd. 113.000 Stück und die PET-Flaschen im Ausmaß von rd. 59.000 Stück gelittert werden. Bei der Annahme, dass diese mit 30 Cent bepfandet wären, würde dies einen gelitterten Pfandwert von rd. 51.500 Euro bedeuten.

Ebenfalls eine hohe Stückzahl weisen die Einweg-Glasflaschen mit rd. 28.000 Stück auf. Wenn diese brechen, dann geht von ihnen eine nicht zu unterschätzende Gefahr für Mensch und Tier durch Verletzungen aus.

Durch eine Einführung eines Einwegpfandes auf Getränkedosen und PET-Flaschen sowie die großflächige Einführung einer 0,33 Liter Bierflasche sowie einer Mehrweg Weinflasche (mit Vorbild der Allwegflasche aus der Steiermark) könnten theoretisch rd. 22,2 % der gesamten Littering-Masse, 35,2 % des Littering-Volumens und rd. 16,9 % der gelitterten Stückzahl aus dem Littering-Geschehen im Vorfeld entfernt werden.

Rauchen gefährdet ihre Umwelt! Littering-Abfälle, die durch das Rauchen entstehen, haben mit Abstand den größten Anteil an der Stückzahl.

Durch das Rauchen wird eine sehr große Stückzahl an Zigarettenstummel gelittert. Nach Stück sind diese mit Abstand die größte gesammelte Fraktion bei der Zusammensetzung der Abfälle aus der Flurreinigungsaktion. Es ist allerdings davon auszugehen, dass die tatsächliche gelitterte Menge an Zigarettenstummel viel höher ist, weil durch die ständige Straßenreinigung eine große Menge an Zigarettenstummel erfasst werden und weil insbesondere im ländlichen Raum diese oft nicht sichtbar sind und in der Natur verbleiben. Zu den gesammelten bzw. gelitterten

Zigarettenstummeln von rd. 575.000 Stücken wurden noch zusätzlich rd. 31.000 Zigaretten-schachteln achtlos weggeworfen.

Sonstige Leichtverpackungen sind beim Littering nicht zu vernachlässigen!

Sonstige Leichtverpackungen sind sehr leichte Materialien und bestehen aus Kunststofffolien, Kunststofftaschen, beschichtete Kunststoffverpackungen bzw. diverse Verpackungen aus Materialverbund. Obwohl diese Verpackungen ein sehr geringes spezifischen Gewicht aufweisen, sind diese in der Zusammensetzung nach Masse sichtbar. Nach Volumen und Stück zählt diese Fraktion zu den größten in der Littering-Zusammensetzung.

Die Leichtverpackungen werden sehr leicht durch bspw. Wind verfrachtet und werden im Laufe der Zeit durch Witterung oder physikalische Prozesse zerkleinert. Es ist davon auszugehen, dass diese Materialien einen nicht vernachlässigbaren Anteil an Makro- und Mikrokunststoffen in der Natur haben.

Sonstige Abfälle bzw. Restabfall haben den zweit größten Anteil an der Littering-Zusammensetzung nach Masse.

Die Fraktion der sonstigen Abfälle kann als Restabfall bezeichnet werden. Darin enthalten sind alle Abfälle, die keiner anderer Fraktion zugehörig sind. Diese Abfälle bestehen aus inertem Material wie Teller oder Porzellan, Holzteile, Baumaterialien oder auch Taschentücher. Diese Abfälle zählen nicht zu den typischen Littering-Abfällen und stehen im Verdacht nicht achtlos weggeworfen, sondern absichtlich entsorgt zu werden und können eher zur illegalen Entsorgung gezählt werden. Ebenfalls denkbar ist, dass diese Abfälle teilweise unabsichtlich durch Windverwehungen oder von Transportern fallen und so in die Natur oder in den öffentlichen Raum gelangen.

Kunststoff Nicht-Verpackungen zeigen hohe Anteile an den entsorgten Abfällen.

Kunststoff Nicht-Verpackungen haben nach Masse den dritt größten Anteil und nach Volumen den zweit größten Anteil an der Zusammensetzung der gesammelten Abfälle der Flurreinigungsaktionen. Diese Abfälle stammen zu einem großen Teil aus der Landwirtschaft und sind bspw. Silofolien, aber auch aus dem Freizeitbereich wie bspw. Spielsachen. Diese Kunststoffe tragen ebenfalls zur Problematik des Makro- und Mikroplastiks bei und können über sehr lange Zeit in der Umwelt verweilen.

Die großen Mengen an gelitterten und entsorgten Abfällen in der Natur und im öffentlichen Raum verursachen hohe Kosten für die Allgemeinheit und gefährden die menschliche und tierische Gesundheit.

Littering zieht nicht zu vernachlässigende Folgen für Natur, Mensch und Umwelt mit sich. Das augenscheinlichste Problem ist die optische Verunreinigung von öffentlichen Plätzen bzw. Landschaften und die dadurch einhergehende qualitative Minderung von Lebens- und Erholungsräumen.

Littering und die Vermüllung der Natur ist nicht zu unterschätzen. Ohne regelmäßige Flurreinigungsaktionen sowie Reinigungen durch Straßenmeistereien würden die Abfallmengen auch für die Gesamtbevölkerung tatsächlich sichtbar werden. Die Kosten für diese regelmäßigen Reinigungen muss die Allgemeinheit tragen und diese Kosten sind nur die Spitze des Eisberges. Die Schäden die an Umwelt, Mensch und Tier dadurch entstehen sind bis dato noch nicht beziffert. Littering-Abfälle können auch ganz konkrete gesundheitliche Gefahren für Menschen und Tiere bringen. Zerschnittene oder zerrissene Metalldosen sind eine potenzielle Gefahrenquelle für uns Menschen, die sich an Dosen schneiden oder sogar eine Infektion einfangen könnten. Tiere, wie beispielsweise Kühe, Fische oder Vögel könnten Littering-Abfälle unabsichtlich mitfressen und dadurch erheblichen Schaden erleiden.

LITERATUR

Hietler, P. (2021). Stop Littering - Situationsanalyse der Litteringabfälle im Fördergebiet INTERREG V-A. Österreich-Tschechische Republik und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Reduzierung von Litteringabfällen als wichtiger Beitrag zur Kreislaufwirtschaft, Analyse der Flurreinigungsaktion in Oberösterreich, im Auftrag der Universität für Bodenkultur, Institut für Abfallwirtschaft, Wien 2021.

Hietler, P. (2020). Stop Littering - Situationsanalyse der Litteringabfälle im Fördergebiet INTERREG V-A. Österreich-Tschechische Republik und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Reduzierung von Litteringabfällen als wichtiger Beitrag zur Kreislaufwirtschaft -Literaturstudie zum Thema „Littering“, im Auftrag der Universität für Bodenkultur, Institut für Abfallwirtschaft, Wien, Juli 2020.

Konzepte zur Kreislaufwirtschaft in Europäischen Städten

M. Samhaber¹ & W. Hauer²

¹⁾ wpa Beratende Ingenieure GmbH, Wien, Österreich

²⁾ Technisches Büro HAUER Umweltwirtschaft GmbH, Korneuburg, Österreich

KURZFASSUNG: Die vorliegende Studie, im Auftrag der Stadt Wien, dient dem Erfahrungsaustausch mit anderen europäischen Städten und dem Sammeln von Maßnahmen und Strategien, die bereits erfolgreich umgesetzt bzw. geplant sind. Die 26 betrachteten Städte zeigen unterschiedlichste Strategien, die oftmals von der Siedlungsstruktur und bisherigen Erfahrungen abhängig sind. Die Systeme bei der Sammlung reichen von Fokus Holsystem (möglichst viele Fraktionen direkt von der Liegenschaft), bis hin zur gemischten Sammlung und anschließender Sortierung. Maßnahmen zur Vermeidung des Deponierens unbehandelter Abfälle sind weitgehend umgesetzt. Zum Erreichen der Recyclingquoten wird großteils auf die Verringerung des biogenen Anteils im Restmüll abgestellt.

1 EINLEITUNG

Mit dem Kreislaufwirtschaftspaket der Europäischen Union werden erhebliche Veränderungen in der Sammlung und Behandlung von Siedlungsabfällen erforderlich werden. Je nach Siedlungsstruktur stellen sich unterschiedliche Anforderungen. Für die Entwicklung der Abfallwirtschaft in der Stadt Wien ist ein Austausch mit vergleichbaren Städten hinsichtlich der bereits gesetzten Maßnahmen und Erfolge sowie der geplanten Maßnahmen von großem Interesse.

2 METHODE

Es wurden Informationen aus 26 Städten gesammelt: Hauptstädte und ausgewählte Städte > 300.000 EW aus EU-Mitgliedstaaten sowie der Schweiz und Norwegens. Die Erhebung beruht auf großteils öffentlich zugänglichen Informationen. Diese wurden teilweise je nach Bedarf durch persönliche Rücksprachen mit Mitarbeitern der jeweiligen Städte ergänzt.

3 ERGEBNISSE

3.1 Sammelsysteme

Die betrachteten europäischen Städte lassen sich im Wesentlichen den folgenden Sammelansätzen zuordnen:

3.1.1 Fokus Holsystem

Im überwiegenden Teil der europäischen Städte werden neben Restmüll und Biogenem auch die Wertstoffe im Holsystem gesammelt, mit Ausnahme von Glas – hier überwiegt das Bringsystem. Städte: Berlin, Brüssel, Hamburg, Köln, Mailand, Rom, Helsinki, Kopenhagen, Krakau, Dublin, Lyon, Paris, Marseille, Madrid, Oslo, Stockholm

3.1.2 Fokus Bringsystem

Ab Liegenschaft stehen ausschließlich Tonnen für Restmüll und Biogenes (z.T. auch Papier) zur Verfügung. Wertstoffe wie Kunststoff, GVK, Metalle, Papier und Glas werden getrennt im Bringsystem gesammelt. (Kunststoffe, GVK und Metalle z.T. gemeinsam)

Städte: Bukarest, Prag, München, Zürich, Tallinn

3.1.3 Bring- und Holsystem

Je nach Siedlungsdichte der einzelnen Bezirke/Stadtteile wird die Sammlung im Bring- oder Holsystem angeboten. Getrennt werden die Fraktionen Restmüll, Biogenes, LVP (Kunststoff, GVK, Metalle), Papier und Glas.

Städte: Budapest, Barcelona, Florenz

3.1.4 Fokus gemischte Sammlung und Restmüllsortierung

Kunststoffe, GVK und Metalle werden zusammen mit dem Restmüll gesammelt und anschließend über Sortieranlagen erfasst. Eine getrennte Sammlung von Wertstoffen besteht ausschließlich für Papier und Glas, welche hauptsächlich im Bringsystem erfolgt.

Städte: Rotterdam und Amsterdam

		Rotterdam	Amsterdam	Bukarest	Prag	München	Zürich	Tallinn	Budapest	Barcelona	Florenz	Berlin	Brüssel	Hamburg	Köln	Mailand	Rom	Helsinki	Kopenhagen	Krakau	Dublin	Lyon	Paris	Marseille	Madrid	Oslo	Stockholm
Holsystem	RM	▼	●	●	●	●	●	●	▼	▲	▲	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	BIO	▼		?	●		●	■	▼	▲	▲	●	●	●	●	●	●	■	●	●	●	■	■	●	●	●	
	KST	▼							●	▲	▲	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	GVK	▼							●	▲	▲	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	MET	▼							●	▲	▲	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	PPK	▼				●	●	●	●	▲	▲	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	GLAS									▲	▲	▼						●	●	●			●			●	
Bringsystem	RM	●	●						●	●																	
	BIO	●	●	?					●	●	●										●					●	
	KST	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●																
	GVK	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●																
	MET	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●														●	●	
	PPK	●	●	●	●				●	●	●														●		
	GLAS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	

▼ nur in dünn besiedelten Gebieten

▲ nur in der Altstadt

■ Eigenkompostierung

● inkl. Nicht-VP-Kunststoff („Wertstofftonne“)

▼ nur in dünn besiedelten Gebieten

▲ nur in der Altstadt

■ Eigenkompostierung

● inkl. Nicht-VP-Kunststoff („Wertstofftonne“)

Abb. 1: Übersicht über die Sammelsysteme in 26 europäischen Städten

3.2 Abfallvermeidungsmaßnahmen

In vielen Städten werden Maßnahmen für die weitere Nutzung gebrauchter Waren gesetzt. Dazu werden von den Städten eigene Re-Use-Shops betrieben. In Eigenverantwortung oder in Kooperation mit diversen Institutionen werden Aufbereitungsschritte für gebrauchte Waren forciert. Ebenso werden Reparaturmaßnahmen zur Verlängerung des Produktlebenszyklus beworben. In München und Dublin wurden bildstarke Kampagnen gegen Einwegverpackungen gestartet.

3.3 Konzepte zur Kreislaufwirtschaft

3.3.1 Zero Waste Cities

Das Konzept „Zero Waste“ verfolgen bereits mehrere europäische Städte wie München, Mailand, Barcelona und Zürich. Es ist eine Verpflichtung der Stadtverwaltung, nach einem konkreten Plan die Abfallvermeidung voranzutreiben.

„Das Programm Zero Waste Cities ist aktiv an einer Reihe verschiedener Projekte in ganz Europa beteiligt, bei denen sowohl mit Mitgliedern als auch mit anderen Partnern an einer Reihe von Initiativen auf lokaler Ebene gearbeitet wird. Von der gemeinsamen Schaffung von Bildungsressourcen zur Umsetzung von Zero Waste bis hin zur Erfassung von Best-Practice-Beispielen lokaler Maßnahmen mit dem Ziel, den Übergang zu Zero Waste auf lokaler Ebene zu beschleunigen.“ (<https://zerowastecities.eu/discover/>, 2021)

3.3.2 C-40 Städte

Die C40-Städte wollen Maßnahmen setzen, um die Klimaziele des Pariser Abkommens zu erreichen. Dazu sollte jede Stadt bis Ende des Jahres 2020 einen Klimaschutzplan erstellt haben. Dieses Ziel haben sich unter anderem die Städte Kopenhagen, Paris, Rotterdam und Barcelona gesetzt.

Wesentliche Bestandteile der Klimaschutzpläne sind Maßnahmen zur Verringerung der Abfallmengen und zur Verringerung der Menge unbehandelt deponierter Abfälle. Dazu soll insbesondere die getrennte Sammlung und Behandlung biogener Abfälle ausgebaut werden.

Zur Abfallvermeidung sollen Maßnahmen zur reparatur- und recycling-gerechten Gestaltung von Produkten gesetzt werden.

3.3.3 Reflow

REFLOW ist ein von der EU finanziertes Projekt, das darauf abzielt, urbane Materialflüsse zu verstehen und zu verändern sowie regenerative Lösungen auf Unternehmens-, Verwaltungs- und Bürgerebene zu entwickeln und zu testen.

Sechs Pilotstädte in Europa testen verschiedene Ansätze für die Kreislaufwirtschaft in Städten, indem sie sich auf unterschiedliche Ressourcenströme konzentrieren: Textile (Life)cycling (Amsterdam), Wastewater Heat (Berlin), Food Market 4.0 (Mailand), Fair Tracker (Paris), Cucular Plastics (Vejle) und PLEnergy (Cluj-Napoca)

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

In den betrachteten Städten sind Maßnahmen zur Vermeidung des Deponierens unbehandelter Abfälle weitgehend umgesetzt. Zum Erreichen der Recyclingquoten wird großteils auf die Verringerung des biogenen Anteils im Restmüll abgestellt. Die biogenen Anteile bewegen sich meist im Bereich eines Drittels der gemischten Siedlungsabfälle und stellen somit das weitaus größte Potential für eine getrennte Sammlung und eine stoffliche Verwertung dar.

Wieweit die Verwertung tatsächlich als „Recycling“ eingestuft werden kann, scheint nicht restlos geklärt, werden doch oftmals anaerobe Prozesse eingesetzt, deren Rückstände nicht die Qualitätskriterien für eine stoffliche Nutzung erfüllen und verbrannt werden.

Während die meisten Städte eine Intensivierung der getrennten Sammlung von Papier, Metallen, Leicht-Verpackungen und biogenen Abfällen anstreben, betrachtet die Stadt Amsterdam das Erreichen ausreichend hoher Sammelquoten als unrealistisch und trotz intensiver Bemühungen gescheitert. Sie hat umgeschwenkt, stellt die getrennte Sammlung von KSt-VP und Metallen ein und setzt auf eine Sortierung aus gemischten Siedlungsabfällen (Restmüll).

Für Getränkeverpackungen aus Kunststoff und Metall wird grundsätzlich auf Pfandsysteme und eine Rücknahme durch den Handel gesetzt.

Von besonderer Bedeutung bei den biogenen Abfällen sind die feuchten, in jedem Haushalt anfallenden Küchenabfälle. Insbesondere in Mailand wurden Maßnahmen zur getrennten Sammlung von Küchenabfällen ab Liegenschaft getroffen. Die Abholung der Abfälle erfolgt dabei ein- bis zweimal pro Woche in kleinen Behältern. Die Sammlung wird durch die Ausgabe von Vorsammel-Säcken unterstützt.

Anhand der vorliegenden Recherche zu 26 europäischen Städten scheint ein Mix aus parallelen Maßnahmen als geeignet, um hohe Sammel- und Recyclingraten zu erreichen. Dabei sind alle Akteure der Wirtschaftskette gleichermaßen gefordert – Produzenten, Handel, Konsument*innen/Bürger*innen, Gemeindeverwaltungen

- Verwertungsgerechte Gestaltung insbesondere kurzlebiger Produkte / Verpackungen
 - Homogene Werkstoffe
 - Abbaubare Verpackungen für Lebensmittel, insbesondere Obst/Gemüse zur Sicherung der Verwertbarkeit biogener Abfälle)
- Intensive getrennte Sammlung durch Bürger*innen
 - Mehrweg-Systeme sowie Einweg-Pfandsysteme für Getränke-VP und to-go-VP
 - Altstoffsammlung im Holsystem – Papier, LVP
 - Sammlung biogener Abfälle – getrennt nach Grünschnitt und Küchenabfälle
 - Verdichtete „Mini“-Recyclinghofstruktur für Problemstoffe, EAG, Batterien, KSt-Produkte, ...
- Vertiefte Sortierung von Sammelware, insbesondere LVP
- Ergänzung durch Sortierung von Restmüll
- Aufbereitung und Verwertung von Verbrennungsrückständen (Metalle, Glas, Keramik, Steine)

LITERATUR

Technisches Büro Hauer Umweltwirtschaft GmbH (2021). *Konzepte zur Kreislaufwirtschaft in Europäischen Städten*. Korneuburg, im Auftrag der Stadt Wien, Magistratsabteilung 48, unveröffentlicht.

Von der linearen Abfallwirtschaft zur *Circular Economy* in Brasilien

C. Buchenberger¹, K. Schmidt¹ & T.S. Spengler¹

¹ Technische Universität Braunschweig, Institut für Automobilwirtschaft & industrielle Produktion, Lehrstuhl für Produktion und Logistik, Braunschweig, Deutschland

KURZFASSUNG: Brasilien verfügt seit 2010 über eine fortschrittliche Abfallpolitik, die im Frühjahr 2022 im Umsetzungsplan PLANARES um ambitionierte Recyclingquoten ergänzt wurde. Der Umsetzungsplan sieht u.a. eine Recyclingquote für Wertstoffe von 20 % bis 2040 vor, was einer Vervielfachung des aktuellen Wertes entspricht. Dies stellt die für die Abfallwirtschaft zuständigen Kommunen vor große Herausforderungen. Regionale und nachhaltige Abfallwirtschaftskonzepte, die lokale Rahmenbedingungen berücksichtigen und auf die Herstellung von Sekundärrohstoffen abzielen, sind Teil der Lösung und tragen zur Erreichung der Recyclingziele bei. Diese Konzepte bestehen aus verschiedenen Technologiekombinationen, die fraktionsspezifisch und nach definierten Kriterien geplant werden müssen. Für eine effektive und effiziente Planung sollten Maßnahmen in den Bereichen Technisierung, Modularität, Standorte und Dynamiken berücksichtigt werden.

1 EINLEITUNG

Die steigende Menge an Siedlungsabfall stellt weltweit eine große Herausforderung dar. Die Weltbank (Kaza et al. 2018) prognostiziert für die Gruppe der „Upper middle income countries“ (zu denen u.a. Brasilien, China, Russland gehören) bis 2050 einen Anstieg der Abfallmengen von rund 50 % sowie einen Anstieg der THG-Emissionen aus dem Abfallsektor in ähnlicher Höhe (Kaza et al. 2018). In Brasilien ist der Abfallsektor nach Energie, Änderung der Landnutzung, Landwirtschaft und Industrie der fünfgrößte Treibhausgas (THG-)Emittent (SEEG 2018). Obwohl er nur rund 5 % beträgt, wies er zwischen den Jahren 2010 und 2020 hohe Wachstumsraten von rund 23 % (ABRELPE 2021) auf. Bei der Abfallzusammensetzung dominiert die organische Fraktion mit rund 45 %, gefolgt von Kunststoffen (16,8 %) und Papier, Pappe und Kartonagen (PPK, 10,4 % (ABRELPE 2021)).

Obwohl die nationale Abfallpolitik (Política Nacional de Resíduos Sólidos, PNRS) schon 2010 verabschiedet wurde (Presidência da República 2010), wurde das Ziel der Beendigung der unsachgemäßen Deponierung bis 2014 bislang nicht erreicht. Lediglich rund 60 % der Abfälle werden aktuell auf geordneten Deponien (nach westlichen Standards) entsorgt, die restlichen 40 % auf offenen und abgedeckten Müllkippen (ABRELPE 2021). Bedingt durch diese lineare Abfallwirtschaft liegt das ökologische und ökonomische Potenzial einer *Circular Economy* im Sinne der Ellen MacArthur Foundation (Ellen MacArthur Foundation 2019) derzeit nahezu vollständig brach. Vor diesem Hintergrund wurden die gesetzlichen Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Abfallwirtschaft in Brasilien im April 2022 verschärft. Der Umsetzungsplan PLANARES (Plano Nacional de Resíduos Sólidos) wurde veröffentlicht, der die nationale Abfallpolitik um konkrete ambitionierte Recyclingquoten ergänzt. Der Plan sieht vor, dass bis 2040 20 % der Wertstoffe sowie 13,5 % der organischen Abfälle recycelt werden (Ministério do Meio Ambiente 2022). Zum Vergleich: derzeit liegen Recyclingquoten je nach Quelle zwischen 2 und 5 % (Ministério do Meio Ambiente 2022), (ABRELPE 2021).

Daraus ergibt sich großer Handlungsbedarf bei den für die Abfallentsorgung verantwortlichen Kommunen. Motiviert durch die strengeren gesetzlichen Anforderungen stellen nachhaltige Abfallwirtschaftskonzepte auf regionaler Ebene einen Lösungsansatz auf dem Weg zur *Circular Economy* dar. Regionale nachhaltige Abfallwirtschaftskonzepte werden verstanden als Kombination von technischen Prozessen der Abfallbehandlung, die auf die jeweiligen Rahmenbedingungen im Umsetzungsgebiet, d.h. auf lokale Abfallströme und Nachfrage nach Sekundärerzeugnissen, abgestimmt sind (Bilitewski & Härdtle 2013). Mit der Hervorhebung der Nachfrage nach Sekundärerzeugnissen wird eine zukünftige Kreislaufführung von Materialien im Sinne einer *Circular Economy* ermöglicht. Bei der Planung dieser (zunächst) technischen Konzepte sollen zudem sowohl die ökologische (hinsichtlich der Reduktion von THG-Emissionen und des

Ressourcenschutzes) als auch die ökonomische Vorteilhaftigkeit (hinsichtlich der Effizienz der abfallwirtschaftlichen Prozesse) berücksichtigt werden. Weiterhin spielen soziale Aspekte, wie die Schaffung von Arbeitsplätzen für informelle Abfallsammler:innen oder die Einbeziehung der Gesellschaft eine wichtige Rolle.

Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel dieses Beitrages in der Beantwortung der folgenden Fragestellungen: Welche Stakeholder sind bei der Entwicklung nachhaltiger Abfallwirtschaftskonzepte zu berücksichtigen? Welche Barrieren bestehen aktuell für die Entwicklung nachhaltiger Abfallwirtschaftskonzepte? Und schließlich: Welche Maßnahmen zur Überwindung der Barrieren, bzw. zur Erreichung eines nachhaltigen Abfallwirtschaftskonzeptes sind sinnvoll? Zur Beantwortung dieser Fragen ist der Beitrag wie folgt aufgebaut: In Kapitel 2 werden die relevanten Akteure sowie die bestehenden Barrieren einschließlich konfliktärer Ziele vorgestellt. Zur Überwindung der Barrieren werden in Kapitel 3 mögliche Maßnahmen vorgestellt und diskutiert. Der Beitrag endet mit einer kurzen Zusammenfassung und einem Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf in Kapitel 4.

2 AKTEURE UND BARRIEREN

Zur Ableitung des Handlungsbedarfs ist ein grundlegendes Verständnis des Status quo notwendig. Dazu werden zunächst die wichtigsten Akteure im brasilianischen Abfallsektor und anschließend die aktuell bestehenden Barrieren vorgestellt. Deren Kenntnis ist wichtig, um effektive Maßnahmen zu formulieren.

2.1 Akteure

Die im Umsetzungsplan PLANARES formulierten Recyclingquoten sind ambitioniert und erfordern hohe Investitionen in Technologien und die Errichtung von Abfallbehandlungsanlagen. Daher ist eine sorgfältige Planung für die Umsetzung notwendig. Die Planung nachhaltiger regionaler Abfallwirtschaftskonzepte sollte zudem die relevanten Akteure berücksichtigen, die in Abbildung 1 dargestellt sind.



Abb. 1: Relevante Akteure bei der Planung nachhaltiger Abfallwirtschaftskonzepte (Eigene Darstellung)

Im Zentrum der Planung stehen die **Kommunen**, bzw. kommunale Entscheidungsträger:innen, die für Sammlung und Entsorgung der lokalen Abfälle zuständig sind. Sie sind in der Pflicht, die neuen Recyclingquoten sowie das Ende der unsachgemäßen Deponierung in ihrer Kommune umzusetzen. Die **Gesetzgebung** legt in Form von Bundes- und bundesstaatlichen Gesetzen (z.B. PNRS und PLANARES) den rechtlichen Rahmen für den Abfallsektor fest. Die **Gesellschaft** ist als Verursacherin von Siedlungsabfällen relevant. Das Abfallaufkommen variiert in Menge und

Zusammensetzung im Jahreslauf, nach Region und über die Zeit. Beispielsweise ist das Abfallaufkommen pro Kopf zwischen 2010 und 2019 um knapp 10 % gestiegen (ABRELPE 2021). Rund 75 % der brasilianischen Kommunen verfügen über eine Getrenntsammlung (ABRELPE 2022), was sich grundsätzlich positiv auf das Recycling auswirkt. Dies erfordert aber die Bereitschaft der Gesellschaft, Abfälle direkt an der Quelle korrekt zu sortieren.

Recycling-Anlagenbetreiber:innen sind im Regelfall privatwirtschaftliche Akteure, die von den Kommunen zur Behandlung der kommunalen Abfälle beauftragt werden. Sie behandeln, bzw. verwerten Siedlungsabfälle, die ihnen die Kommunen überlassen. Zur Herstellung möglichst hochwertiger Sekundärrohstoffe sind sie auf gut sortierte Abfälle angewiesen, um Erlöse zu erzielen. Dabei konkurrieren sie mit Herstellern von Erzeugnissen aus Primärrohstoffen. Der **informelle Sektor**, bestehend aus den sogenannten Catadores (Abfallsammler:innen / „waste pickers“), stellt eine besondere Gruppe innerhalb der Gesellschaft dar und wird in der PNRS gesondert genannt, als in die lokale Abfallwirtschaft zu integrierende Gruppe. Je nach Organisationsgrad stellen die Catadores relevante politische Akteure dar, jedoch hängt von der jeweils vorherrschenden kommunalen Unterstützung und Integration ab, inwiefern sie sich einbringen können. Sie arbeiten teils selbstständig, teils in Kooperativen und sind in verschiedenen Phasen der abfallwirtschaftlichen Wertschöpfungskette, z.B. bei Sammlung, Sortierung, teilweise Verwertung, Vermarktung/Verkauf von Wertstoffen an Zwischenhändler tätig. Die **(Verpackungs-)Industrie** ist Abnehmerin für recycelte Sekundärrohstoffe (z.B. Regranulat) und stellt damit neue Produkte her. Die Herstellung hochwertiger Produkte, die von der Industrie nachgefragt werden, ist essenziell zur Erreichung der Kreislaufführung von Materialien.

2.2 Barrieren

Bei der Entwicklung hin zu einer nachhaltigen Abfallwirtschaft sind die Akteure derzeit und zukünftig mit vielfältigen Barrieren konfrontiert. So fehlt es an einer **Strategie** zur Erreichung der ambitionierten Recyclingquoten. In vielen Kommunen sind kaum Daten zum Abfallaufkommen vorhanden, was eine effektive und auf die lokalen Bedingungen abgestimmte Planung stark erschwert oder sogar dazu führen kann, dass Investitionen in Maschinen getätigt werden, die in der Umsetzung nicht funktionieren (Souza et al. 2021). Zudem erfordern hochwertige Sortier- und Recyclingprozesse in großem Maßstab hochwertige **Maschinen**, die meist importiert werden müssen, was durch Zölle erschwert wird (Ministry of External Relations 2016). Brasilianische Prognosen erwarten einen Anstieg des Abfallaufkommens um 50 % bis 2050 (ggü. 2019) (ABRELPE 2021), was den Bedarf an hochwertigen Maschinen unterstreicht.

Vielen Kommunen fehlt darüber hinaus **Fachpersonal** zur Umsetzung der rechtlichen Vorgaben sowie Zugang zu **finanziellen Mitteln** für den Deponiebau. Geordnete Deponien sind umfangreiche, teure und große Bauwerke, die nach Ende des Deponiebetriebs mindestens 30 Jahre lang in der sogenannten Nachsorge verbleiben müssen, um Umweltschäden vorzubeugen (Stegmann et al. 2006). Der Umstieg von Müllkippen zu Deponien im Rahmen einer zirkulären (Abfall-)Wirtschaft ist z.B. aus Umweltschutzgründen enorm wichtig, doch trägt nicht zu einer Erhöhung der Recyclingquote bei. Der Abfallsektor selbst ist stark unterfinanziert, da viele Kommunen noch keine separaten Abfallgebühren erheben, sondern diese in der Grundsteuer inbegriffen sind (Ghesla et al. 2018). Die Sammlung, Sortierung und Behandlung von Abfällen ist mit hohen Kosten verbunden und kann nur mit ausreichender Finanzierung hochwertig durchgeführt werden. Während dem brasilianischen Abfallsektor dafür monatlich pro Kopf 10,75 BRL (rund 2 €) zur Verfügung stehen (ABRELPE 2022), betragen die mittleren Kosten der Entsorgung zum Beispiel in Deutschland monatlich pro Kopf rund 10 €, von denen rund 60 % auf Abfallbehandlung und -verwertung entfallen (Prognos AG 2020).

Viele dieser vorrangig die Kommunen betreffenden Hindernisse werden durch das gering ausgeprägte **Umweltbewusstsein** in der Gesellschaft weiter erschwert (Borges de Castilhos Jr et al. 2022). Laut ABRELPE beträgt die durchschnittliche Sammelquote rund 92 %. Das bedeutet, dass rund 8 % der erzeugten Abfälle illegal, in der Natur, entsorgt (ABRELPE 2021) und damit einer sachgerechten Behandlung entzogen werden und Umweltschäden anrichten können. Der Gesellschaft als „Abfallproduzentin“ kommt beim Recycling eine entscheidende Rolle zu: Je besser die Sortierung am Anfallort („source separation“), desto geringer der Sortier- und Aufbereitungsaufwand und desto hochwertiger die erzeugbaren Sekundärrohstoffe. Darüber hinaus ist großen

Teilen der Bevölkerung die Klimawirksamkeit der Deponierung von insbesondere organischen Abfällen (bei anaerobem Abbau bildet sich Methan) nicht bekannt.

Die Nachfrage nach **Sekundärrohstoffen** ist derzeit gering. Sekundärrohstoffe (insbesondere Kunststoffe) konkurrieren mit Primärrohstoffen, deren Preis vor allem vom Ölpreis abhängt, deren Produktion weniger arbeitsintensiv ist und die weniger Einschränkungen unterliegen, z.B. für die Nutzung in Kontakt mit Lebensmitteln. Zudem wirken sich verschiedene Steuern auf Preise von Sekundärrohstoffen aus. Aus ökonomischer Sicht liegen demnach geringe Anreize für die Nachfrage nach Sekundärrohstoffen und somit zur Entwicklung einer Kreislaufführung vor.

3 MASSNAHMEN UND DISKUSSION

Zur Überwindung der genannten Barrieren sind verschiedene Maßnahmen notwendig. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf technologischen Konzepten, wie der mechanischen Sortierung und dem Recycling, die zur Erreichung der Recyclingziele besonders relevant sind. Aufgrund der Komplexität der Auswahl geeigneter Maßnahmen kommt der Entscheidungsunterstützung der Kommunen hinsichtlich Technologie, Kapazitätsaufbau und zu tätiger Investitionen eine besondere Bedeutung zu. Bei der Entscheidung über technologische Konzepte sollten die folgenden Aspekte berücksichtigt werden.

3.1 Grad der Technisierung & modularer Aufbau

Die einstelligen Recyclingquoten zeigen, dass das Recycling in Brasilien bislang eine geringe Bedeutung hatte. Aktuell wird im brasilianischen Abfallsektor viel Handarbeit eingesetzt, Catadores sortieren manuell (Souza et al. 2021). Allerdings ist für hochwertige Recyclingprozesse und die Erzielung hoher Durchsätze, d.h. die Behandlung großer Massen, die Nutzung von Technologie notwendig. Für die verschiedenen Sortier- und Behandlungsschritte existieren Maschinen und Anlagen, die in geeigneter Weise kombiniert werden müssen. So kann die Sortierung beispielsweise durch eine Hintereinanderschaltung verschiedener Aggregate wie Siebe, Sortierverfahren im Luftstrom (z.B. Windsichter) und optische Verfahren (z.B. Nahinfrarot-Spektroskopie) erfolgen (Kranert 2017). Technisch anspruchsvolle Anlagenkonfigurationen erfordern hohe Investitionen sowie qualifiziertes Personal zur Bedienung und Wartung. Gerade für kleinere Kommunen, die über geringere Budgets verfügen und kleinere Massen bearbeiten müssen, kann es sinnvoll sein, die Sortierung weiter händisch durchzuführen und sich auf Maschinen zur Aufbereitung zu fokussieren. Werden Anlagen von Beginn an modular geplant, können diese bei Technologiesprüngen und/oder höheren Budgets aufgestockt werden. Sollen zunächst Arbeitsplätze für den informellen Sektor geschaffen werden, können bestimmte Prozessschritte zunächst mit weniger Technologie und dafür mehr Handarbeit geplant werden.

3.2 Standorte

Bei der Planung von Abfallwirtschaftskonzepten hat die Wahl der Standorte von Sortier- und Behandlungsanlagen hohe Bedeutung. Für die einzelnen Fraktionen ist abzuwägen, ob diese zentral oder dezentral sortiert und behandelt werden. Da Siedlungsabfälle ein sehr heterogenes Gemisch sind, in dem die einzelnen Fraktionen unterschiedlich stark vertreten sind und verschiedene stoffliche Eigenschaften haben, muss diese Entscheidung individuell nach Fraktion getroffen werden. Der Bau, bzw. Betrieb großer, zentraler Standorte mit großen Kapazitäten hat gegenüber dem Bau oder Betrieb mehrerer kleiner, dezentraler Anlagen mit geringen Kapazitäten den Vorteil, dass Größendegressionseffekte erzielt werden können. Das bedeutet, dass der Kapitalbedarf bei Vergrößerung der Kapazität einzelner Maschinen oft nicht proportional, sondern unterproportional steigt (Geldermann 2014) und somit die Behandlung einer Einheit Abfall im Regelfall in großen Anlagen günstiger ist.

Nachteile von zentralen Standorten sind die mitunter sehr großen Transportdistanzen, die in Form von Transportkosten in das ökonomische Kalkül eingehen. Dezentrale Standorte sind näher am Anfallort des Abfalls gelegen und können ggf. auf Änderungen bei Anfall und/oder Nachfrage flexibler reagieren. Vor allem bei Stoffen, die schlecht lagerbar sind oder die aus Sicherheitsgründen gesondert transportiert werden müssen, können dezentrale Anlagen vorteilhaft sein. Die Vorteilhaftigkeit einer zentralen gegenüber mehreren dezentralen Anlagen hängt also maßgeblich

von den jeweiligen Rahmenbedingungen ab. Bei der Wahl von Standorten sind vielschichtige und konfliktäre Zusammenhänge zu berücksichtigen, was die Entscheidung darüber komplex macht.

3.3 Dynamische Entwicklung

Große Maschinen zur Abfallsortierung und -behandlung haben eine Lebensdauer von rund 15 Jahren. Daher ist es relevant, bei der Planung dynamische Entwicklungen zu berücksichtigen. Bis 2050 wird ein Anstieg der Massen erwartet, sodass eine Auslegung von Maschinenkapazitäten auf das heutige Abfallaufkommen in wenigen Jahren nicht mehr ausreichend sein wird. Gesetzliche Vorgaben können sich ändern oder es können neue hinzukommen, wie z.B. eine Mindesteinsatzquote für Sekundärrohstoffe in der Industrie oder Steuerreduktionen für die Herstellung recycelter Materialien. Solche Vorgaben werden als notwendig erachtet für die Ausweitung von Recyclingaktivitäten, für die Erhöhung der Nachfrage seitens der Industrie und zur Entstehung einer Kreislaufführung von Materialien. Qualität und Zusammensetzung des Abfalls können sich ebenfalls ändern, worauf technologische Konzepte reagieren müssten. Es wird angestrebt, dass weitere Städte getrennte Sammelsysteme einführen, bzw. bestehende Getrenntsammlungssysteme auf das gesamte Stadtgebiet ausweiten. Damit könnten künftig Sortierschritte entfallen.

4 FAZIT UND AUSBLICK

Nachhaltige Abfallwirtschaftskonzepte sind ein wichtiges Instrument zur Erreichung der Recyclingziele sowie für die Reduktion der Treibhausgas-Emissionen des Abfallsektors in Brasilien. Die Ausweitung des Recyclings ist ein wichtiger Schritt hin zu einer *Circular Economy*. Brasilianische Kommunen unterscheiden sich stark hinsichtlich ihrer Einwohnerzahl, Bevölkerungsdichte, Fläche, Einkommen und Wirtschaftsstruktur, was sich wiederum auf Abfallmassen und deren Zusammensetzung auswirkt. Für eine zielgerichtete Planung von Abfallwirtschaftskonzepten gilt es daher, bestehende Rahmenbedingungen sowie die relevanten Akteure und deren jeweiligen Ziele zu berücksichtigen.

Bei der Darstellung der Barrieren wurde erkennbar, dass die Entwicklung eines Abfallwirtschaftskonzeptes von vielen Faktoren abhängig ist. Dennoch spielt der Einsatz von Technologie eine entscheidende Rolle, da diese das Recycling sowie die Schließung von Materialkreisläufen ermöglicht. Zudem können mit quantitativen Analysen technische Konzepte bewertet werden, während andere wichtige Aspekte wie Verhaltensänderungen oder veränderte rechtliche Vorgaben als Annahmen in die Berechnungen eingehen. Ohne technische, bzw. maschinelle Behandlung von Abfällen ist die Herstellung von Sekundärrohstoffen in großem Maßstab nicht möglich. Gleichzeitig sollte die Industrie als Nachfragerin recycelter Materialien einbezogen werden, um die Kreislaufführung von Materialien sicherzustellen.

Aufgrund hoher Investitionen in Maschinen und deren Langlebigkeit erfordert der Technologieaufbau eine sorgfältige Planung. Gegenwärtige Entscheidungen über Technologien prägen die Wirksamkeit des Recyclings der nächsten Jahre. Diese Entscheidungen obliegen den Kommunen. Um im Sinne der Nachhaltigkeit vorteilhafte Entscheidungen zu treffen, sollen in der weiteren Forschung Entscheidungsträger:innen unterstützt werden. Mithilfe betriebswirtschaftlicher Methoden können komplexe und konfliktäre Zusammenhänge modelliert und Aussagen zu den in Kapitel 3 formulierten Maßnahmen getroffen werden. Damit erhalten Entscheidungsträger:innen Übersicht über die Konsequenzen bestimmter Maßnahmen und werden in die Lage versetzt, informierte Entscheidungen zu treffen.

LITERATUR

- ABRELPE. (2021). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. Sao Paulo, Brasil.
- ABRELPE. (2022). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. Sao Paulo, Brasil.
- Bilitewski, B., & Härdtle, G. (2013). Abfallwirtschaft - Ein Handbuch für Praxis und Lehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Borges de Castilhos Jr., A., Pimentel Pincelli, I., Lange, L., Ferreira, J. A., & Matias, M. (2022). Solid Waste Policy in Brazil: Learnings and Challenges after a decade of implementation. IJEW (International Journal of Environment and Waste Management).

- Ellen MacArthur Foundation. (2019). The butterfly diagram: visualising the circular economy. Fonte: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>
- Geldermann, J. (2014). Anlagen- und Energiewirtschaft - Kosten- und Investitionsschätzung sowie Technikbewertung von Industrieanlagen. München: Franz Vahlen.
- Ghesla, P., Gomes, L., Caetano, M., Miranda, L., & Dai-Prá, L. (2018). Municipal Solid Waste Management from the Experience of São Leopoldo/Brazil and Zurich/Switzerland. Sustainability, pp. 1-14.
- Kaza, Y., Bhada-Tata, & Woerden, v. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. The World Bank.
- Kranert, M. (2017). Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Ministério do Meio Ambiente. (2022). Plano Nacional de Resíduos Sólidos PLANARES. Brasília, Brasil.
- Ministry of External Relations, Department of Trade and Investment Promotion. (2016). How to export Brazil: Practical guide to the Brazilian importing process. Brazil.
- Presidência da República. (2010). Lei N° 12305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.
- Prognos AG; INFA GmbH; Faulstich, M. (2020). Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft. <http://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de/inhalte>.
- SEEG. (2018). Emissions By Sector | SEEG - System Gas Emissions Estimation. Fonte: <http://plataforma.seeg.eco.br/sectors/residuos>
- Souza, M. A., Lima, F. d., & Varella, C. V. (2021). A conformação social do lixo e das tecnologias de triagem: o caso da transferência de Centrais Mecanizadas de Triagem em São Paulo. urbe, Rev. Bras. Gest. Urbana (urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana), pp. 1-18.
- Stegmann, R., Heyer, K.-U., Hupe, K., & Willand, A. (2006). Deponienachsorge - Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3128.pdf>: Umweltbundesamt.

Roadmap zur CO₂-Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050

C. Bauer¹, C. Dankl¹, R. Friedle¹, F. Papsch¹ & S. Spaun¹

¹⁾ Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ), Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die österreichische Zementindustrie bekennt sich zur Begrenzung der Erderwärmung und zu den Klimaschutzzielen von Paris. Die in Österreich hergestellten Zemente weisen im internationalen Vergleich heute bereits die weltweit niedrigsten CO₂-Emissionen auf. Mit ihrer Roadmap zeigt die österreichische Zementindustrie nun auf, wie bis 2050 entlang der Wertschöpfungskette von Zement eine CO₂-Neutralität erreicht werden kann. Dafür ist ein Bündel an Maßnahmen erforderlich und die österreichische Zementindustrie unternimmt gemeinsame Anstrengungen, um sie zu realisieren. Dazu zählen die weitere Optimierung der bestehenden Produktionsverfahren, tiefgreifende Änderungen im Produktportfolio im Zuge der Entwicklung neuer, CO₂-armer Zemente sowie der Einsatz bahnbrechender neuer Technologien. Die österreichische Zementindustrie nimmt diese Herausforderungen proaktiv an, benötigt dazu jedoch verlässliche Rahmenbedingungen von Seiten der Politik.

1 EINLEITUNG

Einem aktuellen Bericht der Weltorganisation für Meteorologie zufolge hat die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre im Jahr 2021 mit 413 ppm (Teile pro eine Million) einen neuen Höchststand erreicht. Die CO₂-Konzentration liegt damit 149 % über dem vorindustriellen Niveau. Alle Treibhausgase zusammen haben bereits zu einer durchschnittlichen weltweiten Erwärmung von 1,1 Grad geführt (World Meteorological Organization 2021). Die CO₂-Emissionen der Zementindustrie nehmen einen nennenswerten Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen ein, ihr Anteil beträgt etwa 4,5 % weltweit und rund 3,3 % in Österreich.

Die österreichische Zementindustrie hat bereits frühzeitig Bestrebungen zur Reduktion ihrer CO₂-Emissionen initiiert. Bisher implementierte Maßnahmen konzentrierten sich v.a. auf den Einsatz modernster Technologien für die Zementproduktion, die Abkehr von fossilen Brennstoffen und deren Ersatz durch alternative Brennstoffe sowie die Reduktion der CO₂-intensiven Klinkerkomponente im Zement. Mit diesen Maßnahmen ist seit 1990 eine CO₂-Reduktion um 21 % gelungen. Heute weist der in Österreich hergestellte Zement im internationalen Vergleich die niedrigsten CO₂-Emissionen auf. Mit ihrer CO₂-Roadmap zeigt die österreichische Zementindustrie den weiteren Weg bis zum Jahr 2050 auf und legt dar, wie entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton CO₂-Neutralität erreicht werden kann (Spaun 2022).

Gerade für die Zementindustrie sind die Herausforderungen zur Emissionsreduktion besonders hoch, entstehen doch zwei Drittel der CO₂-Emissionen durch die Entsäuerung des Kalksteins beim Brennen von Zementklinker. Dieser mineralogische Prozess zur Umwandlung von Calciumcarbonat (CaCO₃) in Calciumoxid (CaO) erfolgt unter rohstoffbedingter Freisetzung von Kohlendioxid (CO₂) und lässt sich chemisch anhand folgender Formel beschreiben:



Dies verdeutlicht, dass neben einer weiteren Forcierung der bisherigen Maßnahmen zukünftig bahnbrechende Technologien (so genannte Breakthrough-Technologien) eine entscheidende Rolle spielen werden. Insgesamt werden zur Erreichung des Ziels einer CO₂-Neutralität ein Bündel an verschiedenen Maßnahmen erforderlich sein.

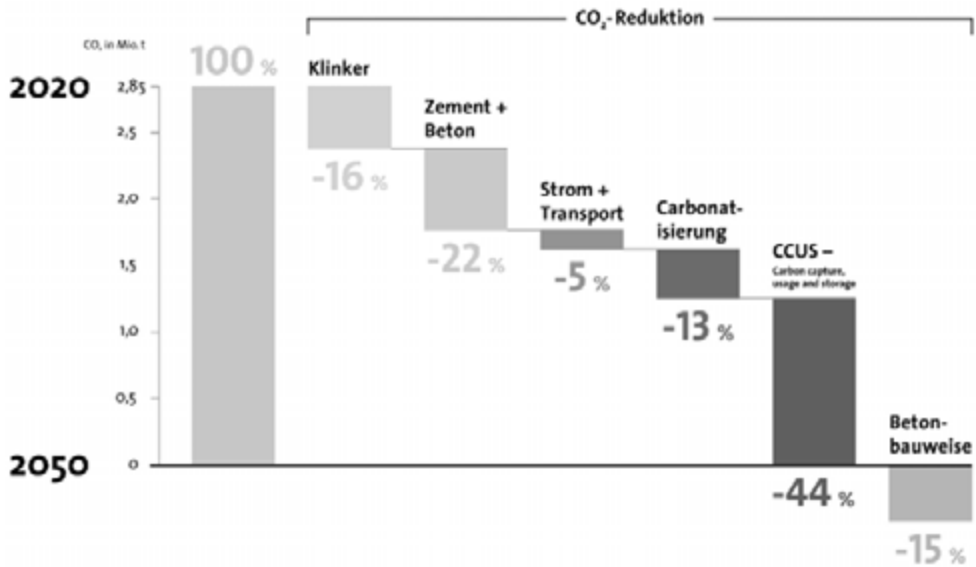


Abb. 1: CO₂-Reduktionspotenzial nach Bereichen

2 MASSNAHMEN ZUR ERREICHUNG EINER CO₂-NEUTRALITÄT

2.1 Brennstoffumstellung

Im Bereich der Klinkerherstellung werden vor allem weitere Brennstoffumstellungen und Energieeffizienzsteigerungen wichtige Beiträge zur Emissionsreduktion liefern. Die Zementindustrie wird dabei im Bereich der alternativen Brennstoffe weiterhin ein wichtiger Partner der Kreislaufwirtschaft sein. Darüber hinaus werden als zukünftige Energieformen Wasserstoff, erneuerbare Gase und elektrischer Strom zur Wärmebereitstellung eingesetzt. In diesem Zusammenhang wird prognostiziert, dass für die erforderliche Wärmebereitstellung rund 10.000 t Wasserstoff pro Jahr als Ersatz für bisherige konventionelle Brennstoffe eingesetzt werden können.

Die Roadmap geht davon aus, dass hierfür die technischen und wirtschaftlichen Hürden bewältigt werden können. Seitens der Politik müssen dafür der Ausbau und die Versorgung mit erneuerbarem Strom forciert sowie CO₂-neutral hergestellter Wasserstoff und grünes Gas in ausreichenden Mengen zur Verfügung gestellt werden.

2.2 Alternative Rohstoffe und neue Klinker

Begleitet werden die bisherigen Maßnahmen durch die Fortführung des Einsatzes alternativer Rohstoffe. Die österreichische Zementindustrie weist diesbezüglich mit 15 % im europäischen Vergleich bereits eine sehr hohen Einsatzquote der alternativen Rohstoffe am Rohmehl auf (European Cement Research Academy, in publication). Im untergeordneten Ausmaß wird zudem erwartet, dass neue Klinkerrezepturen etabliert werden können. Hier wird angenommen, dass neue Klinker den bisherigen Portlandzementklinker bis 2050 zu 5 % ersetzen werden können.

2.3 Neue Zemente, Zumahlstoffe und Mahlkonzepte

Der CO₂-Fußabdruck von Zementen hängt überwiegend vom Klinkeranteil der jeweiligen Zementsorten ab. Er wird durch den Einsatz diverser Zumahlstoffe reduziert. Vor allem die Entwicklung neuer, klimafitter Zemente der Sorten CEM II/C und mittelfristig auch CEM VI soll dazu beitragen, den durchschnittlichen Klinkeranteil im Portfolio bereits bis zum Jahr 2040 von 70 % auf

52 % zu reduzieren (vgl. Abb. 2). Die VÖZ forscht gemeinsam mit der Smart Minerals GmbH an der Entwicklung CO₂-effizienter Zementsorten und bereitet ihre Markteinführung vor.

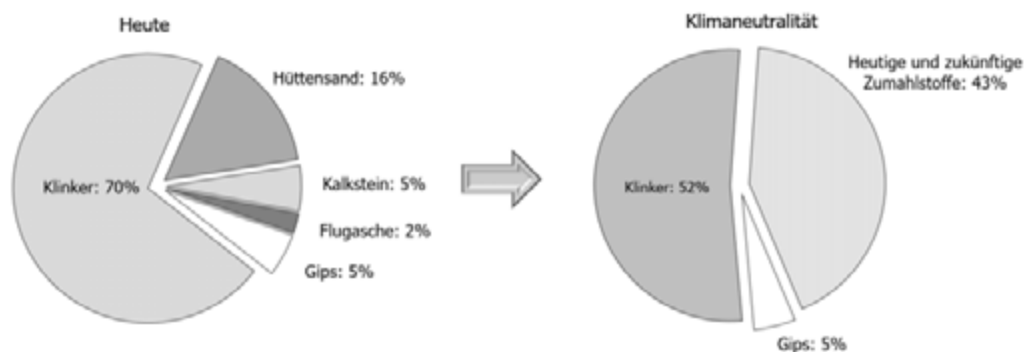


Abb. 2: Zusammensetzung der Zemente – heute und in Zukunft

Seitens der Politik stellt hierbei die Schaffung von Märkten für CO₂-effiziente, klimafitte Zemente, z.B. über gemeinschaftliche Pilotprojekte und ein nachhaltiges Beschaffungswesen durch öffentliche Auftraggeber, wichtige Handlungsfelder dar.

Im Zusammenhang mit der Reduktion der energieintensiven Klinkerkomponente im Zement kommt der Optimierung selektiver Mahlprozesse mit einer optimierten Mahlung einzelner Zementbestandteile zur Sicherstellung der Leistungsfähigkeit von Zement eine immer höhere Bedeutung zu. Im Bereich der Zumahlstoffe reduziert das Auslaufen der Kohleverstromung den Anfall von Flugasche, die mittelfristige Dekarbonisierung der Stahlerzeugung wird zu Veränderungen bei der Hochofenschlacke in puncto Menge und Qualität führen. Dieser Wegfall und die weitere Reduktion des Klinkeranteils erfordern die Entwicklung neuer Zementsorten mit gänzlich neuen Zumahlstoffen, so etwa mit getemperten Tonen. Diese sind weltweit in ausreichenden Mengen vorhanden und können unter geeigneten Bedingungen bis zu 50 % des Zementklinkers ersetzen. Die VÖZ forscht mit ihren Mitgliedsunternehmen an der Entwicklung praxistauglicher Zementmischungen mit getemperten Tonen aus heimischen Lagerstätten.

2.4 Elektrischer Strom und Transport

Im Bereich der Erzeugung von elektrischem Strom geht die Roadmap in Anlehnung an das aktuelle Übereinkommen der österreichischen Bundesregierung davon aus, dass elektrischer Strom ab 2030 CO₂-neutral zur Verfügung steht. Zu beachten ist dabei, dass die Dekarbonisierung von Zement nur unter Einsatz von zusätzlicher Energie möglich sein wird. Die Roadmap geht in diesem Zusammenhang von einer Verdreifachung des bisherigen Strombedarfes aus (vgl. Abb. 3). Dies ist auf den Bedarf von elektrischem Strom für die feinere Mahlung von Zement und seiner Bestandteile, für den Betrieb von Anlagen zur Abtrennung von CO₂ aus dem Rauchgasstrom des Zementwerkes und auf den Einsatz von Strom als einen der zukünftigen Energieträger zur Bereitstellung der benötigten Temperaturen für die Klinkerproduktion zurückzuführen.

Die Versorgung mit ausreichenden Mengen an erneuerbaren Energien ist eine kritische Größe und Voraussetzung für das Gelingen der Transformation des Zementsektors in Richtung CO₂-Neutralität. Sie muss daher von Seiten der Politik sichergestellt werden.

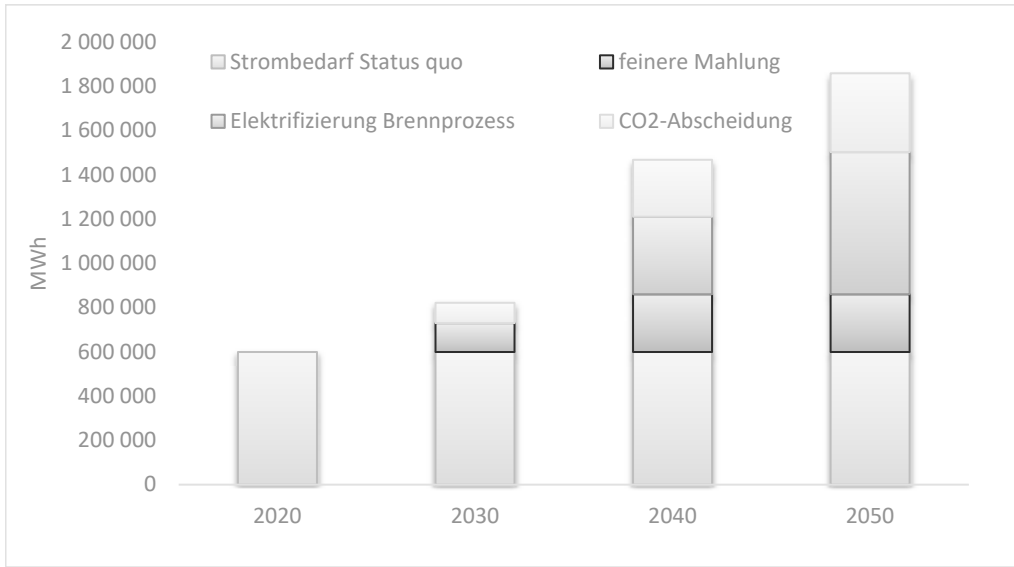


Abb. 3: Entwicklung des elektrischen Strombedarfes

Für den Transport der Einsatzstoffe und Produkte wird vorausgesetzt, dass kohlenstoffneutrale Antriebe für die Transportfahrzeuge entwickelt und marktfähig werden. Beispiele hierfür können Elektroantriebe, die Umstellung auf synthetische Kraftstoffe oder auch Wasserstoff sein. Dies gilt insbesondere für Schwerlastfahrzeuge.

2.5 Carbonatisierung

Bei der Carbonatisierung handelt es sich um die natürliche Fähigkeit von zementgebundenen Baustoffen, CO_2 aus der Atmosphäre aufzunehmen und dauerhaft zu speichern. Dementsprechend wird der Funktion von Beton, Mörtel etc. als CO_2 -Senke eine wichtige Bedeutung in der Roadmap zugemessen. Neben der natürlichen Carbonatisierung von Betonbauwerken in der Nutzungsphase betrachtet die Roadmap zudem die Carbonatisierung von Betonbruch in der Recyclingphase sowie die forcierte Carbonatisierung von Betonbruch mit Ofenabgas im Zementwerk. Dabei stellt die Rücklaufquote von Betonbruch und Baurestmassen einen wichtigen Faktor dar. Dem Potenzial der Carbonatisierung liegt zugrunde, dass die Rücklaufquote bis ins Jahr 2050 von heute 10 % auf 25 % steigt.

Das Intergovernmental Panel on Climate Change hat die Carbonatisierung in seinem jüngsten Sachstandsbericht aufgenommen und quantifiziert. Die Anerkennung des Stellenwertes der Carbonatisierung in den Regelwerken zur Treibhausgasbilanzierung, sowie die Verstärkung der Kreislaufwirtschaft von Bauprodukten und die Ermöglichung der Carbonatisierung von Beton im Rahmen des Recyclings, sodass Beton noch intensiver als CO_2 -Senke genutzt werden kann, stellen somit wichtige politische Handlungsfelder dar. Im Zuge der Roadmap wird spätestens für 2030 die Anerkennung der Carbonatisierung seitens der Politik erwartet.

2.6 Abscheidung und Verwertung bzw. Speicherung von CO_2

Die vollständige Dekarbonisierung kann schließlich mit sogenannten CCUS-Technologien erreicht werden. Im Zuge dieser Technologie werden CO_2 -Emissionen aus dem Zementherstellungsprozess abgetrennt und gespeichert oder zu Produkten weiterverarbeitet. Mit dieser Technologie werden neben fossilen auch biogene Emissionen abgetrennt, welche zuvor in Form von Biomasse aus der Atmosphäre entzogen wurden. Dementsprechend bietet diese Technologie über die Reduktion fossiler Emissionen hinausgehend zudem auch das Potential für negative Emissionen.

Für die Abscheidung der CO₂-Emissionen aus dem Rauchgasstrom eines Zementwerks kommen verschiedene Technologien in Frage. Hierbei weist derzeit vor allem die chemische Absorption mittels Aminen einen fortgeschrittenen technologischen Reifegrad auf. Weitere Abscheidetechnologien wie der Einsatz der Oxyfuel-Technologie, der Carbonate-Looping-Technologie oder der Membrantechnologie werden derzeit erforscht.

Die Schaffung von CO₂-Stoffkreisläufen ist dabei ein wesentlicher Aspekt, der in einer zirkulären Wirtschaft berücksichtigt werden muss. Die Nutzung von abgeschiedenem CO₂ bietet eine Option, den Ausstoß von Prozessemissionen aus industriellen Quellen zu verringern und Kohlenstoffkreisläufe zu schließen. Kohlendioxid dient dabei gemeinsam mit grünem Wasserstoff als Rohstoff für die Herstellung von chemischen Produkten, beispielsweise Kunststoffen, und von synthetischen Brenn- und Treibstoffen. Die Zementindustrie und die chemische Industrie wie auch die Abfallwirtschaft nehmen eine Schlüsselrolle bei der Transformation zu einer „All-Circular Industrial Carbon Economy“ ein.

Sektorübergreifende Wertschöpfungskette für Klimaneutralität

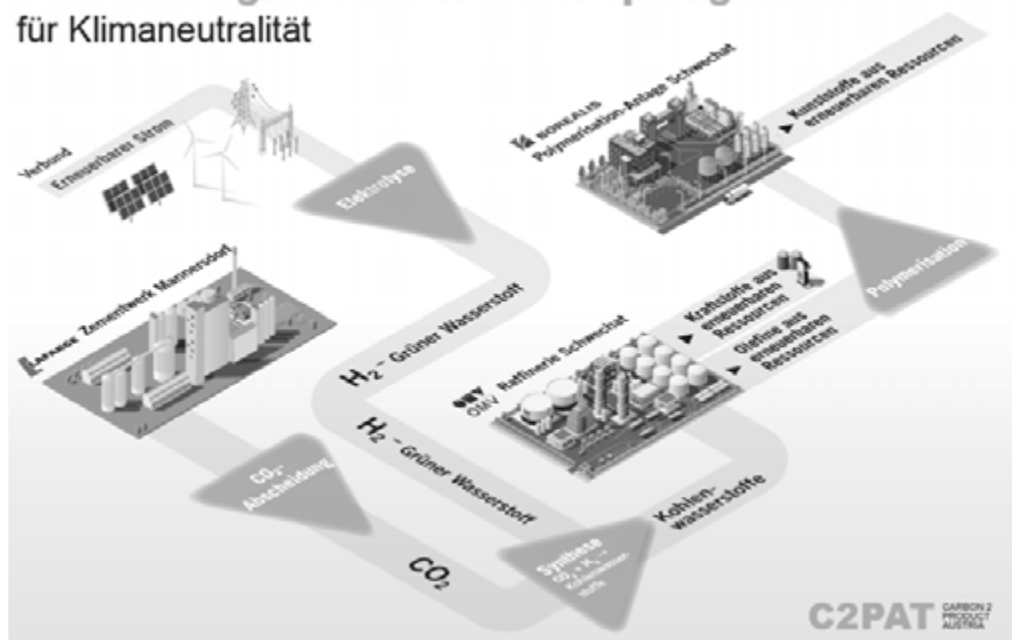


Abb. 4: Prozessgrafik für Carbon-2-Product-Austria

Als vielversprechendes Projekt in diesem Zusammenhang gilt das Projekt Carbon-2-Product-Austria (C2PAT), in dessen Rahmen CO₂ aus dem Zementwerk Mannersdorf unter Verwendung von erneuerbar hergestelltem Wasserstoff in einem aufwendigen Prozess zu Kunststoffen veredelt wird (vgl. Abb. 4 sowie Lafarge Perlmöoser GmbH 2020). C2PAT könnte hierbei bereits vor 2030 eine international entscheidende Vorzeigefunktion einnehmen. In den Folgejahren sollen die Beiträge der Abscheidetechnologien kontinuierlich gesteigert werden, sodass die CO₂-Neutralität entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton bis 2050 erreicht wird.

Wichtige Handlungsfelder der Politik betreffen in diesem Bereich die Ermöglichung und Förderung von Pilotprojekten, die Skalierung und Ausrollung der Technologien zur CO₂-Abscheidung aus dem Rauchgasstrom der Zementwerke sowie die Errichtung der für den CO₂-Transport benötigten Infrastruktur.

2.7 Betonbauweise

Weitere Benefits identifiziert die Roadmap in der Bauweise mit dem Baustoff Beton, denn Beton trägt mehrfach zur Umsetzung der Energiewende bei: Durch die Nutzung der thermischen Speicherkapazität von Beton kann der Anteil erneuerbarer Energie für das Heizen und Kühlen von Gebäuden erheblich gesteigert werden. Im Verkehrssektor führt die hohe Belastbarkeit von Betonstraßen durch die Reduktion des Rollwiderstandes insbesondere von schweren Fahrzeugen zu einer Steigerung der Treibstoffeffizienz. Darüber hinaus weist Beton durch seine vergleichsweise hellere Oberfläche eine höhere Albedo auf. Dadurch werden Sonnenstrahlen vermehrt reflektiert und der Planet Erde weniger aufgeheizt – ein Effekt, der in Bezug auf den Klimawandel von entscheidender Bedeutung sein kann. Diese Vorteile der Betonbauweise sollten seitens der Politik bei der Beschleunigung der Energietransformation in den Sektoren Bau, Verkehr und Straße bestmöglich ausgeschöpft werden.

3 FORDERUNGEN AN DIE GESELLSCHAFT UND AN DIE POLITIK

Das Ziel der CO₂-Neutralität kann nur dann erreicht werden, wenn die dafür erforderlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden. Die Gesellschaft und die Politik sind daher dazu aufgerufen, die dargelegte Transformation zu unterstützen, dazu gehören insbesondere:

- Rechts- und Planungssicherheit für Investitionen durch einen effektiven Schutz vor Ökodumping-Importen
- Ermöglichung der Ausrollung von Technologien zur CO₂-Abscheidung und Nutzung bzw. Speicherung (CCUS)
- Schaffung der für den Transport von CO₂ und Wasserstoff nötigen Infrastruktur (Bahn, Lkw, Schiff, Pipeline)
- Ausreichende und verlässliche Versorgung mit erneuerbaren Energien (insbesondere Strom)
- Investitions- und Betriebskostenförderungen von Pilotanlagen im industriellen Maßstab
- Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit unserer Industrie
- Schaffung von Märkten für CO₂-effiziente, klimafitte und nachhaltige Zemente, wozu auch ein diese Vorzüge würdigendes Beschaffungswesen durch öffentliche Auftraggeber gehört
- Mitberücksichtigung der Carbonatisierung als eine der wesentlichen und dauerhaften CO₂-Senken und ihre entsprechende Einbeziehung in Regelwerke zur Treibhausgasbilanzierung
- Anerkennung des Beitrags der Betonbauweise zur Beschleunigung der Energiewende

LITERATUR

European Cement Research Academy (in publication) Status and prospects of Alternative Raw Materials in the European Cement Sector.

Lafarge Perlmooser GmbH (2020, 20. Juni) Carbon2ProductAustria. Von <https://www.lafarge.at/nachhaltigkeit/c2pat> abgerufen.

Spaun, S. (2022, 12. Mai) Roadmap zur CO₂-Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050. (VÖZ, Hrsg.) Von https://www.zement.at/downloads/downloads_2022/Roadmap_VOEZ_bis_2050.pdf abgerufen.

World Meteorological Organization (2021, 25. Oktober) Greenhouse Gas Bulletin: Another Year Another Record. Von <https://public.wmo.int/en/media/press-release/greenhouse-gas-bulletin-another-year-another-record> abgerufen.

Performance of European biogas plants towards methane emissions

V. Wechselberger¹, M. Hrad¹ & M. Huber-Humer¹

¹) University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Department of Water-Atmosphere-Environment, Institute of Waste Management, Vienna, Austria

ABSTRACT: As flexible renewable energy carriers, biogas and biomethane can play a crucial role in a fossil-fuel-free energy mix, provided that process-related methane (CH₄) emissions are minimized. As there is still a lack of representative emission data, this study aimed to provide CH₄ emission factors (EFs) of various European biogas plants. In total, 36 anaerobic digestion (AD) plants in Austria, Germany, Sweden and Switzerland were investigated (including agricultural, biowaste and wastewater treating facilities). For the first time, harmonized ground-based remote sensing and on-site methods were used to determine CH₄ losses from overall biogas plants as well as from individual emission sources. Depending on the implemented technologies (for substrate receiving and storage, digestate storage, biogas utilization) as well as on the occurrence of unintended leakages, plant average CH₄ losses ranged from 0.4 to 11.3 % of the total CH₄ production. Individual on-site sources released between <0.01 and 5.6%. Both, remote sensing and on-site measurements confirmed the potential for emission reduction through the implementation of low-emission technologies in combination with regular leak detection.

1 INTRODUCTION

Biogas or biomethane, resulting from the biological treatment of organic matter by anaerobic digestion, is a renewable energy source used for electricity production, heating and in transportation and can substitute fossil gas. Therefore, biogas production is described as a sustainable strategy for reducing anthropogenic greenhouse gases (GHG). However, the positive environmental impact depends in particular on emissions that might occur within the biogas production and utilization chain. Although numerous scientific studies investigated CH₄ emissions from biogas plants, there is still a lack of reliable and representative emission data. As stated in the United Nations Framework Convention on Climate Change, the member countries are obliged to report their national GHG inventories according to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) guidelines. This also requires high quality and comparable EF estimates from full-scale biogas plants. In addition, to improve the database for national emission inventories as well as to evaluate mitigation strategies, accurate and comparable methods quantifying GHG emissions (especially CH₄ emissions) from biogas plants are required.

The main objective of the research project “EvEmBi – Evaluation and reduction of methane emissions from different European biogas plant concepts” (2018–2021, funded within the 11th ERA-NET bioenergy call) was to provide comparable CH₄ EFs for various biogas plant technologies - for more accurate EF estimates as well as for the evaluation of emission reduction measures. For the first time, a harmonized measurement approach (Clauß et al. 2019) was used to determine overall plant emissions (by ground-based remote sensing methods) as well as component specific EFs (by on-site methods). In total, 36 biogas plants in Austria, Germany, Sweden and Switzerland (including agricultural, biowaste and wastewater treating facilities) were investigated by eight measurement teams.

2 MATERIAL AND METHODS

In the scope of one- to three-days-measurement-campaigns, eight teams investigated 36 biogas plants in Austria, Germany, Sweden and Switzerland. The plants differed in terms of feedstock (energy crops, manure, biowaste, wastewater sludge) and technologies used for substrate receiving and storage, biogas production and biogas utilization. The latter included combined heat and power plants (CHP) as well as various biogas upgrading technologies. At 19 of the AD plants, overall CH₄ emissions were quantified by ground-based remote sensing methods – by the tracer gas dispersion method (TDM) and inverse dispersion modelling (IDM). In addition, individual

emission sources were analyzed at 33 biogas plants using an on-site approach. For that, different methods had to be applied depending on the source configuration (exhaust pipe, not-gastight tank, ventilation grid, etc.). A detailed description of both measurement approaches can be found in Clauß et al. (2019). More information on the investigated biogas plants is provided in Wechselberger et al. (submitted).

3 RESULTS

Plant average CH₄ EFs from all member countries determined with the remote sensing approach (19 biogas plants) ranged from 0.4 to 11.3 % of the total CH₄ production. Comparably low emissions (median EF=0.9%) were emitted by four plants with gastight digestate storage tanks and low-emission technologies for biogas utilization, including exhaust gas treatment (EGT) and biogas upgrading by chemical scrubbers. Furthermore, no major leakages were detected at these plants. On-site measurements at 33 biogas plants confirmed differences in CH₄ EFs depending on the used technology, especially for biogas utilization and digestate storage (Wechselberger, submitted): With CHP units, 1.6 % (median of 21 gas engines) and 3.0 % (three pilot injection units) of the input CH₄ was lost via the off-gas. In comparison, the investigated biogas upgrading technologies (four chemical scrubbers, three units with EGT and two water scrubbers) showed median CH₄ slips of <0.1, 0.1 and 2.9 %. Methane emissions from not-gastight digestate storage tanks, affected by storage temperature and volume (cp. e.g. Vergote et al. (2020)), ranged between <0.1 and 5.6 % (n=8) during the measurement campaigns. Individual leakages (n=38) released between 0.0 and 2.1% (median 0.1 %) of the produced CH₄.

4 CONCLUSION

Both, remote sensing and on-site measurements confirmed the potential for emission reduction through implementing low-emission technologies (e.g. gastight digestate storage, biogas upgrading by chemical scrubbing and EGT) as well as through regular leak detection. Using the measured EFs will increase the accuracy of emission reporting. Nonetheless, additional measurements are needed for individual technologies (especially for biogas upgrading). Furthermore, to estimate variations in emissions, additional assessments on the impact of process disturbances and optimization are required.

REFERENCES

- Clauß, T., Reinelt, T., Liebetrau, J., Vesenmaier, A., Reiser, M., Flandorfer, C., Stenzel, S., Piringer, M., Fredenslund, A.M., Scheutz, C., Hrad, M., Ottner, R., Huber-Humer, M., Innocenti, F., Holmgren, M., Yngvesson, J. (2019) *Recommendations for reliable methane emission rate quantification at biogas plants*. DBFZ-Report No. 33. Leipzig, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ).
- Vergote, T.L.I., Bodé, S., De Dobbelaere, A.E. J., Buysse, J., Meers, E., Volcke, E.I.P. (2020) *Monitoring methane and nitrous oxide emissions from digestate storage following manure mono-digestion*. Biosystems engineering 196: 171. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.011>.
- Wechselberger, V., Reinelt, T., Yngvesson, J., Scharfy, D., Scheutz, C., Hrad, M. (submitted): *Methane losses from different biogas plant technologies*. Submitted to Waste Management in May 2022

Mechanical short-term and long-term properties of PP recycle blends

J. Hinczica¹, J. Geier¹, U. Kirschnick², C. Holzer³, A. Frank⁴ & G. Pinter⁵

¹ Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, Austria

² Montanuniversitaet Leoben, Institute of Processing of Composites, Leoben, Austria

³ Montanuniversitaet Leoben, Institute of Polymer Processing, Leoben, Austria

⁴ Staatliche VA-tgm, Kunststoff- und Umwelttechnik, Vienna, Austria

⁵ Montanuniversitaet Leoben, Institute of Polymer Engineering and Science, Leoben, Austria

ABSTRACT: The amount of recycled material in new products should be increased in the next few years. By adding virgin material, the mechanical properties of the pure recycle can be improved. In this work, 10 % and 40 % post-consumer recycle was added to a virgin material and analyzed. Both raw materials were also tested. The short-term as well as the long-term properties decrease with increasing recycle content. The recycle has a higher influence on the young's modulus, yield stress and slow crack growth resistance than on the notched impact toughness.

1 INTRODUCTION AND MOTIVATION

Recycling of polymers recently gained increasing attention among the scientific, industrial, and commercial community as well as the wider public. On one hand it is due to the materials' economic and technical relevance and on the other hand the environmental and social challenges associated with waste perspective of plastic products (Aumate, Rudolph, & Sarmadi, 2019; Rajendran, et al., 2013; Reichel, Schienmakere, & Gillabel, 2016).

Aside from polyethylene (PE) with a market share of 19.4%, polypropylene (PP) is the most common polymer. Most PP products are used in packaging (~40 %) followed by building & construction (~20 %) and automotive (~10 %). In the building and construction sector the operational lifetime is more than 50 years, therefore the long structural lifetimes are required. In Europe, almost 30 Mio. t of post-consumer waste was collected, after sorting 32 % of the post-consumer waste is sent to recycler. Only 13 % of the collected waste is used in new products, the highest amount of 46 % is the building & construction sector (PlasticsEurope AISBL, 2019). Most recycles are therefore used in products that require a long structural lifetime. By adding virgin material, the mechanical properties of the recycle can be improved and a higher amount of recycles can be processed into new products (Utracki & Wilkie, 2014).

2 EXPERIMENTAL APPROACH

Two materials, a virgin material vPP and a post-consumer recycle rPP are used in this work. Additionally, two blends with different rPP/vPP weight fractions, one with 10 wt% rPP and 90 wt% vPP (rPP-10) and the second with 40 wt% rPP and 60 wt% vPP (rPP-40) are compounded (Tab. 1).

Tab. 1: Weight fraction of the different blends

materials in wt%	vPP	rPP-10	rPP-40	rPP
virgin (vPP)	100	90	60	0
recycle (rPP)	0	10	40	100

For analyzing the short-term and long-term properties as well as the rheological performance different tests are performed. For the short-term properties tensile tests and Charpy Impact tests are done. The long-term property is characterized by the slow crack growth (SCG) resistance of the material, therefore the well-established Cracked Round Bar (CRB) test was used.

3 RESULTS

The virgin material has a 30% lower MFR compared to the recycle, and by blending this virgin material with the recycle, the MFR increases continuously. The short-time properties such as E-modulus, yield strength, elongation at break and notched impact toughness are decreasing with increasing the recycle content. The notched impact toughness decreases the most with more than 40 % compared with the E-modulus and the yield strength, which are decreasing 25 % and 15%. The recycle has no significant influence on the notched impact toughness until a recycle content of 40 %. The resistance to SCG was determined with the CRB test. By increasing the recycle content the number of cycles until failure decreases, hence the SCG resistance decreases. Brittle failure is the dominant failure mechanism in this test. The SEM analyzes images the indicative fibrils. The size of fibrils changes with increasing recycle content due to the higher amount of impurities.

4 CONCLUSION

Different material properties are influenced by blending ratio of virgin material and post-consumer recycle, such as MFR, Young's modulus, yield stress and SCG resistance. Blending virgin PP to recycle PP significantly improved the SCG resistance, which is a crucial material property in structural long-term application. The short-term properties are decreasing to the values of the pure recycle rPP. Results are only valid for the investigated virgin material, recycle and their blends. For the development of general blending rules, further investigations with more material combinations must be investigated.

REFERENCES

- Aumate, C., Rudolph, N., & Sarmadi, M. (2019). Recycling of Polypropylene/Polyethylene Blends: Effect of Chain Structure on the Crystallization Behaviors. *Polymers* 11. Von <https://doi.org/10.3390/polym11091456> abgerufen
- PlasticsEurope AISBL. (2019). The Circular Economy for Plastics: A European Overview.
- Rajendran, S., Hodzic, A., Scelsi, L., Hayes, S., Soutis, C., AlMa'adeed, M., & Kahraman, R. (2013). Plastics recycling: insights into life cycle impact assessment methods. *Plastics*. Von <https://doi.org/10.1179/1743289812Y.0000000002> abgerufen
- Reichel, A., Schienmakere, M. d., & Gillabel, J. (2016). Circular economy in Europe: developing the knowledge base. *Publications Office*.
- Utracki, L., & Wilkie, C. (2014). *Polymer blends handbook*. Dordrecht: Springer.

Zn Entfernung aus metallurgischen Stäuben mit schwefeloxidierenden Bakterien

S. Thallner¹, A. Sasiain Conde¹, S.A. Haneschläger¹, J. Birklbauer², S. Spiess¹ & M. Haberbauer¹

¹) K1-MET GmbH, Linz, Österreich

²) voestalpine Stahl Linz GmbH, Linz, Österreich

KURZFASSUNG: Bei der Stahlproduktion fallen metallurgische Stäube an, die aufgrund von Metallverunreinigungen wie Zink (Zn) nicht in den Stahlwerksprozess rückgeführt werden können. Für eine erfolgreiche Rückführung wäre es von Vorteil, wenn der Eisengehalt (Fe) im Reststoff möglichst hoch bleibt, da er für die Roheisenproduktion benötigt wird, aber den Zinkgehalt so weit wie möglich zu senken. Ziel des Projektes ist es daher, mit schwefeloxidierenden Bakterien Zn aus dem Gießhallenstaub herauszulösen, während das Fe im Rückstand gehalten wird. Gleichzeitig ist ein hoher Anteil an ungenutztem Schwefel im Rückstand unerwünscht, da er die Emissionen (wie SO₂ und H₂S) während des Sinterprozesses erhöht. Vorversuche in 250 mL Schüttelkolben haben gezeigt, dass eine Laugung mit *Acidithiobacillus ferrooxidans* und reduzierte Schwefelkonzentrationen von 5 und 7,5 g/L statt 10 g/L am besten geeignet sind, das Projektziel zu erreichen.

1 EINLEITUNG

Zinkhaltige Stahlwerksstäube, wie sie bei der Eisen- und Stahlproduktion über die Route Hochofen-Konverter anfallen, können als bedeutende Sekundärrohstoffe angesehen werden. Gegenwärtig zählen zwei Verfahren zum Stand der Technik bezüglich der Abtrennung und Gewinnung von Zink aus Stahlwerksstäuben, nämlich pyrometallurgische und hydrometallurgische Verfahren. Einige Prozessrouten erzeugen jedoch wiederum nicht verwertbare Sekundärabfälle und können teilweise nur unter hohen Energieaufwand betrieben werden und sind daher ökologisch gesehen nicht als nachhaltig einzustufen. Ein globales Umdenken in Richtung Kreislaufwirtschaft, aber auch sinkende Deponiekapazitäten und erhebliche Entsorgungskosten führen zu steigendem Interesse an innovativen Aufarbeitungskonzepten für zinkhaltige Stahlwerksstäube.

Ein umweltfreundlicher und energieeffizienter Ansatz ist hier die biologische Metallrückgewinnung aus Stäuben, was für das Herauslösen von Zink mittels Schwefelsäure geeignet ist (Kukurugya et al. 2015, Asadi Zeydabadi et al. 1997). Durch diesen biotechnologischen Ansatz kann der Energieaufwand verringert und eine sehr gute Laugungsleistung erzielt werden (Selvi & Aruliah 2018, Trung et al. 2011).

2 BIOLEACHING

Bioleaching ist ein natürlich vorkommender, mikrobieller Prozess, der die Umwandlung von nicht-löslichen Metallen in ihre lösliche Form unter katalytischer Einwirkung von speziellen Mikroorganismen beschreibt. Mitte des 20. Jahrhunderts erkannte man den Zusammenhang zwischen der Metall-Mobilisation und den vorhandenen Mikroorganismen in sauren Grubenabwässern. Die Anwendung von Bioleaching als biotechnologischer Prozess konzentrierte sich zunächst hauptsächlich auf die Laugung von sulfidischen Schwacherzen (Bosecker 1997). Die Einsatzgebiete wurden jedoch zunehmend erweitert und weckten das Interesse von Industrie und Forschung für die Rückgewinnung von wertvollen Metallen aus komplexen Abfallstoffen (Lee & Pandey 2012).

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 Mikroorganismus

Die Versuche wurden mit *Acidithiobacillus ferrooxidans* (DSM 583) durchgeführt und ein Medium in Anlehnung an (Wakeman et al 2008) verwendet (in mg/L: 150 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10 \text{ H}_2\text{O}$, 450 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 50 KCl, 500 $\text{MgSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$, 50 KH_2PO_4 und 14 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$). Dem Medium wurde zusätzlich 5 bzw. 7,5 g/L Schwefel zugegeben, da Vorversuche in Schüttelkolben gezeigt haben, dass diese reduzierte Schwefelkonzentration ausreichend ist Zink zu laugen. *A. ferrooxidans* ist ein mesophiles, chemolithoautotrophes Bakterium, welches Kohlenstoff aus Kohlendioxid assimilieren kann und seine Energie aus der Oxidation anorganischer Stoffe (Schwefel- und Eisenverbindungen) gewinnt. Es ist das am häufigsten eingesetzte Bioleaching-Bakterium und wird für die Laugung von unterschiedlichen Substraten (Tailings, Elektronikschrott, Altbatterien und Müllverbrennungaschen) eingesetzt (Jerez 2011).

3.2 Bioleaching im Rührkessel

Für die Versuche wurden zwei Rührkessel mit jeweils 3 L Arbeitsvolumen aufgebaut. Über eine automatisierte Steuereinheit wurden die Temperatur, der pH-Wert und das Redox-Potential aufgezeichnet. Für die Vorkultivierung wurden 2,7 L steriles Medium inklusive elementaren Schwefel und 300 mL Inokulum (Bakterienkultur) für eine Woche inkubiert (Abb. 1). Die Vorkultivierung dient dazu, die Bakterienanzahl zu steigern und den pH-Wert, aufgrund der biologischen Säureproduktion, zu senken.

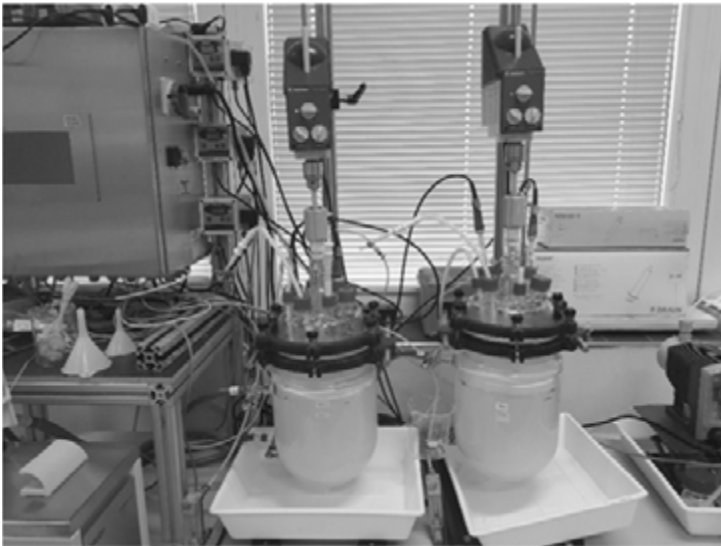


Abb. 1: Die zwei Rührkessel (R1 und R2) nach einwöchiger Vorkultivierung

Die Versuchsbedingungen mit Temperatur 30 °C, Rührung 160 rpm, und Belüftung 75 L/h galten sowohl für die Vorkultivierung als auch für den eigentlichen Bioleachingprozess.

Nach der einwöchigen Vorkultivierung wurden 10 g/L Gießhallenstaub (GHS) zugegeben. Vor und nach der Substratzugabe wurde eine Flüssigprobe genommen, sterilfiltriert und bis zur Analyse im Kühlschrank aufbewahrt. Weiters wurde der pH-Wert überprüft und die bakterielle Aktivität im Mikroskop beurteilt. Weitere Probennahmen erfolgten jeweils nach einer und zwei Wochen nach Substratzugabe. Danach erfolgte die Erhöhung der Substrateinsatzmenge. Dazu wurden zwei Drittel (semi-kontinuierliche Betriebsweise) des Rührkesselinhalts herausgepumpt und durch 2 L steriles Medium und Schwefel (5 bzw. 7,5 g/L) ersetzt. Aliquot wurde die benötigte Gießhallenstaubmenge zugegeben. Die Erhöhung der Substratkonzentration fand in folgen-

den Schritten statt: 10 – 25 – 50 – 75 –100 und 125 g/L. Die Messung der Flüssigproben erfolgte mittels ICP-OES.

4 ERGEBNISSE

Die Erhöhung der Substratkonzentration hatte folgende Auswirkungen auf die Laugungseffizienz: Im ersten Reaktor (R1) mit 5 g/L S sank die Laugungseffizienz von Eisen von 11 % (bei 10 g/L GHS) auf unter 4 % (bei 125 g/L GHS) und im zweiten Reaktor (R2) mit 7,5 g/L S von 15 % (bei 10 g/L GHS) auf 6 % (bei 125 g/L). Das gleiche Verhalten konnte für Zink beobachtet werden. In R1 sank die Auslaugungseffizienz von 56 auf 40 % und in R2 von 63 auf 48 % (Abb. 2 und Abb.3).

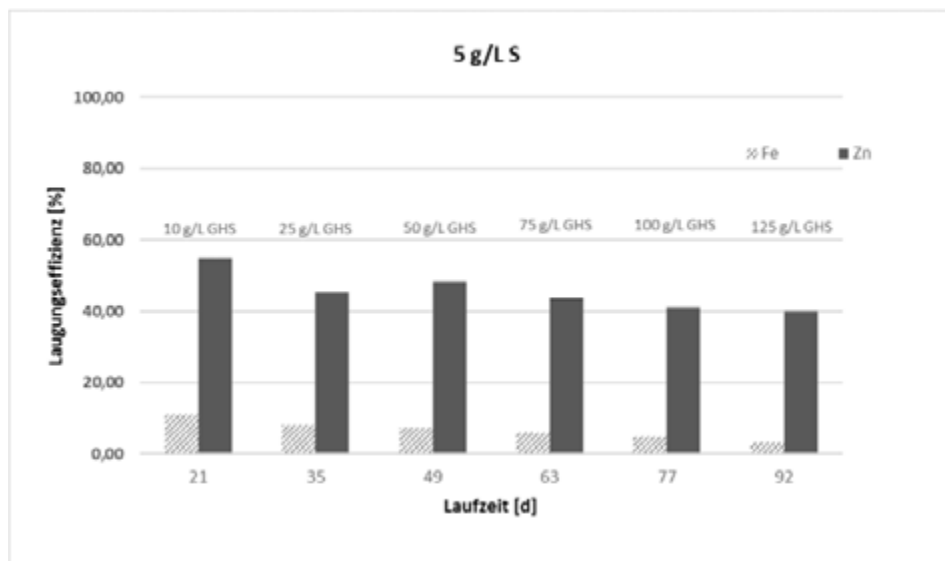


Abb. 2: Laugungseffizienzen für Eisen und Zink im Reaktor mit 5 g/L S für die unterschiedlichen Substratzugaben

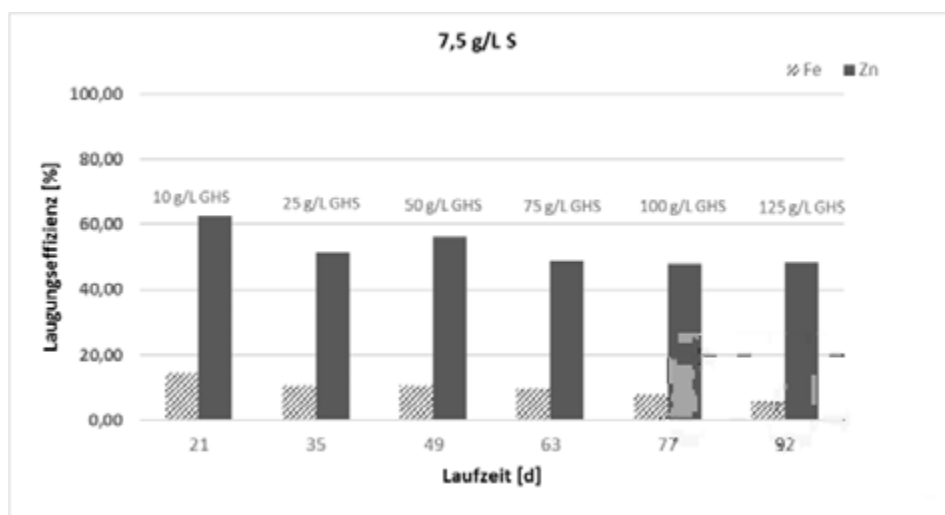


Abb. 3: Laugungseffizienzen für Eisen und Zink im Reaktor mit 7,5 g/L S für die unterschiedlichen Substratzugaben

Um zu klären, ob der zugegebene Schwefel ein limitierender Faktor für das Bioleaching sein könnte, wurde nach den 14 Tagen Versuchsdauer auch der gelaugte Feststoff analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass ab einer Einsatzmenge von 25 g/L GHS und Zugabe von 5 g/L S der gesamte zugegebene Schwefel verbraucht wurde und weniger Schwefel im gelaugten Feststoff vorhanden war als im Ausgangssubstrat. Bei Zugabe von 7,5 g/l S und einer Einsatzmenge bis 50 g/L GHS war gerade noch genügend Schwefel vorhanden.

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die Laugungseffizienzen von den zwei Rührkesseln sanken verschieden, abhängig von der Schwefelzugabe. Bei einer Einsatzmenge von 125 g/L und Zugabe von 5 g/L S wurden nur 4 % Eisen gelöst, was positiv für einen eisenreichen Sekundärrohstoff ist, aber es wurde auch nur mehr 40 % Zink gelaugt. Dagegen konnten bei Zugabe von 7,5 g/L und gleicher Einsatzmenge noch 48 % Zink und 6% Eisen gelaugt werden.

Elementarer Schwefel scheint wahrscheinlich ein limitierender Faktor zu sein, um höhere Laugungseffizienzen zu erzielen. Bei einer Schwefelzugabe von 5 g/L wurde schon bei einer Einsatzmenge von 25 g/L der gesamte Schwefel verbraucht.

LITERATUR

- Asadi Zeydabadi, B., Mowla, D., Shariat, M. H., Fathi Kalajahi, J. (1997) *Zinc recovery from blast furnace flue dust*. Hydrometallurgy 47 , S. 113-125.
- Bosecker, K. (1997). *Bioleaching: metal solubilization by microorganisms* FEMS. Microbiology Reviews 20, S. 591-604.
- Erüst, C., Akcil, A., Gahan, C., Tuncuk, A., Deveci, H. (2013) *Biohydrometallurgy of secondary metal resources: a potential alternative approach for metal recovery*. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 8, S. 2115-2132.
- Jerez, C. (2011) *Bioleaching and Biomining for the Industrial Recovery of Metals*. Comprehensive Biotechnology 3, C, S. 65-75.
- Kukurugya, F., Vindt, T., Havlik, T. (2015) *Behavior of zinc, iron and calcium from electric arc furnace (EAF) dust in hydrometallurgical processing in sulfuric acid solutions: Thermodynamic and kinetic aspects*. Hydrometallurgy 154, S. 20-32.
- Lee, J.-C. & Pandey, B. (2012) *Bio-processing of solid wastes and secondary resources for metal extraction - A review*. Waste Management 32, S. 3-18.
- Selvi, A., & Aruliah, R. (2018) *A statistical approach of zinc remediation using acidophilic bacterium via an integrated ap-proach of bioleaching enhanced electrokinetic remediation (BEER) technology*. Chemosphere 207, S. 753–763.
- Trung, Z., Kukurugya, F., Takacova, Z., Orac, D. (2011) *Acidic leaching both of zinc and iron from basic oxygen furnace sludge*. J Hazard Mater 192 (3), S. 1100–1107.
- Wakeman, K., Auvinen, H., Johnson, D. (2008) *Microbiological and Geochemical Dynamics in Simulated-Heap Leaching of a Polymetallic Sulfide Ore*. Biotechnology and Bioengineering 101 (4), S. 739-750.

Estimation of Recycling Potential of Multilayer Films in Austria

B. Rutrecht¹ & G. Koinig²

¹) K1-MET GmbH, Area Recycling and Raw Materials, Leoben, Austria

²) Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Management and Waste Processing, Leoben, Austria

ABSTRACT: It is impossible to imagine today's society and economy without plastic and plastic packaging. Worldwide, 368 million tons of plastic were produced in 2019, of which 57.9 million tons in Europe. They account for more than a third of all plastic products in Europe and are particularly conspicuous because of their short lifespan and ubiquitous distribution in the environment worldwide. Regulations on the European level already address this issue. Due to limits of physical properties of single material packaging, multilayer films are on the rise. These complex stacked structures of up to nine thin different layers pose a new challenge to waste management systems, especially when sorting post-consumer plastic packaging. Their share in plastic packaging is still under vivid scientific discussion. The presented research provides evidence that the multilayer film content of the two-dimensional fraction of separately collected plastic packaging is about 24 w-%, or an estimated total of 6 w-% for the overall Austrian separately collected waste stream, respectively.

1 INTRODUCTION

It is impossible to imagine today's society and economy without plastic and plastic packaging is in particular focus. Worldwide, 368 million tons of plastic were produced in 2019, of which 57.9 million tons in the European Union (EU). They account for more than a third of all plastic products in Europe and are particularly conspicuous because of their short lifespan and ubiquitous distribution in the environment worldwide. (Plastic Europe 2020) According to Eurostat, plastic packaging is accountable for 15.4 million tons or 177.4 kg of waste plastic packaging per citizen in 2019 (Eurostat 2021). Hence, the proliferation of plastic in all areas of life has become an increasingly visible issue and its impact on the environment is the subject of heated debate.

In relation to the overall European plastic market of almost 48 million tonnes per year, the annual demand for flexible food packaging, which represents the largest fraction of flexible packaging, plays only a small role in the European plastic consumption. Multilayer films are supposed to have an even lesser share but do have nonetheless a substantial impact on the plastic recycling chain. (Niaounakis 2020) However, despite their little number, multilayer films pose new challenges to waste management systems, especially when it comes to sorting post-consumer plastic packaging, influencing the overall product quality.

1.1 Legal Framework

The European Green Deal and its Action Plan for the Circular Economy (European Commission 2020) the basis for the European Plastics Strategy (European Commission 2018) and the Single Use Plastics Directive (European Union 2019) make reference to this issue of ubiquitous presence of plastic packaging. They promote awareness and reorientation of the European economy to break linear consumption and production patterns towards a more circular oriented society. In the area of plastics and plastic packaging, the main focus is on calling for extended producer responsibility and sustainable product policies. In total, 42.6% of the post-consumer plastic is incinerated for energy recovery, 24.9% is disposed of in landfills and less than one third, 32.5%, is subject to mechanical recycling. Even in Austria, most of the Austrian plastic packaging waste (74%) serves as input for industrial incineration and 25.7% are mechanically recycled (Van Eygen 2018). Incentives for change are a rise of legally binding recycling quotas to 50% until 2025 and 55% until 2030 and a demand for recycled material in new products, to name just a few.

1.2 Multilayer plastic packaging

However, plastic packaging is a high-tech product which, despite its negative image, can contribute positively to a sustainable society. In general, packaging must meet multiple purposes. It aids in the distribution, protects goods from physical harm and environmental effects (contaminants, light, oxygen, odour, moisture), preserves freshness and correct weight, next to providing visually appealing information (Morris 2016) leads to less food waste and reduces greenhouse gas emissions during distribution through an optimal product to packaging ratio (Denkstatt 2017).

Various types of packaging come with good features to fulfil a range of these properties, however, there are limits. Metal cans do have excellent barrier properties yet are heavy and opaque. Packaging made of glass makes the packaged product visible but is prone to UV radiation and mechanical shock. This drives the evolution of rigid packaging to a mix of flexible packaging material, typically made of polyethylene (PE, 44%), biaxially oriented polypropylene (BOPP, 18%), paper (12%) or aluminium (10%). Smaller proportions are taken by cast polypropylene (PP), biaxially oriented polyethylene terephthalate (BOPET), polyvinylchloride (PVC), ethylene vinyl alcohol (EVOH) and a variety of special materials for rare applications. (Nonclercq 2016)

Thought to combine the best set of characteristics of packaging materials, multilayer films are invented. They are characterized by their structure which is a build-up of a stack of variable number of thin layers. The simplest multilayer is made of two distinct layers but more likely is a combination of three or five layers. More complex designs range up to nine layers, providing even more functionality. However, they do not differ much in their structure, because the composition is always subject to the same rules. The innermost layer provides (1) sealing. The middle layers are one or multiple (2) barrier layers to protect from oxygen, carbon dioxide, light or moisture glued together by (3) tie-layers that enable adhesion and protect from de-lamination. Finally, the outermost layer is a (4) structural layer responsible for resistance against rupture or punctuation. Since multilayer film composites are a uniform structure of multiple very thin sheets ranging from 30 μm to 200 μm glued together the task to physically detach the single layers from each other is mechanically unfeasible due to the permanent nature of their joining technology. (Morris 2016)

This, and the on-site plastic sorting techniques at plastic packaging recycling plants pose a significant challenge to plastic recyclers. Common sorting techniques rely on near-infrared detectors, but they are only able to scan the outermost layer of packaging, thus, ignoring the possibility of a multi-layered structure underneath when making sorting decisions. The increasing number of multilayer films in plastic packaging is said to have a significant impact on downstream processes and product quality, however knowledge about the share of multilayer films in post-consumer plastic packaging is still under vivid scientific discussion. The presented research will provide evidence on the share of multilayer films in the Austrian separately collected waste stream, also called yellow bag collection.

2 METHOD

2.1 Hand sorting

Basis of the findings in this paper is a hand sorting analysis of 10.4 kg, respectively $N=842$ objects, of pre-sorted, two-dimensional flexible waste plastic packaging, derived from the yellow bag collection system in Austria, the sample is not representative for any larger population. Every object of the material is visually inspected, identified, weighed and categorised, according to predefined types of packaging and product groups, listed in Tab. 1. Excluded of the survey are objects of a size smaller than 40 mm. This includes bits and shreds of unspecific plastic films or single packaging of sweets. Also excluded is material that is used as wrapping of discarded food or waste coffee caps and misthrow, e.g. metal cans, bottle caps. Additionally, flattened trays made of polyethylene terephthalate (PET) are not part of the survey as they do not match the criterion of being two-dimensional flexible packaging. Due to hygienic reasons, any kind of flexible medical waste plastic packaging is excluded as well.

Tab. 1: Sample categories of the hand sorting analysis

Category 1	Category 2	Example
Primary food packaging	Bakery products	Bread, rolls, pastery
	Coffee	Coffee bags
	Dairy	Sliced cheese, yogurt lids, mozzarella sachets
	Dry food	Rice, noodles, cereal
	Fresh produce	Packaging of various fruits and vegetables
	Frozen food/convenience	Frozen vegetables, convenience food and dough
	Household packaging	Bags with zip fastener, freezing bags, cling film
	Meat	Meat, sausages, cold cuts
	Snack metallised	Salty and sweet snacks with metallic coating
	Snack uncoated	Salty and sweet snacks without metallic coating
Secondary food packaging	Beverages	Wrapping of six-packs
Primary product packaging	Construction/workshop	Cement bags, tools, oil
	Dry pet food	
	Garden	Soil, mulch, bark chips
	Household products	Clothes bag, toner, clothing
	Sanitary products	Wrapping of toilet paper, kitchen roll
	Toys	Lego sachets
	Wet pet food	
Secondary product packaging	Gift wrapping	Wrapping paper, ribbons, cellophane
	Mail order	Mailing bags, air cushion foil, bubble wrap
Bags	Generic bags	Transparent or colored single use multi-purpose plastic bags
	Carrier bags	Classical carrier bags
Foils	Generic foils	Pieces of various unspecific foils

2.2 Material

The material for the sorting analysis originates from the waste collection system for disposed light plastic packaging named "yellow bag". The yellow bag is a typical collection system for waste plastic packaging in rural areas with a low population density. The sample is provided by the waste management company Brantner, located in Lower Austria. The period of collection is the first quarter of 2021, also in Lower Austria, which is why a share of the examined plastic waste is significantly correlated to Christmas. This manifests in increased occurrence of toy packaging, single packaging of sweets (Lindt balls), delicacies (smoked fish) and gift wrapping. Another prevalent perception is the apparent effect of the recent Covid-19 pandemic and the continuing lockdown. People stay more at home, cook increasingly for themselves (fresh produce and convenience food) and are partially forced to do online shopping (mailing pouches and protective material). The ban on plastic bags seems to have already taken effect too, since few are to be found in the sample.

2.3 FTIR

Fourier-transform infrared spectroscopy with attenuated total reflectance (FTIR-ATR) is an easy, quick and non-destructive method which is common in quality assessment and goods inspection (Günzler & Gremlich, 2003). A subset ($n=143$) of random objects of the total two-dimensional yellow bag sample ($N=842$) is subject to further examination using FTIR-ATR to identify multi-layered film. Samples, with differing results of polymer type for the front and the back, are confirmed to consist of at least two different layers of polymer films and are therefore considered to be justifiably labelled as multilayer films.

3 RESULTS

The total share of multilayer films in the yellow bag is 6 w-%, whereby the share of multilayer films in the two-dimensional fraction is 24 w-%. The 24 w-% are almost equally split among packaging categories primary food packaging, primary product packaging, and plastic bags. A detailed list of results can be found in Tab. 2. The main packaging groups in which multilayer films tend to accumulate are primary food packaging (share 49 w-%), generic plastic bags (34 w-%), and

primary product packaging (19 w-%). Bags tend to be an outlier; 2 out of 17 inspected bag objects were identified as multilayer film but make up for 34 w-% of all found multilayer films. One of the bags is especially heavy, giving the wrong impression of the bags category to concentrate multilayers. Also remarkable, hardly any multilayer films are to be found when it comes to secondary packaging in general. The same goes for generic foils. Concerning primary food packaging, multilayer films tend to especially accumulate in packaging of bakery products (16%), meat (13%), and dairy (9%), followed by frozen food and convenience (9%). Almost half the number of all multilayer film objects goes to their account. Yet, they only contribute about one third to the total weight of multilayer films. The most probable product categories, where multilayer films are to be found, are packaging of dairy products (100%), coffee bags (100%), sanitary products (100%), pet food (100%), deep-freeze and convenience food packaging (80%), followed by meat (75%) and packaging of snacks (50%-67%).

Tab. 2: Identified share of multilayer films per product category

Category 2	Sample	Multilayer	Share of category	Share of total multilayer	Sample	Multilayer	Share of category	Share of total multilayer
	[pcs.]	[pcs.]	[%]	[%]	[g]	[g]	[w-%]	[w-%]
Bakery products	21	7	33%	16%	118	46	39%	7%
Meat	8	6	75%	13%	57	48	83%	7%
Household packaging	6	2	33%	4%	26	5	19%	1%
Dairy	4	4	100%	9%	18	18	100%	3%
Coffee	1	1	100%	2%	11	11	100%	2%
Fresh produce	10	2	20%	4%	66	20	30%	3%
Snack metallised	3	2	67%	4%	12	11	93%	2%
Snack uncoated	6	3	50%	7%	34	23	68%	3%
Frozen food / convenience	5	4	80%	9%	44	32	72%	5%
Dry food	7	2	29%	4%	64	7	11%	1%
Beverages / extra wrapping	4	1	25%	2%	32	3	11%	0%
Construction / workshop	4	0	0%	0%	673	0	0%	0%
Garden	0	0	0%	0%	0	0	0%	0%
Household products	9	0	0%	0%	255	0	0%	0%
Sanitary products	3	3	100%	7%	60	60	100%	9%
Toys	5	2	40%	4%	29	14	47%	2%
Wet pet food	1	1	100%	2%	20	20	100%	3%
Dry pet food	1	1	100%	2%	130	130	100%	19%
Gift wrapping	1	0	0%	0%	3	0	0%	0%
Mail order	15	1	7%	2%	590	19	3%	3%
Carrier bags	9	2	22%	4%	297	202	68%	29%
Bags	11	0	0%	0%	132	0	0%	0%
Foils	9	1	11%	2%	144	18	12%	3%
Total	143	45	31%	100%	2 816	686	24%	100%

The ranking is almost identical when comparing the product categories by their share of weight. It has to be pointed out, that this ranking needs to be interpreted with caution since for some categories too few specimens per group category had been inspected e.g., only one piece of coffee packaging has been inspected. In general, non-food packaging is most prevalent when it comes to shares of multilayer films by weight. First are plastic shopping bags distorting again the list by being heavier than any other specimen, when looking at the share of weight that multilayer films contribute to that specific category. They make up for 29 w-%. Second comes dry pet food with 19 w-%, third sanitary related products (9 w-%) followed ex aequo by packaging for meat and bakery products (7 w-%) and convenience food (5 w-%). To summarize, multilayer films tend to be numerous, light weight and typically accumulate in primary food packaging. Few, but heavy specimen of multilayer films are to be found in product packaging. The result of the FTIR-ATR analysis shows, that multi-layered material is commonly made of a combination of PE-PET, PE-PP, PE-PA or PP-PET ranked by decreasing frequency. Some objects are made of more exotic mixtures of multiple resins like PE/PP, PA/PP, and PET/PA. If bakery packaging consists of a multilayer film, it is mainly made of a combination of PE-PA, PP-PE or PP-PET, else it is made of

plain PP. Meat packaging is either made of PE or a combination of PE-PET or PE-PA. Flexible packaging of dairy related products is also made of PE-PET or PE-PA. Frozen food and convenience products are almost exclusively made of a combination of PE, PP and PET.

4 RECYCLING POTENTIAL

Currently, the Austrian plastic packaging recycling efficiency is 25.7 w-%. In Austria, 171,000 tons of plastic packaging were collected in 2020 by the separately collected waste collection. Combining these numbers with the finding of 6 w-% share of multilayer films results in a total of 10,260 tons of multilayer films per year in Austrian waste plastic packaging, see Fig. 1.

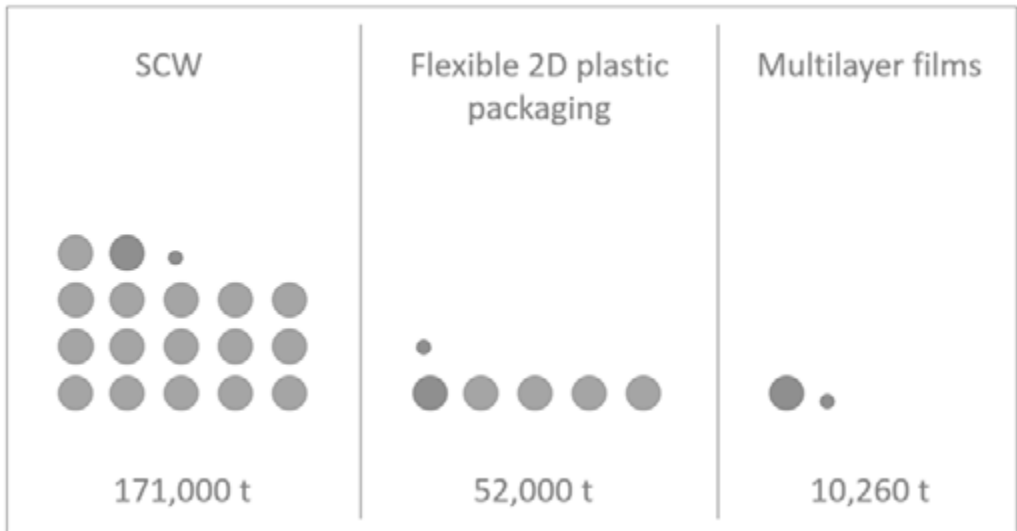


Fig. 1: Estimated recycling potential of multilayer films in the separately collected plastic packaging waste (SCW) in Austria

5 CONCLUSION

There is evidence that a significant share of the waste plastic packaging stream already consists of multilayer film packaging. A hand sorting analysis of a two-dimensional plastic packaging fraction with consecutive FTIR analysis gave a 6 w-% share of multilayer films in the Austrian plastic packaging stream of separately collected waste. Therefore, the detection and ejection of multilayer films needs more research. It is necessary to develop new technologies to detect, eject and recycle multilayer films on an industrial scale to avoid negative interference in downstream processes. In the future, the research of recycling technologies of multilayer film and improvement of legacy plastic sorting technologies can help to further refine the sorting performance and tap unlocked recycling potential in the fraction of flexible plastic packaging waste to thus pave the way for a circular plastics economy away from mere use in industrial incineration. As a result, a new, value-added source of secondary resources is created which contributes to a sustainable recycling of plastics and additionally enhances the Austrian plastic recycling efficiency.

REFERENCES

- Denkstatt. (2017) How packaging Contributes to Food Waste Prevention. Specific examples from Austrian stakeholder projects, including carbon footprint assessments. Vienna.
- European Commission. (2018) A European Strategy for Plastics in a Circular Economy.
- European Commission. (2020) A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe.

- European Union. (2019). *Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and the European Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment: Directive (EU) 2019/904*.
- Eurostat. (2021). *Eurostat. Retrieved from Packaging waste statistics: <https://ec.europa.eu/eurostat/>*
- Günzler, H., & Gremlich, H.-U. (2003). *IR-Spektroskopie: Eine Einführung*. Weinheim: Wiley Verlag. ISBN: 3-527-30801-6.
- Morris, B. A. (2016). *The Science and Technology of Flexible Packaging: Multilayer Films from Resin and Process to End Use*. Plastics design library. Saint Louis: Elsevier Science. ISBN: 978-0-323-24273-8.
- Niaounakis, M. (2020). *Recycling of flexible plastic packaging*. Plastics design library. Oxford and Cambridge MA: William Andrew an imprint of Elsevier. ISBN: 9780128163351.
- Nonclercq, A. (2016). *Mapping flexible packaging in a Circular Economy [F.I.A.C.E.]: Final report. IDP.CPD.007.16*. Delft: TU Delft.
- Plastic Europe. (2020). *Plastics - the Facts 2020: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Online.
- Van Eygen, E. (2018). *Management of plastic wastes in Austria: analysis of the status quo and environmental improvement potentials*. Vienna: TU Wien.

Bewertung der Recyclingfähigkeit von Elektroaltgeräten: Ein praxisbezogenes Modell

E. Kodon¹, T. Mayer¹ & T. Nigl²

¹⁾ ERA Elektro Recycling Austria GmbH, Wien, Österreich

²⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Die Schließung von Materialkreisläufen ist ein zentrales Ziel der Europäischen Union (EU) auf dem langen Weg zur Klimaneutralität. Um eine maximale Wirkung zu erzielen, ist schon in der Designphase von Produkten hierauf zu achten, weshalb ein *Design-for-Recycling* zu forcieren ist. Eine Möglichkeit hierzu ist die Ökomodulation von Lizenzbeiträgen anhand der Recyclingfähigkeit. In dieser Arbeit erfolgt die Erstellung eines Modells zur Berechnung der Recyclingfähigkeit von Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG). Hierfür werden bestehende Modelle analysiert und eine Methodik erarbeitet. In diese sind relevante Faktoren aus einer Literaturrecherche zu implementieren und anhand eines Referenzprozesses auf Österreich zu spezifizieren. Das erstellte Modell inkludiert alle Prozessschritte im *End-of-Life*-Verfahren von EAG sowie berücksichtigt neben dem Stoffpotenzial, auch die technischen Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren und das reale abfallwirtschaftliche System. Ein Modell, welches die Recyclingfähigkeit umfassend, transparent, quantitativ und vergleichbar betrachtet, wie das hier vorgestellte, ist obligatorisch für ein Heranziehen der Recyclingfähigkeit als Messgröße für nachhaltige Produktgestaltung.

1 EINLEITUNG

1.1 Hintergrund und Problematik

Die Bedeutung von Elektrogeräten nimmt im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung immer weiter zu. Dies ist anhand der steigenden Sammelmengen von Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) nach dem Tätigkeitsbericht der Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle 2020 (kurz EAK) auch in der Abfallwirtschaft ersichtlich. Jedoch werden nach Schätzungen von Eurostat (Europäische Kommission, 2020) nur 40 % der EAG in der EU recycelt.

Der neue Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft (Europäische Kommission, 2020) im Zuge des europäischen Grünen Deals setzt sich für die Schließung von Materialkreisläufen ein, um das übergeordnete Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Bis zu 80 % der Umweltauswirkungen entstehen schon im Zuge des Produktdesigns (Europäische Kommission, Directorate-General for Energy, Directorate-General for Enterprise and Industry, 2014). Hierbei kommt dem *Design-for-Recycling* eine wichtige Rolle zu. Eine Methode dieses zu fördern ist die Ökomodulation von Lizenzbeiträgen durch die Sammel- und Verwertungssysteme.

1.2 Ökomodulation durch Recyclingfähigkeit

Eine mögliche Bewertungsgröße für die Ökomodulation ist die Recyclingfähigkeit. Hierbei findet das Stufenmodell nach Pomberger (2021) Anwendung. Pomberger (2021) teilt die Recyclingfähigkeit in drei Stufen ein:

- Die theoretische,
- die technische und
- die reale Recyclingfähigkeit.

Zusammengefasst ist die theoretische Stufe auf die Recyclingfähigkeit der verwendeten Werkstoffe bezogen; die technische befasst sich mit der Aufschließbarkeit, Sortierbarkeit und Ausschleusbarkeit; die reale Stufe berücksichtigt das tatsächlich vorhandene abfallwirtschaftliche

System. Darunter fällt u.a. auch, ob ein zu Abfall gewordenes Produkt überhaupt und richtig gesammelt wird und somit einer fachgerechten Verwertung zur Verfügung steht. Pomberger (2021) stellt fest, dass kein Modell zur Bewertung der realen Recyclingfähigkeit existiert.

2 MATERIAL UND METHODEN

Die Erstellung des Berechnungsmodells erfolgte in drei Schritten. Allen voran wurden bestehende Modelle aus der Literatur analysiert. Sowohl Modelle mit rein massebasiertem Ansatz als auch weitere Aspekte wie ökonomische und ökologische inkludierend sowie multidimensionale Ansätze fanden Betrachtung. Neben Berechnungsmodellen erfolgte die Betrachtung von Gütesiegeln und Designhilfen. Hierbei wurde die Vergleichbarkeit, die betrachteten Stufen der Recyclingfähigkeit sowie die inkludierten Schritte des *End-of-Life*-Verfahrens verglichen. Es erfolgte die Auswahl eines transparenten, quantitativen und vergleichbaren Modells, welches alle Stufen der Recyclingfähigkeit sowie *End-of-Life*-Verfahren inkludieren kann.

Im zweiten Schritt erfolgte die Auswahl relevanter, aus einer Literaturrecherche ermittelten, Faktoren. Die Recherche von Einflussfaktoren erfolgte auf Basis einer Literaturrecherche. Für einen besseren Überblick wurden die Faktoren für jede Stufe der Recyclingfähigkeit getrennt ermittelt. Hierbei fand die Analyse von Beiträgen in Fachjournalen, Designvorschlägen, Berechnungsmodellen und Normen Anwendung. Die gewählten Faktoren wurden anschließend in die Methodik implementiert. Nicht quantifizier- bzw. messbare wurden durch Modellbildung ersetzt.

Um die in Österreich vorhandenen Technologien abzubilden, erfolgte die Erstellung eines Referenzprozesses. Hierfür wurden geltende rechtliche Rahmenbedingungen für die Entsorgung von EAG, allen voran die Elektroaltgeräte-Verordnung (EAG-VO) und die Abfallbehandlungspflichten-Verordnung (AbfallBPV), betrachtet. Die in Anwendung stehenden Anlagen wurden einerseits durch Betrachtung des BREFs Waste Treatment analysiert. Außerdem erfolgte die Betrachtung von vier österreichischen Entsorgungsanlagen von EAG. Bei den Anlagen handelt es sich bei einer um einen Demontagebetrieb sowie drei Betriebe zur Aufbereitung von Elektrokleingeräten. Der Referenzprozess resultierte aus dem Vergleich dieser und der Zusammenfassung zu Modulen, welche wiederum aus Aggregaten bestehen. Das Modell, inklusive der gewählten Faktoren, wurde auf diesen Prozess spezifiziert, um das reale abfallwirtschaftliche System entsprechend zu berücksichtigen.

3 ERGEBNISSE

3.1 Berechnungsmodell zur Recyclingfähigkeit

Die Analyse bestehender Modelle zur Berechnung der Recyclingfähigkeit eröffnet mehrere Möglichkeiten diese zu bewerten. Neben einer Vielzahl von Verfahren, welche ausschließlich das Stoffpotential (theoretische Recyclingfähigkeit) bewerten (u.a. IEC/TR 62635), existieren auch Methoden zur Bewertung von anderen Aspekten, außer der recycelten Masse, wie auch ökologische Parameter (u.a. Qwertzy) sowie auch ökonomische Parameter (u.a. RESICLED). Das in Kodon (2022) entwickelte Modell ist rein massebasiert quantitativ sowie vergleichbar und orientiert sich an jenem der EN 45555 sowie cyclos-HTP (Löhle, 2017).

Wirtschaftliche bzw. ökologische Parameter finden aufgrund der mangelnden zeitlichen Repräsentativität bzw. Vergleichbarkeit keine Anwendung. Es setzt sich zum Ziel vollständig EoL-Verfahren sowie alle Stufen der (theoretischen, technischen und realen) Recyclingfähigkeit zu beschreiben. Gleichung 1, welche die Masse an Sekundärmaterial m_{Sek} zur Produktmasse m_p in Verhältnis setzt und diese als Produkt von Faktoren f definiert, bildet die Grundlage des Berechnungsmodells.

$$R = \frac{m_{\text{Sek}}}{m_p} = \prod_{\text{Faktoren}} f \quad (1)$$

Die Faktoren f können in die drei Stufen der Recyclingfähigkeit unterteilt werden. Die theoretische Recyclingfähigkeit wird durch das Stoffpotential bestimmt. Hierfür sind die Zusammensetzung sowie Stoffverbote entscheidend. Anzumerken ist, dass nicht nur der Wert- sowie Schadstoffgehalt, sondern auch die Verteilung dieser, ausschlaggebend ist. Dies resultiert aus rechtlichen Bestimmungen nach der EAG-VO sowie der AbfallBPV. Streng genommen ist auch der Anteil des Zielelements in Verbindungen entscheidend (z.B. Kupfergehalt in CuO), was jedoch im Masseausbringen im stofflichen Recycling berücksichtigt wird.

Mathematisch resultiert dies in der Berechnung des Wertstoffanteils, unter Abzug des Anteils der Masse an Schadstoffen m_{Schad} sowie mit Schadstoffen kontaminierten Komponenten m_{Kont} , an der Produktmasse m_P , von 1 (siehe Gleichung 2a).

Technische Faktoren geben den Einfluss von realen Verwertungsszenarien wieder (Kodon, 2022):

- Demontagefähigkeit, welche von Art und Anzahl an benötigten Werkzeugen, erforderlichen Zusatzqualifikationen und der benötigten Zeit abhängt,
- Vorhandensein einer Batterie, Ummantelung und potenziell gefährlicher Stoffe,
- Art und Anzahl von Stoffverbunden sowie
- Unterscheidung im Trennmerkmal bei der Sortierung.

Die Vorhersage des Aufschlusses eines Produkts ist nicht trivial möglich. Hierfür findet eine adaptierte Betrachtung der statischen Entropie nach Roithner et al. (2021) Anwendung. Die Produktspezifische Entropie erfolgt durch Berechnung des Gehalts des Stoffes i w_i welcher mit dem Logarithmus (mit Basis zwei) von w_i multipliziert ist. Die berechnete produktspezifische Entropie vor und nach dem Aufschluss wird als Verhältnis gesetzt. Eine Notwendigkeit für die Anwendung des Berechnungsmodells ist ein Produktpass. Dieser hat die Komponenten, deren chemische Zusammensetzung sowie die Verbindungscharakteristik zu definieren. Durch Anwendung definierter Regelungen ist die Bewertung des Aufschlusses möglich.

Um die Entropie nach dem Aufschluss zu ermitteln, erfolgt eine Berechnung der Entropie der aufgeschlossenen (zerlegten und demontierten) Einzelteile. Gewichtet nach der Masse m_{Teile} wird die Entropie summiert. Die Bewertung des Aufschlusses erfolgt durch Analyse der Komponenten und deren Verbindungscharakteristik. Kann eine Komponente aufgeschlossen werden, sinkt die Entropie durch den Aufschluss, weshalb bei idealem Aufschluss das Verhältnis der Entropien Null wird bzw. bei keinem die Entropie den Wert eins annimmt.

Folglich ist die Subtraktion von eins notwendig, um eine Effizienz des Aufschlusses zu berechnen. Auch wenn kein Aufschluss erfolgt, kann zumindest der Gehalt der Hauptkomponente w_{max} in eine stoffliche Verwertung übergehen. Deshalb gelten die Entropieüberlegungen ausschließlich für die verbleibenden Stoffe $(1 - w_{\text{max}})$.

Die Sortierung wird durch das Masseausbringen der Zielstoffe (ZS) in die betrachtete Fraktion r_{Sort} jedes Sortieraggregats, dass die betrachtete Fraktion durchläuft, berücksichtigt. Dieses ist nach der Masse an Zielstoffen der Fraktion m_{ZS} gewichtet. Wichtig anzumerken ist, dass bei der technischen Recyclingfähigkeit die Output-Fractionen zu betrachten sind und nicht, im Gegensatz zur EN45555, die Stoffe. Gleichung 2b gibt die technische Recyclingfähigkeit an, wobei mathematische Vereinfachungen durchgeführt wurden.

Die reale Recyclingfähigkeit, mathematisch betrachtet in Gleichung 2c, ist abhängig vom realen abfallwirtschaftlichen System und berücksichtigt die Sammelrate, das Massenausbringen des Recyclings, die Verwertung von Begleitelementen sowie gesetzliche Gegebenheiten. Die Sammelrate r_{Sammlung} berechnet sich nach der EAG-VO aus der gesammelten Menge im Verhältnis zu den in Verkehr gesetzten der vergangenen drei Jahre. Das Masseausbringen des Recyclings ist stoffspezifisch und durch das Verhältnis von der Summe an allen Stoffen einer Fraktion, die in das stoffliche Recycling gehen m_{Stoffe} multipliziert mit dem Masseausbringen des Stoffs r_{sek} in Sekundärrohstoffe, zur Masse der Zielstoffe m_{ZS} in der betrachteten Fraktion, zu berechnen. Hierbei ist im Besonderen auch die Verwertung von Begleitelementen zu beachten. Beispielhaft ist das Recycling von Edelmetallen im Kupferrecyclingprozess zu nennen. Gesetzliche

Gegebenheiten finden keine direkte Anwendung, sondern werden indirekt durch Berücksichtigung bei anderen Parametern (z.B.: Stoffverbote beim Schadstoffgehalt) implementiert. Somit resultiert

Gleichung 2 nach Kodon (2022), welche die genannten Parameter in Gleichung 1 implementiert.

$$R = \left(1 - \frac{\sum m_{Schad} + \sum m_{Kont}}{m_p} \right) * \quad (2a)$$

$$\left(1 - \frac{\sum_{Teile} \frac{m_{Teile}}{m_p} * \sum_{nach} w_i * \log_2 w_i}{\sum_{vor} w_i * \log_2 w_i} * (1 - w_{max}) \right) * \sum_{Fraktionen} \frac{\sum_{ZS} m_{ZS} * \prod_{Sort} r_{Sort}}{\sum_{ZS} m_{ZS}} * \quad (2b)$$

$$* r_{Sammlung} * \sum_{Fraktionen} \frac{\sum_{Stoffe} m_{Stoffe} * r_{sek}}{\sum_{ZS} m_{ZS}} \quad (2c)$$

3.2 Implementierung der realen Recyclingfähigkeit

Im Allgemeinen umfasst das Recycling von EAG drei Schritte:

- Die Sammlung,
- die Aufbereitung zu sekundären Rohstoffen und
- die stoffliche Verwertung zu Sekundärmaterialien.

Die Sammlung erfolgt in Österreich kostenlos an 2.069 Standorten (ZAREg, Stand: 30.6. 2022), ist von Sammel- und Verwertungssystemen organisiert und von der EAK koordiniert. Gesammelte EAG gehen in die Schadstoffentfrachtung, welche der Abtrennung von Schad- und Störstoffen unter Berücksichtigung der EAG-VO und der AbfallBPV dient. Hierbei erfolgt auch die Abtrennung von Wertstoffen wie u.a. Leiterplatten. Anwendung finden die manuelle Demontage sowie die automatische, z. B. mittels eines Smashers. Im Anschluss erfolgt die Zerkleinerung, um einen Materialaufschluss zu erzielen. Dieser Prozess ist sowohl einstufig als auch zweistufig umsetzbar. Angewandte Zerkleinerungsapparate sind Hammerbrecher bzw. -mühlen, Ein- und Zweiwelzenzerkleinerer, sowie Zerdirektoren und Kondirektoren (für Spezialanwendungen). Nachfolgend werden ferromagnetische Schrotte mittels Magnetscheidung in eine Eisen- und Stahlschrottfraktion abgeschieden. Ziel ist die Qualitätsstufe E40 des europäischen Stahlsortenkatalogs zu erreichen.

Im Weiteren erfolgt ein Sortierschritt, in welchem Wert- und Störstoffe mittels Handklaubung oder automatischer Sortierschritte abgetrennt werden. Für die Trennung in eine Leicht- sowie Schwerfraktion findet eine Dichtentrennung, durch Schwimm-Sink-Verfahren Anwendung. Zusätzlich werden auch Wirbelstromscheider eingesetzt. Die Schwerfraktion gelangt in eine Metallaufbereitung, in welcher durch Wirbelstromscheider, induktive Metallscheidung, Röntgen-Sortierer, erneute Dichtentrennung und elektrostatische Sortierer Nichteisenmetallfraktionen, wie Kupfer, Aluminium und Zink entstehen. Die verbleibenden Metalle gelangen in eine Mischmetallfraktion. Das stoffliche Recycling erfolgt in metallurgischen Anlagen. Die Leichtfraktion gelangt in eine Aufbereitung für Kunststoffe, wo diese sortenrein in Polypropylen (PP), Polystyrol (PS), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Polycarbonat (PC)/ABS getrennt werden. Hierbei finden Nahinfrarot (NIR) Sortierer sowie Dichtentrennmethode Anwendung. Der Sortierreste der Leichtfraktion gelangen in eine thermische Verwertung, die Reifractionen in ein mechanisches Kunststoffrecycling.

Der beschriebene Referenzprozess ist in Abbildung 1 dargestellt und durch Implementierung der Demontagevorgaben und Zerkleinerungsaggregate bei der Bewertung des Aufschlusses im Modell berücksichtigt. Das Masseausbringen des Aufgabematerials in verschiedene Fraktionen durch Sortierprozesse ist aggregatspezifisch, wodurch diese auch hier einbezogen sind.

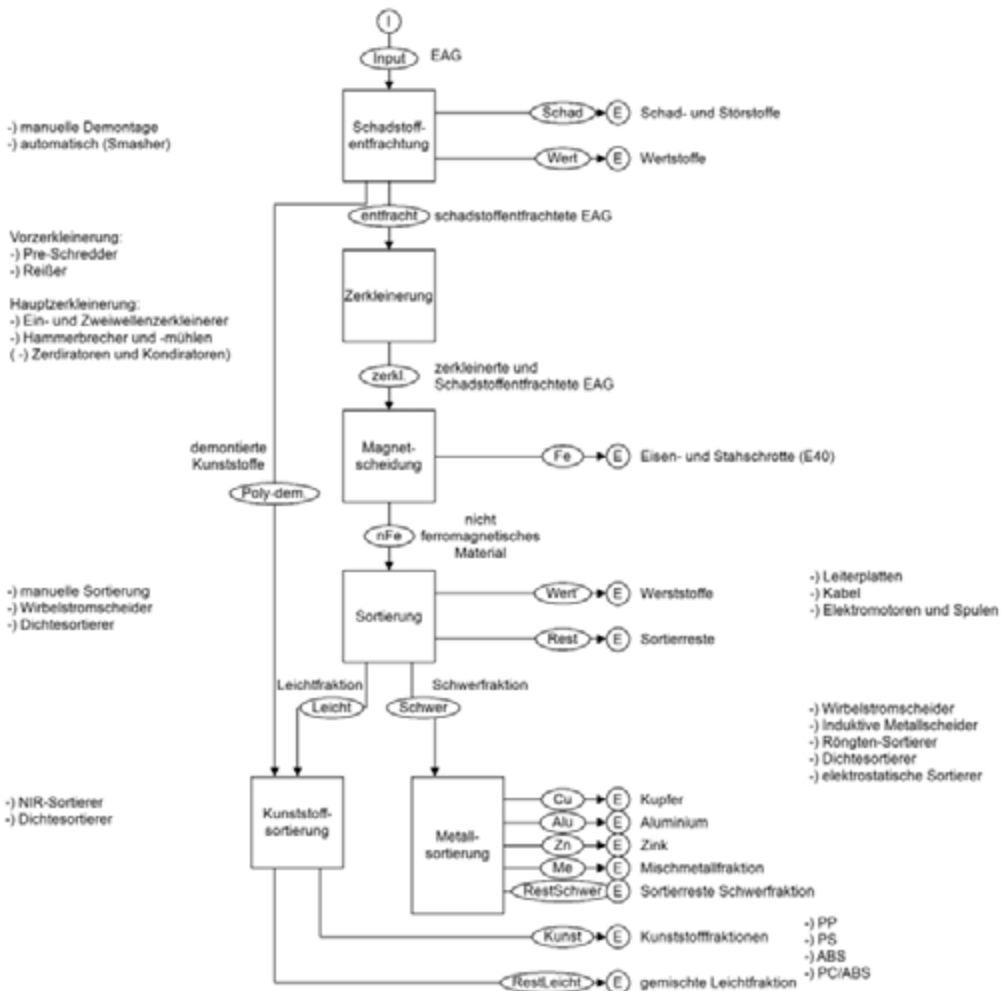


Abb. 1: Referenzprozess für die Verwertung von EAG (Kodon, 2022)

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Unter Anwendung dieser Berechnungsmethodik ist eine Bewertung der realen Recyclingfähigkeit schon zum Zeitpunkt des Inverkehrsetzens möglich. Sie erweitert aktuelle Methoden, welche in vielen Fällen nur das stoffliche Potenzial berücksichtigen, was keine Aussage über die tatsächliche Masse an recyceltem Sekundärmaterial zulässt.

Durch die Berechnung der Recyclingfähigkeit ist eine Ökomodulation der Lizenzbeiträge für die Lizenzierung möglich. Dies schafft für Hersteller einen ökonomischen Anreiz ein *Design-for-Recycling* zu fördern. Ansätze der Ökomodulation wurden in Frankreich eingeführt (vgl. ecosystem), jedoch noch nicht unter Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit.

Ein weiterer Vorteil ist die Transparenz beim Kauf, sodass auch hier besonders recyclingfähige Produkte vermarktet werden können, was am Beispiel des *Fairphones* umgesetzt ist. Die EU plant die Recyclingfähigkeit in das EU-Umweltzeichen hinzuzufügen (Europäische Kommission, 2020). Auch hier ist es von besonderer Bedeutung, dass das Berechnungssystem nicht bloß die theoretische oder die technische, sondern auch die reale Stufe der Recyclingfähigkeit erfüllt.

Eine erhöhte Recyclingfähigkeit führt zu einem höheren Anteil an Sekundärmaterialien und trägt somit zum Schließen von Materialkreisläufen bei. Der Beitrag der Abfallwirtschaft zum übergeordneten Ziel des Klimaschutzes, wenn schon beim Design auf das Recycling geachtet wird, kann nach Prognosen bis zu 300 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr betragen (Prognos; CE Delft, 2022). Hierfür sind Anreize zum *Design for Recycling*, wie die mittels Recyclingfähigkeit ökomodulierten Lizenzbeiträge, essenziell, was ein ganzheitliches Berechnungsmodell, unter Einbeziehung realer abfallwirtschaftlicher Prozesse, obligatorisch macht.

LITERATUR

- Europäische Kommission. (2020). *Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft*. Luxemburg, Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union.
- Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH. (2021). *Tätigkeitsbericht 2020*. Wien, Österreich: Elektroaltgeräte Koordinierungsstelle Austria GmbH.
- Europäische Kommission, Directorate-General for Energy, Directorate-General for Enterprise and Industry. (2014). *Ecodesign your future: how ecodesign can help the environment by making products smarter*. Luxemburg, Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union.
- Kodon, E. (2022). *Bewertung der Recyclingfähigkeit von Elektroaltgeräten: Ein praxisbezogenes Modell*. Leoben: Montanuniversität Leoben.
- Löhle, S. (06. 12 2017). *Bemessung der Recyclingfähigkeit nach dem Prüfschema des Institutes cyclos-HTP. Bemessung der Recyclingfähigkeit nach dem Prüfschema des Institutes cyclos-HTP*. Berlin, Berlin, Deutschland: Institut cyclos-HTP GmbH.
- Pomberger, R. (03. 02 2021). *Über theoretische und reale Recyclingfähigkeit. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, S. 24-35.
- Prognos; CE Delft. (2022). *CO2 reduction potential in European waste management*. Berlin, Düsseldorf / Delft; Deutschland / Niederlande: Prognos; CE Delft.
- Roithner, C., Oliver, C., & Helmut, R. (9. Juli 2021). *Ein neuer Weg zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Produkten mittels Statistischer Entropie: Fallbeispiel Mobiltelefone. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, S. 377-384.

Unfälle und Brände mit Elektrofahrzeugen – Versuch einer statistischen Betrachtung

T. Nigl¹ & M. Altendorfer¹

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Die in den letzten Jahren rasch voranschreitende Transformation in Richtung Elektromobilität schafft für Einsatzkräfte im Bereich Unfälle und Fahrzeugbrände neue Herausforderungen. Einerseits ist das Thema auch bei konventionellen Antrieben nicht neu, andererseits ist eine Schiefelage in der medialen Berichterstattung sichtbar. Dieser Artikel geht der Frage nach, inwiefern Literaturdaten einen quantitativen statistischen Vergleich zwischen dem Brandrisiken und Gefahren von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ermöglichen. Die Ergebnisse zeigen zwar, dass Elektrofahrzeuge deutlich weniger oft in Brandereignisse verwickelt sind. Getrübt wird das Ergebnis allerdings durch die aktuell spärliche Datenlage und die dadurch eingeschränkte Aussagekraft der Daten.

1 EINLEITUNG

Aktuell findet weltweit eine rasant fortschreitende Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs statt. Im Jahr 2021 wurden weltweit insgesamt knapp 6,8 Mio. Elektrofahrzeuge (battery electric vehicles, BEV) verkauft, etwas mehr als die Hälfte davon am chinesischen Markt. Dahinter folgt mit 2,3 Mio. BEV Europa und mit 631.000 BEV die USA (Tabelle 1).

Tab. 1: Verkaufte Elektrofahrzeuge 2021 nach Ländern bzw. Regionen (IEA 2022)

Land bzw. Region	Verkaufte Elektrofahrzeuge 2021
China	3.500.000
Deutschland	696.000
USA	631.000
Vereinigtes Königreich	327.000
Frankreich	322.000
Norwegen	154.000
Rest Europas	828.000
Rest der Welt	313.000
Summe	6.771.000

Auch in Österreich stieg die Zahl der Neuzulassungen in den letzten Jahren stark an, wie die Zulassungsstatistik der Statistik Austria zeigt (Abbildung 1). Der Anteil am gesamten PKW-Bestand in Österreich beträgt aktuell 1,8 % (BEÖ 2022).

Aus der Sicht der Dekarbonisierung der Mobilität und der zugrunde liegenden Maßnahmen gegen die Klimakrise ist diese Entwicklung eine höchst notwendige, wenngleich sie natürlich von Maßnahmen begleitet werden muss, die dafür Sorge tragen, dass der Gesamtbestand an Fahrzeugen nicht weiter steigt, sondern idealerweise sogar sinkt. Letzteres ist notwendig, da die Antriebswende lediglich das CO₂-Emissionsproblem löst, jedoch nur partiell die Probleme des verkehrsbedingten Feinstaubes oder Lärms und nicht die Probleme der verkehrsbedingten Flächenversiegelung oder gar der generellen Flaschenhälse oder zur Verfügung stehenden Verkehrsflächen (Straßen und Parkflächen).

Die Elektrifizierung der Mobilität schafft jedoch auch neue Herausforderungen, etwa für Einsatzkräfte bei und nach Verkehrsunfällen oder bei in Brand geratenen Fahrzeugen.



Abb. 1: Entwicklung des BEV-Bestandes in Österreich (BEÖ 2022)

Das Thema brennender Fahrzeuge ist prinzipiell nicht neu, gewinnt aber angesichts der neuartigen Technologie an Dynamik und ist vielfach getrieben von einer medialen Berichterstattung die ein verzerrtes Bild zeichnet. Im Spannungsfeld zwischen berechtigtem Informationsbedürfnis der Bevölkerung und Sensationslust gewisser Medien stellt sich die aktuelle Berichterstattung mitunter wie folgt dar: Einzelne Brandereignisse von BEV beherrschen für Tage, wenn nicht sogar Wochen die Schlagzeilen, wohingegen die sich täglich ereignenden Brandereignisse bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (internal combustion engine, ICE) angesichts ihrer Häufigkeit nicht mal einen Kurzbericht erhalten.

Das genannte Phänomen tritt mitunter auch deshalb in Erscheinung, weil es aktuell kaum umfassende und aussagekräftige Statistiken gibt, die das Verhältnis von Brandereignissen zwischen BEV und ICE ins rechte Licht rücken und somit die Brandrisiken und -gefahren der Antriebswende quantifizieren würden. Dieser Frage soll im vorliegenden Artikel nachgegangen werden.

2 METHODIK

Das Problem der unzufriedenstellenden Datengrundlage wird dadurch genährt, dass in vielen Ländern Daten zu Verkehrsunfällen und Fahrzeugbränden vielfach sehr heterogen erfasst werden. Zum Beispiel werden die Brandereignisse nicht einheitlich nach Fahrzeugarten bzw. -typen (alle KFZ, nur PKW, etc.) oder nach Antriebstypen (ICE, Fahrzeuge mit alternativem Antrieb, BEV, PHEV, HEV, FCEV) kategorisiert. Darüber hinaus ist oft nicht klar, wie die Zuteilung in die häufig verwendeten Kategorien Fahrzeugbrand und Unfall erfolgen. Oder ob im Falle eines Brandes, die Antriebsbatterie im Brandgeschehen involviert war. Diese Umstände machen die profunde Erhebung und Auswertung schwierig.

Nichtsdestotrotz haben die Autoren versucht, vorhandene Daten zu Unfällen und Brandereignissen von Fahrzeugen mit konventionellen und alternativen Antrieben nach bestem Wissen und Gewissen zu recherchieren, diese zu vereinheitlichen und dann gemeinsam und vergleichbar auszuwerten.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Pannenhilfen und Abschleppungen

Aus den Daten der beiden größten österreichischen Mobilitäts- bzw. Verkehrsclubs (ÖAMTC und ARBÖ) geht hervor, dass BEV im Jahr 2021 bei knapp über einer Million Pannenhilfen und Abschleppungen einen Anteil von 0,24 % hatten, diese jedoch bereits einen Anteil von 1,49 % des Gesamtbestandes hatten. Eine solche Betrachtung berücksichtigt nicht dem Umstand, dass das Durchschnittsalter der BEV-Flotte wesentlich jünger, als jenes der ICE-Flotte. Bei den Abschleppungen und Pannenhilfen kam es in keinem Fall zu einem Brand.

3.2 Fahrzeugbrände

Die recherchierten und normierten Werte für PKW-Brände in Deutschland, Finnland, Österreich und den Niederlanden sind in Tabelle 2 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Fälle normiert auf 10.000 Bestands-PKW für alle vier Länder in der gleichen Größenordnung liegen.

Für batterie- bzw. alternativ betriebene Fahrzeuge konnten aktuell deutlich weniger aussagekräftige Daten ermittelt werden, was auf den noch geringen Anteil am Gesamtbestand zurückzuführen ist. Die Daten zeigen aber deutlich niedrigere Werte für Brände bei BEV (vgl. Tabelle 2 und Tabelle 3).

Tab. 2: Pkw-Brände nach Ländern unabhängig von der Antriebsart

Land	Zeitraum	Brände pro 10.000 PKW		Quellen
		Min.	Max.	
Deutschland*	2015-2020	3,72	4,34	Siemens 2022; KBA 2022
Finnland	2017-2019	3,42	3,49	Linja-aho 2020
	N.A.	4,3		Winter 2022
Niederlande	2020-2021	5,30	6,38	Verbond van Verzekeraars 2020, StatLine 2021, Alarmeringen 2022
Österreich	2019-2021	3,05	3,44	Winter 2022

* nur voll- bzw. teilkaskoversicherte Fahrzeuge

Tab. 3: PKW-Brände mit batterieelektrischem oder alternativem Antrieb nach Ländern

Land	Zeitraum	Brände pro 10.000 PKW	Quellen
Finnland	N.A.	0,4	Winter 2022
Niederlande	2021	1,15*	NIPV 2022
		0,67**	
Österreich	2021	0,26	Winter 2022

* alle Brände von BEV, ** Brände mit involvierter Antriebsbatterie

Einzig die Studie zu Fahrzeugunfällen und -bränden aus den Niederlanden (NIPV 2022) geht auswertungstechnisch ins Detail und auf Fragen ein wie:

- Beteiligung der Antriebsbatterie am Brandgeschehen bzw. *thermal runaway*,
- Antriebsart,
- Fahrzeugtyp,
- Etc.

International versucht die australische Initiative [evfiresafe.com](https://www.evfiresafe.com) eine weltweite Datenbank zu BEV-Bränden aufzubauen, mit dem Ziel Risiken für Rettungskräfte bei einem Brand Antriebsbatterie in einem BEV zu ermitteln, insbesondere dann, wenn das Fahrzeug an ein stromführendes Ladegerät angeschlossen ist (EV FireSafe 2022).

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Untersuchungen basieren teilweise auf sehr geringen Fallzahlen, weshalb die Forderung nach einer systematisch durchgeführten und europa- oder sogar weltweit einheitlichen Erhebung bekräftigt werden muss.

Wenngleich die Gefahren und Risiken die von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ausgehen doch anderes zu beurteilen sind als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, legt die aktuell vorliegende Datenlage nahe, dass diese deutlich weniger oft in Brandereignisse verwickelt sind.

In Österreich untersucht das FFG-geförderte Projekt RECOVER-E derzeit den „Gesamtprozess für den sicheren Umgang mit batterieelektrischen Fahrzeugen vom Unfallort bis zur Verwertungsstelle“ und liefert damit wertvolle Informationen für eine sichere Transformation in Richtung Elektromobilität.

LITERATUR

- Alarmeringen (2022) Aantal autobranden daalt voor het eerst in jaren in 2021. Zahl der Autobrände geht 2021 erstmals seit Jahren zurück. Online verfügbar unter https://alarmeringen.nl/data/autobranden/?utm_source%3Dwhatsapp%2526utm_medium%3Dsocialbuttons-top%2526utm_campaign%3Dsharing, zuletzt aktualisiert am 01.06.2022, zuletzt geprüft am 01.06.2022.
- BEÖ (2022) Österreich: E-Mobilität in Zahlen – E-Autos (BEV) in Österreich. Online verfügbar unter <https://www.beoe.at/statistik/> zuletzt aktualisiert am 30.07.2022, zuletzt geprüft am 30.07.2022.
- EV FireSafe (2022) Enhancing safety for emergency responders at electric vehicle traction battery fires. Online verfügbar unter <https://www.evfiresafe.com/> zuletzt aktualisiert am 30.06.2022, zuletzt geprüft am 30.06.2022.
- IEA (2022) Global EV Outlook 2022. Online verfügbar unter <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf> zuletzt geprüft am 30.07.2022.
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA 2022) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Motorisierung/motorisierung_node.html;jsessionid=587F5EA31421B69E12DAC79B290F1844.live11314, zuletzt aktualisiert am 01.06.2022, zuletzt geprüft am 01.06.2022.
- Linja-aho, V. (2020) Hybrid and Electric Vehicle Fires in Finland 2015–2019. Fires in Vehicles (FIVE) - conference. December 2020.
- NIPV (2022) Fires in Vehicles (FIVE) - conference in December 2020. Jahresbericht 2021.
- Siemens, C. (2022) Brände (inkl. Kurzschlusschäden) kaskoversicherter Pkw in Deutschland, 01.06.2022. E-Mail.
- StatLine (2021) Motorvoertuigen; vanaf 1927. Online verfügbar unter <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/82472NED/table?ts=1650975212567>, zuletzt aktualisiert am 04.07.2022, zuletzt geprüft am 04.07.2022.
- Verbond van Verzekeraars (2020) Aantal autobranden blijft stijgen. Online verfügbar unter <https://www.verzekeraars.nl/publicaties/actueel/aantal-autobranden-blijft-stijgen>, zuletzt aktualisiert am 01.06.2022, zuletzt geprüft am 01.06.2022.
- Winter, J. (2022) Was tun, wenn ein Elektroauto brennt? | KfV – Kuratorium für Verkehrssicherheit. In: KfV – Kuratorium für Verkehrssicherheit, 10.05.2022, zuletzt geprüft am 01.06.2022.

Analysis of different polypropylene waste bales – evaluation of the source material for polypropylene recycling

J. Geier¹, M. Bredács¹, A. Witschnigg², D. Vollprecht³ & G. Oreski¹

¹) Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, Austria

²) PreZero Polymers Austria GmbH, Haimburg, Austria

³) Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

ABSTRACT: Given the large amount of PP waste generated every year, mechanical recycling of post-consumed PP products is essential. However, the use of the thereof obtained recyclates in more demanding applications is still restricted by their quality. To determine possible reasons for the low and inconsistent quality of recyclates depending on the source material, the aim of this work was to investigate different PP waste bales (“pure”, mixed with other polymers), commercially available at different sorting centres. The amount of PP, the content of contaminations (polymeric and foreign impurities) as well as the ratio of differently processed PP products was investigated four times a year. The analysis showed that up to 13% of PE is present in “pure” PP bales. Furthermore, a considerable amount of impurities was found in some bales. The sorting of the obtained PP samples according to their processing methods indicated seasonal fluctuation, which may be one reason for inconsistent recycle quality. These results highlight the importance of proper sorting and treatment of PP waste bales before reprocessing.

1 INTRODUCTION

In 2020 Polypropylene (PP) accounted for almost 20% of the plastic consumption in Europe, making it the second most used plastic (Plastics Europe 2021). Due to the high volume of PP used as packaging material (Plastics Europe 2021), large amounts of PP waste are generated every year. Therefore, mechanical recycling of PP waste is a crucial step towards a circular economy. Although there are already some well-established recycling techniques, the lower quality of recyclates compared to virgin materials still poses an obstacle for their use in more demanding applications. Improvements of every step of the whole recycling value chain could solve this problem, with proper and more accurate sorting techniques being particularly crucial.

PP is available in many different grades, which differ in their molecular structure and morphology, enabling a wide range of products that can be manufactured using different processing techniques. Each processing technique and application has specific material requirements, with the melt flow rate being a decisive material parameter for the suitability for different processing methods. Recyclates from mixed grades exhibit average properties (e.g. melt flow behaviour) of the grades they contain (Alvarado Chacon et al. 2020), which is why they are often used for other processes and less-demanding applications or with the addition of a high amount of additives and fillers. Therefore, sorting based on processing method is necessary to allow the production of recyclates with the needed processing and application properties.

To get an overview about the source material for sorting and recycling, this work deals with the analysis of different PP containing waste bales. The determination of the amount of PP and impurities (polymeric and foreign) as well as the proportion of differently processed PP types in the bales were the main focus of this work.

2 EXPERIMENTAL

Since for a recycler, PP waste is available in form of different types and qualities of PP waste bales (“pure” PP, PP mixed with other polymers), two “pure” PP bales (PP1, PP2), two mixed polyolefin bales (MPO1, MPO2) and a mixed PP-polystyrene bale (PP/PS) were investigated. From each waste bale samples of 5 to 10 kg material were taken and manually sorted according to polymer type and foreign materials. It was differentiated between target material (in this case

PP), side fractions (PE, PS for the PP/PS bales) and impurities (other polymers, foreign impurities), where foreign impurities included glass, metals, textiles, metallised films, etc. The obtained PP fraction was then further sorted according to the processing method of the individual parts. A distinction was made between extrusion blow moulding (EBM), injection moulding (IM), thermoforming (THF) and films/flexibles (FLEX). To investigate seasonal fluctuations, the described analysis was carried out four times a year. A scheme of the bale analysis is shown in Fig. 1 and typical examples of the above-mentioned processing classes can be found in Tab. 1.

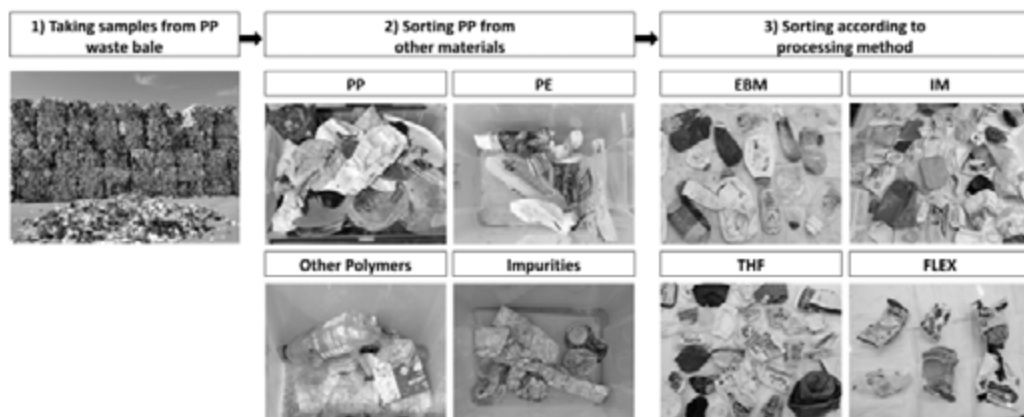


Fig. 1: Schematic of the bale analysis performed

Tab. 1: Examples of PP articles of each processing method class

Processing method	Examples
IM	Food container (ice cream, spreads) and lids, buckets
EBM	Detergent bottles, ketchup bottles, shampoo bottles
THF	Thin-walled plant pots, yoghurt cups, trays
FLEX	Pasta packaging, sweets wrapping, toys packaging

3 RESULTS

In Fig. 2 the amounts of the sorted fractions for different bales are shown, where the impurities include both the polymeric and the foreign impurities. As can be seen, the amount of PE in PP bales ranged between 0 to 13%. As expected, the MPO bales had a higher PE content (between 20 to 70%), with the MPO2 bales having the highest PE content. The proportion of other polymers in MPO bales was higher compared to the PP bales. In the PP/PS bales, the PS content ranged from 5 to 31% and the PE content from 0 to 15%. The proportion of impurities (other polymers and foreign materials) in the bales ranged from 0 to 44%, depending on the bale type and time of sampling. Comparison of different sampling times draws the attention to a significant seasonal variation in the composition of PP waste bales.

The further separation of the PP fraction according to the different processing types showed that IM is the predominant processing method, followed by EBM and THF, while only a small percentage of FLEX samples were found. Furthermore, the proportion of the processing classes was found to vary with sampling time (see example of PP1 bale for three sampling times in Fig. 3).

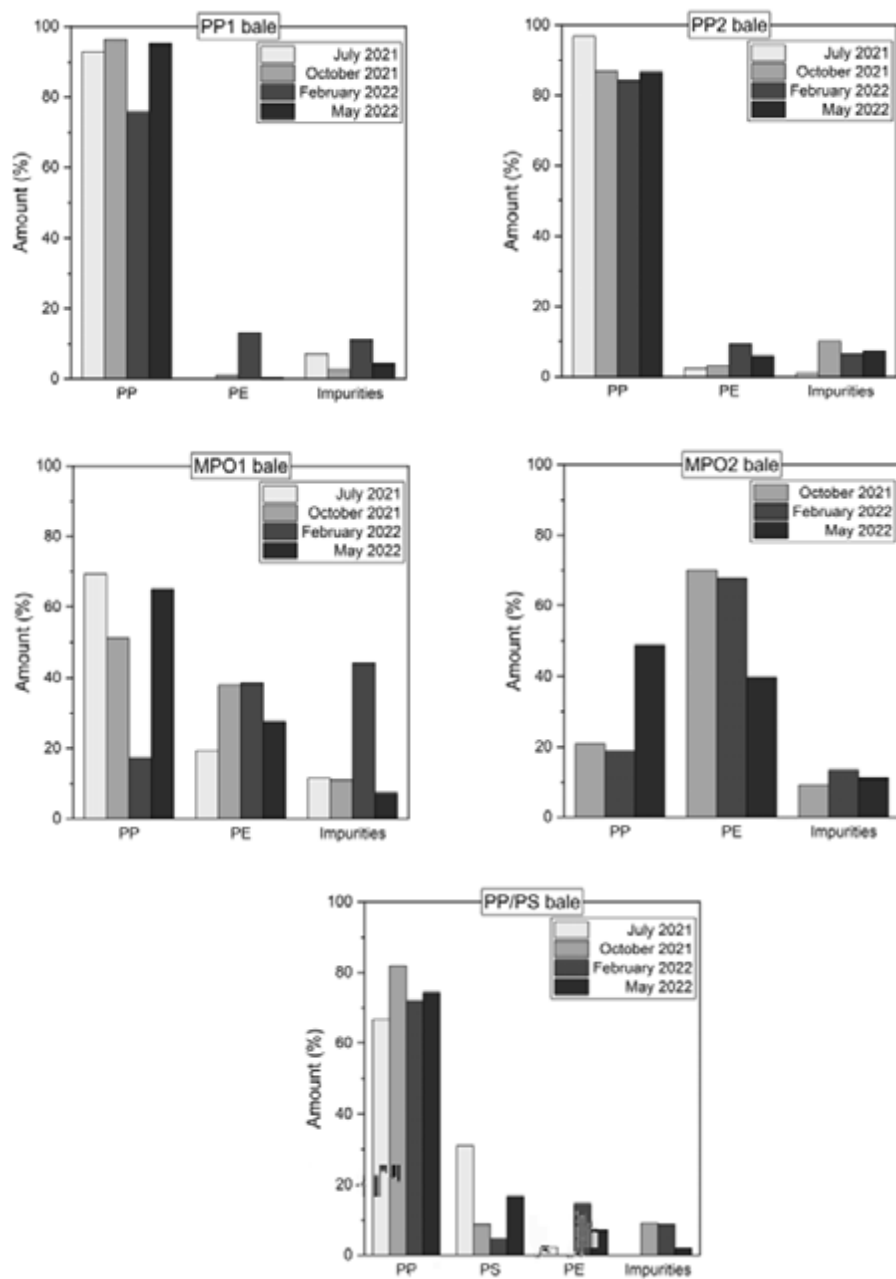


Fig. 2: Material composition of different PP containing waste bales

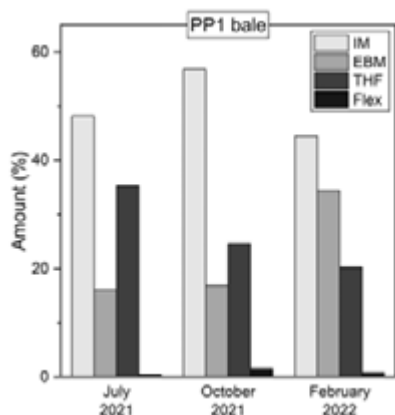


Fig. 3: Results of the sorting according to processing method shown on the example of the PP1 bale

4 CONCLUSION AND OUTLOOK

The bale analysis showed that PP bales contain up to 13% of PE. Some bales were found to have high levels of impurities, which would make it difficult to produce high-quality recycled products, as they can negatively affect the processability of the material and the performance of the produced product. However, with the existing sorting and recycling lines, it should already be possible to remove the PE and other polymers as well as foreign impurities, unless they are part of an inseparable multi-material component.

The proportions of the differently processed PP waste samples showed variations with the sampling time (season), meaning that the recyclates produced at each time of sampling would likely have shown different processability (i.e. melt flow behaviour). A solution to this problem could be achieved by enhanced sorting techniques that allow the sorting according to processing method in order to produce consistent and higher quality recyclates.

This work will serve as a starting point for an upcoming quality evaluation where different sorting criteria (mixed PP grades vs. sorted by processing method) will be assessed based on the performance of the thereof produced recyclates. In addition, the bale analysis will be continued to determine whether the seasonal variations in the proportions of the differently processed samples are random or reproducible.

5 ACKNOWLEDGEMENT

This research work was performed at the Polymer Competence Center Leoben GmbH (PCCL, Austria) within the framework of the COMET-program of the Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology and the Federal Ministry for Digital and Economic Affairs with contribution by PreZero Polymers Austria GmbH. The PCCL is funded by the Austrian Government and the State Governments of Styria, Lower Austria and Upper Austria.

REFERENCES

- Alvarado Chacon, F., Brouwer, M. T., Thoden van Velzen, E. U., & Smeding, I. W. (2020) *A first assessment of the impact of impurities in PP and PE recycled plastics*. Wageningen Food & Biobased Research, Wageningen.
- Plastics Europe (2021). *Plastics - the Facts 2021*.

Neue VDI Richtlinie 4095 stellt den Stand der Technik beim Kunststoffrecycling dar

R. Brüning¹, J. Wolf¹ & R. Maletz²

¹⁾ Dr. Brüning Engineering, Brake UG, Deutschland

²⁾ Technische Universität Dresden, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft, Pirna, Deutschland

KURZFASSUNG: Im VDI Normenausschuss wird derzeit eine neue Richtlinie zur Kreislaufführung von Kunststoffen erarbeitet. Sie richtet sich an alle Akteure im Wertstoffkreislauf und wird Handlungsempfehlungen beinhalten, um deren Arbeit zu vereinfachen und Hemmnisse abzubauen. Die große Menge an jährlich produzierten Kunststoffen weltweit in Höhe von 360 Millionen Tonnen und die damit verbundenen globalen Umweltprobleme zeigen die Notwendigkeit, einen möglichst großen Anteil gefahrlos und überwacht im Wirtschaftskreislauf zu halten. Die Richtlinie soll einen Beitrag zur Erhöhung des Rezyklateinsatzes liefern. Konkret werden in der Richtlinie entscheidende Begriffe definiert bzw. bestehende Definitionen entscheidender Begriffe zusammengestellt. Ziel ist es einen einheitlichen Sprachgebrauch im Markt für Rezyklate zu befördern, und dabei die unterschiedlichen gesetzlichen Definitionen zu berücksichtigen. Das übergeordnete Ziel der Zusammenstellung rechtlicher Vorgaben sowie der Definition von einheitlichen Begriffen, Recyclingqualitäten und Recyclingtechniken ist die Stärkung des Markts für Kunststoffrezyklate. Diesen soll so gegenüber den Primärkunststoffen zum Durchbruch verholfen werden.

1 AUSGANGSLAGE

Die weltweite Produktion von Kunststoffen erreichte im Jahr 2018 fast 360 Millionen Tonnen (Conversio Market & Strategy GmbH 2019). Fast 62 Millionen Tonnen, wurden in Europa produziert. In Bezug auf Kunststoffabfälle fielen in 2018 europaweit offiziell etwa 29 Millionen Tonnen an. Hinzu kommen Kunststoffabfälle, die nicht offiziell gesammelt und erfasst werden, sondern illegal in die Umwelt gelangen. Nur etwa 33 % der gesammelten Kunststoffabfälle werden einem stofflichen Recycling zugeführt. Die restlichen Mengen werden energetisch verwertet (fast 43 %) oder deponiert (fast 25 %). Kunststoffabfälle, die dem Recycling zugeführt werden, werden nicht nur in Europa behandelt. Fast 20 % davon werden ins Ausland verbracht, wo ggf. andere Umweltstandards vorherrschen als in Europa. Insgesamt gibt es daher beim Recycling von Kunststoffabfällen noch großen Handlungsbedarf und die Einsatzmengen von Rezyklaten müssen dringend erhöht werden.

Die Situation für Deutschland zeigt nachfolgende Tabelle. Bei den Quoten der stofflichen Verwertung über die verschiedenen Anwendungsfelder und Anfallsorte für Kunststoffe und deren Abfälle noch große Unterschiede bestehen. Insbesondere für die unzureichend verwerteten Kunststoffabfallströme will die Richtlinie zur Erhöhung der Rückführung beitragen.

Tab. 1: Anfallsorte der Kunststoffabfälle in Deutschland (im Jahr 2017), rot bedeutet dabei eine geringe stoffliche Verwertung, grün eine hohe stoffliche Verwertung, bearbeitet aus (Conversio Market & Strategy GmbH 2018)

Anfallsorte der Kunststoffabfälle in D		Verwertung insgesamt	stoffliche Verwertung	Anteil stofflicher Verwertung	Energetische Verwertung
		in 1.000 Mg	in 1.000 Mg		in 1.000 Mg
Gewerbliche Endverbraucher	Gewerbeabfälle über private Entsorger	1.197	319	27%	878
	Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle über öffentlich-rechtliche Entsorger (öRE)	217	0	0%	217
	Schredderbetriebe (nur Altkarosserien) incl. Autoverwerter & Reparaturwerkstätten	182	46	25%	136
	Sammel- und Verwertungssysteme für gewerbliche Verpackungen (auch Transport- und Umverpackungen)	418	269	64%	149
	Sonstige Sammlungs- und Verwertungssysteme	121	105	87%	16
	(AgPR, Kunststoffrohrverband, Dachbahnen, Rewindo etc.)				
Private Haushalte	Verkaufsverpackungen (Duale Systeme, herstellernetragene Rücknahmesysteme)	1.551	1.161	75%	390
	Restmüll Haushalte	1.011	0	0	1.011
	Sperrmüll Haushalte (z.B. Möbel, Teppiche etc.)	197	48	24%	149
	Wertstoffsammlung (an öRE abgegeben im Bringsystem)	63	32	51%	31
	E+E Schrott aus Privathaushalten, Gewerbe & Industrie (Rücknahme über öRE, Wertstoffhöfe, Handel & private Entsorger)	209	44	21%	165
Kunststoffproduzenten		66	46	70%	20
Kunststoffverarbeiter (Extrusions- Spritzgussabfälle aber auch aus Weiterverarbeitung)		883	803	91%	80
Gesamt		6.115	2.873	47%	3.242

Ziel der Richtlinie 4095 „Bewertung von Kunststoffen in der Kreislaufwirtschaft“ ist es, praxistaugliche und rechtskonforme Handlungsempfehlungen zu entwickeln, um die betroffenen Akteure in ihrer Arbeit zu unterstützen. Darüber hinaus soll sie Anreize setzen, rechtliche Vorgaben aus dem Produktions- und Entsorgungsbereich für Kunststoffe zu harmonisieren. Damit werden auch die aktuellen Bestrebungen der Europäischen Kommission begleitet, zum Beispiel die Überarbeitung der Kriterien zum Ende der Abfalleigenschaft für Kunststoffe (Orveillon 2022).

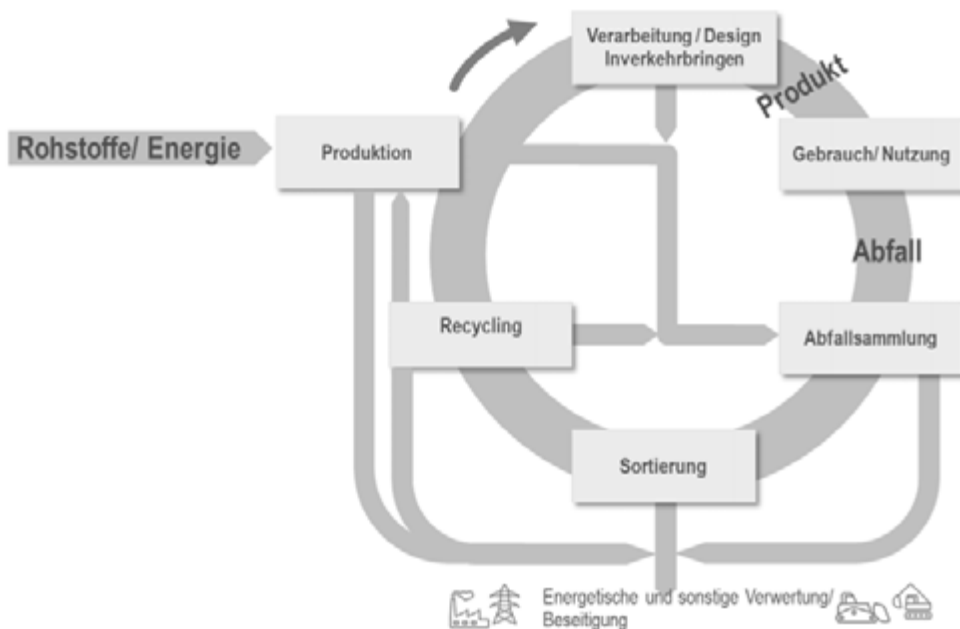


Abb. 1: Der Kunststoffkreislauf – es gilt, eine möglichst große Zirkulation zu erreichen mit geringen Erfassungs-, Aufbereitungs- und Qualitätssicherungsverlusten (Grafik: Conversio Market & Strategy GmbH)

2 NORMUNGSBEDARF

Das oben genannte Defizit hat u.a. die EU-Kommission erkannt, die 2018 ihre Kunststoffstrategie veröffentlicht hat (Europäische Kommission 2018). Diese ist als ein vorausgegangener Teil des EU-Kreislaufwirtschaftspaketes und des Green Deal (Europäische Kommission 2019) sehen und hat zum Ziel Design, Produktion, Gebrauch und Recycling von (Alt)kunststoffen in Europa hin zu mehr Nachhaltigkeit zu verändern. Durch den Green Deal und die EU-Kunststoffstrategie sollen u.a. das Recycling von Kunststoffen und der Einsatz von post-consumer Rezyklaten in neuen Kunststoffprodukten gefördert werden.

Während es einerseits in Politik und Wirtschaft unstrittig ist, dass der Rezyklateinsatz bei Kunststoffen erhöht werden sollte, gilt gleichzeitig der Grundsatz, dass umwelt- und gesundheitsschädliche Stoffe aus dem Wirtschaftskreislauf ausgeschleust werden müssen. Für verschiedene (Schad)stoffe (z.B. Flammschutzmittel), die in Altkunststoffen enthalten sein können, kann es ein Zerstörungsgebot beim Recycling geben oder Bedingungen, Beschränkung oder Verbote beim (Wieder)Inverkehrbringen z.B. in einem Kunststoffrezyklat.

3 DIE RICHTLINIE VDI4095

Die Richtlinie VDI 4095 soll dazu beitragen diese Herausforderung für das vermehrte Kunststoffrecycling zu überwinden. Die aktuelle Aufgabe des Richtlinienausschusses ist es daher einleitend die aktuelle Situation entlang der Kunststoffproduktions-, -gebrauchs- und -recyclingkette zu beschreiben und den Stand der Technik abzubilden. Zudem werden Methoden der ökologischen Bewertung von Kunststoffen in der Kreislaufwirtschaft adressiert.

Dem Ausschuss gehören Fachleute der gesamten Produktions- und Recyclingkette sowie aus Wissenschaft und Verwaltung an. Sie erarbeiten die Richtlinie, die dazu beitragen soll, den Rezyklateinsatz bei Kunststoffen weiter zu fördern.

Konkret werden in der Richtlinie entscheidende Begriffe definiert bzw. bestehende Definitionen entscheidender Begriffe zusammengestellt. Ziel ist es einen einheitlichen Sprachgebrauch im Markt für Rezyklate zu befördern, und dabei die unterschiedlichen gesetzlichen Definitionen zu berücksichtigen.

Für die Produktions- und Gebrauchsphase werden in der Richtlinie wichtige Anwendungsfelder für Kunststoffe sowie die Charakteristiken der dort eingesetzten Polymere beschrieben. In Deutschland wurden z.B. 2019 mehr als 12 Millionen Tonnen Kunststoffe verbraucht (Conversio Market & Strategy GmbH 2020). Dies beinhaltet sowohl Primärprodukte als auch Rezyklate. Etwa 27 % dieser Kunststoffe wurden für Verpackungen verbraucht und ca. 24 % im Baubereich. Mit einigem Abstand folgen als weitere Anwendungsfelder der Fahrzeug- und Elektronikbereich. Die Beschreibung der Anwendungsfelder ist wichtig, um aufzuzeigen zu können, welche Recyclingqualitäten für welche Polymerströme in welchen Mengen benötigt werden. So soll die Richtlinie dazu beitragen die Recycling-, Produktions- und Gebrauchsphase besser aufeinander abzustimmen.

In der Richtlinie wird weiterhin betrachtet, mit welchen Recyclingtechniken die benötigten Qualitäten erreicht werden können. Überblicksartig werden in der Richtlinie z.B. verschiedene Verfahren des mechanischen / werkstofflichen, physikalischen, chemischen und enzymatischen / biologischen Recyclings (von v.a. Biokunststoffen) sowie weitere rohstoffliche Verwertungsverfahren betrachtet. Dabei werden die wichtigsten Vor- und Nachteile der Verfahren sowie ihre Eignung für verschiedene Polymerarten gegenübergestellt und bewertet.

Ein weiterer Schwerpunkt der Richtlinie liegt auf der Untersuchung und Beschreibung der Schnittstelle zwischen Kunststoffprodukten und Kunststoffabfällen. Die rechtlichen Voraussetzungen sowie entsprechende Handlungsempfehlungen für das Erreichen des Endes der Abfalleigenschaft und das Erreichen des Produktstatus werden zusammengestellt.

4 ZIELSTELLUNG UND FORTFÜHRUNG

Das übergeordnete Ziel der Zusammenstellung rechtlicher Vorgaben sowie der Definition von einheitlichen Begriffen, Recyclingqualitäten und Recyclingtechniken ist die Stärkung des Markts für Recyclingkunststoffe durch ein einheitliches Handlungswissen. Den Kunststoffrezyklaten soll so gegenüber den Primärkunststoffen zum Durchbruch verholfen werden.

Während in der VDI Richtlinie 4095 aktuell die zuvor beschriebenen Schwerpunkte abgebildet werden, ist zukünftig geplant, in weiteren Blättern auf einzelne technische Aspekte und Verfahren vertieft zu einzugehen.

LITERATUR

- Conversio Market & Strategy GmbH (2018). Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017 - Verbandsstudie.
Conversio Market & Strategy GmbH (2019). Global Plastics Flow 2018.
Conversio Market & Strategy GmbH (2020). Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019 - Verbandsstudie.
Europäische Kommission (2018). Eine europäische Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft.
Europäische Kommission (2019). Der europäische Grüne Deal.
Orveillon, G. P. (2022). Scoping possible further EU-wide end-of-waste and by-product criteria. Luxemburg: Joint Research Group der Europäischen Kommission.

Erfolgsnachweis einer Jet-Grouting Sanierung über Konzentrationsmessungen

P. Freitag¹, K. Kljajic² & T.G. Reichenauer³

¹⁾ Keller Grundbau Ges.m.b.H, Engineering, Wien, Österreich

²⁾ Universität für Bodenkultur, Institut für Bodenforschung, Wien, Österreich

³⁾ AIT Austrian Institute of Technology, Bioresources, Tulln an der Donau, Österreich

KURZFASSUNG: Mineralöle stellen eine häufig anzutreffende Kontamination im Untergrund dar. Das können klassische Altlasten, aber auch rezente Verschmutzungen nach Unfällen oder technischen Gebrechen sein. Oft ist eine Immobilisierung das Mittel der Wahl zur Sanierung beziehungsweise Sicherung. Die Frage, ob Oxidationsmittel helfen können das Immobilisierungsergebnis zu verbessern, ist Kern dieses Beitrags. In Batch- und Säulenversuchen wurde dazu Material aus einem realen Schaden untersucht, und die Ergebnisse im Hinblick auf verbleibende Stoffmengen und Effekte während der eigentlichen Arbeiten interpretiert. Dabei zeigte sich, dass sowohl der Einsatz von Oxidationsmitteln als auch die Versuche an sich sinnvolle Ergänzungen eines Sanierungsprojektes darstellen.

1 IMMOBILISIERUNG VON MINERALÖLSCHÄDEN

Immobilisierung mittels Zementsuspension ist eine unter vielen Sanierungsmethoden (Weisgram et al. 2017). Abhängig vom eingesetzten Einbringungsverfahren fallen dabei jedoch kontaminierte Abfälle in Form von Bohrschlämmen an. Bei einem Dieselölschaden in Oberösterreich, verursacht durch eine undichte Leitung, wurde dazu das Düsenstrahlverfahren (DSV) eingesetzt. Im Zuge einer Masterarbeit wurde dabei untersucht, ob durch die Zugabe von Oxidationsmitteln positive Effekte erzielt werden können. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Schadstoffbelastung des Rücklaufs und damit gleichzeitig dem Körper im Boden sowie Mobilisierungseffekte während der Installation gelegt.

2 VERSUCHSPROGRAMM UND ERGEBNISSE

Batch- und Säulenversuche, zweitens mit umströmten DSV-Körpern, sollten dazu dienen, den Mineralölkohlenwasserstoff (MK)-Gehalt nach beziehungsweise während der Arbeiten zu ermitteln. In beiden Fällen wurde der KW-Index gemessen.

Das Probematerial wurde in einer realen Altlast gewonnen, musste jedoch aufgrund sehr niedriger Schadstoffkonzentrationen mit frischem Diesel gespiked werden.

Verglichen wurden zement-immobilisierte Bodenproben und solche, bei denen zusätzlich Kaliumpermanganat (KMnO_4) als Oxidationsmittel beigemischt wurde.

Bei den Batchversuchen, die im Hinblick auf das Sanierungsziel „Immobilisierung“ durchgeführt wurden, wurde nach erfolgter Durchhärtung das Material aufbereitet und untersucht. Es zeigten sich nur geringe – nicht signifikante – Unterschiede zwischen KMnO_4 -behandelten und zement-immobilisierten Proben.

Bei den Säulenversuchen waren die Ergebnisse differenzierter. Es konnte gezeigt werden, dass mit KMnO_4 behandelte Säulen während der Installation deutlich geringere KW-Gehalte im Abfluss aufwiesen als immobilisierte, beziehungsweise unbehandelte Bodenproben (Abb. 1).

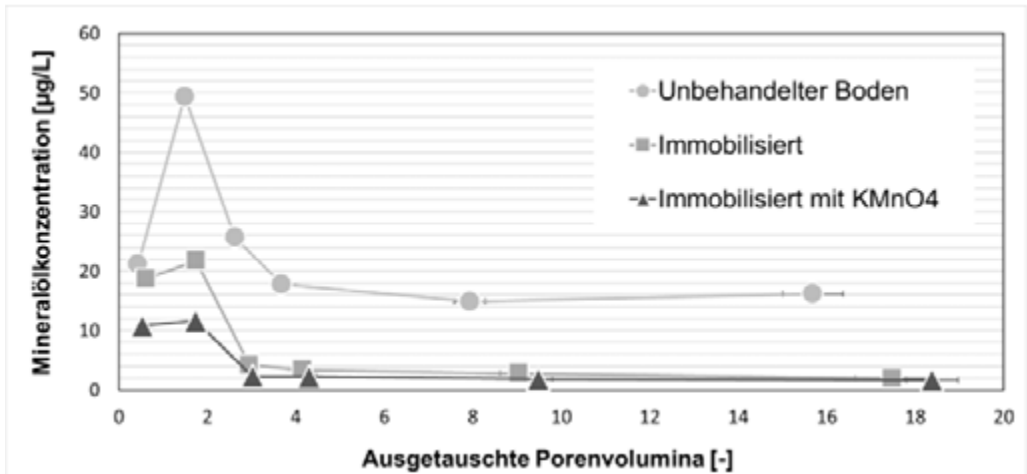


Abb. 1: MK-Konzentrationsverlauf der Säulenversuche

3 SCHLUSSFOLGERUNG - ZUSAMMENFASSUNG

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass während des Einbaus die Zugabe von Oxidationsmittel Sinn macht. Die Belastung des Bohrschlamms und daraus resultierende Deponie- bzw. Behandlungskosten können merklich reduziert werden.

Des Weiteren können – ein robustes Grundwasserströmungsmodell vorausgesetzt – die Ergebnisse der Säulenversuche zum Führen eines Erfolgsnachweises herangezogen werden. Dazu ist es notwendig die Konzentrationen auf die umströmte Fläche der Säule umzulegen. Dann lassen sich Konzentrationen im Feld prognostizieren und mit *in situ* gemessenen Werten vergleichen. Übersteigen diese einen Erwartungswert, liegt der Verdacht eines unbehandelten Bereichs nahe, der dann aufgesucht und behandelt werden kann.

LITERATUR

Weisgram, M., Moser, B., Dörrie, T., Döberl, G., & Müller-Grabherr, D. (2017) MKW-Kontaminierte Standorte. Wien: Umweltbundesamt GmbH.

Bestimmung des elementaren Kohlenstoffs in Feststoffproben zur Beurteilung laut Deponieverordnung – ein Lösungsvorschlag

O. Mann¹, S. Coskuner¹, T. Klinger¹, F. Maringer¹, L. Sappl¹, M. Sappl¹, M. Gazetovici¹, K. Wruss¹, W. Wruss¹ & G. Sigmund²

¹⁾ ESW Consulting Wruss ZT GesmbH, Wien, Österreich

²⁾ Department für Umweltgeowissenschaften, Universität Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Zur Bestimmung des elementaren Kohlenstoffs in Abfallproben findet die DIN EN 19539 immer häufiger Anwendung. In dieser Norm wird eine temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs in drei Fraktionen beschrieben, den TOC400, den ROC und den TIC900. Dabei soll sich der elementare Kohlenstoff in der ROC-Fraktion wiederfinden. Da sich der pyrogene Kohlenstoff, welcher für die Ausnahmeregelung der Deponieverordnung bestimmt werden soll, aber über den gesamten Temperaturbereich verteilt, sollte diese Methode nicht zur Beurteilung des elementaren Kohlenstoffs laut Deponieverordnung herangezogen werden. In der vorliegenden Arbeit wird ein adaptiertes Pyrolyse-Verfahren vorgestellt, welches für diese Bewertung besser geeignet ist.

1 EINLEITUNG

Laut Deponieverordnung 2008 (DVO) ist die Ablagerung von Abfällen verboten, deren Anteil an organischem Kohlenstoff (TOC) im Feststoff mehr als fünf Masseprozent beträgt. Ausgenommen sind Abfälle, deren Kohlenstoffgehalt aus elementarem Kohlenstoff, Kohlen- oder Koksanteilen resultiert, sofern es sich nicht um beladene Aktivkohle oder beladenen Aktivkoks handelt, wenn diese Abfälle in einer Deponie für nicht gefährliche Abfälle abgelagert werden (Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft 2008). Durch die Ablagerung organischer Abfallstoffe können durch mikrobiologischen Abbau Säuren entstehen, welche aus deponierten Abfällen Schwermetalle lösen, und diese dadurch in die Umwelt tragen (Marzi et al. 2017). Durch den biologischen Zerfall können erhöhte TOC-Gehalte in deponierten Abfällen zur Bildung von Deponiegasen, wie zum Beispiel Methan, führen. Diese Gase können durch ihre leichte Entzündbarkeit ein erhöhtes Gefahrenpotential entwickeln und zu einem Brand oder einer Explosion führen. Weiters ist Methan ein Treibhausgas und trägt zum Klimawandel bei (Jezierski 2015). Der elementare Kohlenstoff (EC) ist einem mikrobiologischen Abbau aber nicht zugänglich und hat somit keinen negativen Einfluss auf den Deponiekörper.

Erst seit dem Jahr 2016 gibt es die DIN EN 19539, welche sich mit der Analyse des EC beschäftigt. In dieser Methode wird eine temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs in drei Fraktionen beschrieben, den TOC400, den ROC und den TIC900. Dabei soll sich der EC in der ROC-Fraktion wiederfinden, welche jedoch nicht zur Bestimmung des elementaren Kohlenstoffs laut Deponieverordnung 2008 herangezogen werden kann, da sich die Verbrennungstemperaturen der verschiedenen Vertreter des EC über den gesamten Bereich vom TOC400 bis hin zum TIC900 erstrecken. Außerdem verbrennen viele organische Komponenten ebenfalls im ROC, wie z.B. Cellulose, Phthalate oder Huminsäuren. Durch ein reines TC-Screening nach DIN EN 19539 lässt sich also keine eindeutige Unterscheidung zwischen dem TOC und EC durchführen.

In dieser Arbeit soll ein Lösungsvorschlag für die Bestimmung des EC laut Deponieverordnung 2008 präsentiert werden. Grundlage dafür bildet das bereits vielfach eingesetzte Pyrolyse-Verfahren. Hierbei wird bei höheren Temperaturen im Stickstoffstrom der organisch gebundene Kohlenstoff ausgetrieben und entfernt, ebenso wie vorhandene Carbonate (TIC). Zurückbleiben sollte lediglich der EC, welcher durch eine anschließende Verbrennung unter oxidativen Bedingungen bestimmbar ist. Durch die Kombination einer pyrolytischen Vorbehandlung der Probe mit der temperaturabhängigen Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs gemäß DIN EN 19539 können die

unterschiedlichen Arten des elementaren Kohlenstoffs wie Braun-, Stein- und Aktivkohle sowie Graphit bestimmt werden. Danach können die einzelnen Anteile des elementaren Kohlenstoffs subsummiert werden. Dieses Verfahren wurde anhand von zahlreichen Realproben evaluiert und mit den Verfahren der DIN EN 19539 sowie einem rein rechnerischen Ansatz verglichen (Mann, et al., submitted).

1.1 Bestimmung des elementaren Kohlenstoffes nach Pyrolyse

Die Differenzierung zwischen abbaubarem organischen Kohlenstoff (AOC) und EC in Rostaschen mit Hilfe der Pyrolyse-Technik wurde bereits mehrfach untersucht und optimiert (Kowalczyk et al. 1995) (Marzi et al. 2017). Anlehnend an diese Methoden wurde die homogene Probe bei 980°C für 5 Minuten unter Stickstoffatmosphäre thermisch vorbehandelt, wodurch der TOC entfernt wurde. Danach wurde der zurückgebliebene EC bei einer anschließenden Verbrennung der Probe im Sauerstoffstrom freigesetzt und mit dem temperaturgesteuerten Screening-Verfahrens nach DIN EN 19539 vermessen, um den verbliebenen TOC400-, ROC- und TIC900-Anteil zu bestimmen.

Anhand von 26 Mischstandards aus Graphit, Steinkohle, Aktivkohle, Phthalat, Huminsäure, Cellulose und Carbonat wurden die Wiederfindungsraten des elementaren und organischen Kohlenstoffes bestimmt. Die Proben wurden entsprechend vorbehandelt und danach gemäß DIN EN 19539 vermessen. Für die Auswertung wurden alle Fraktionen addiert und der gesamte Kohlenstoff (TC) berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 dargestellt.

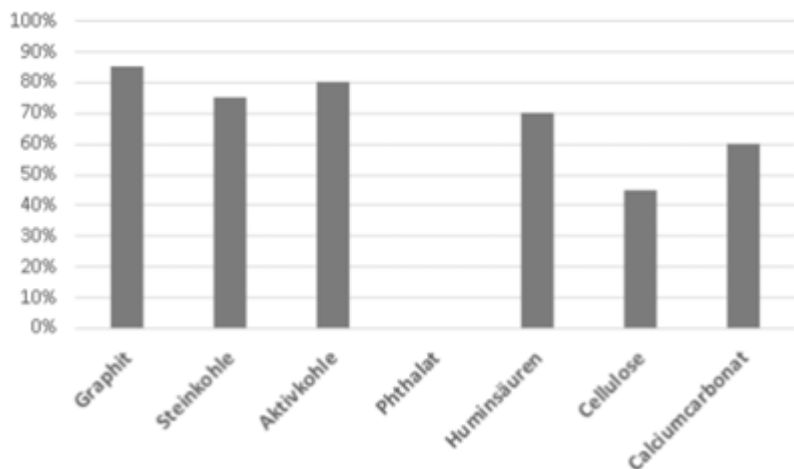


Abb. 1: Ergebnisse von 26 Mischstandards mit unterschiedlichen Mischungen aus elementarem, organischem und anorganischem Kohlenstoff nach Messung mittels Pyrolyse-Verfahren. Theoretische Soll-Wiederfindungsraten bei Graphit, Steinkohle und Aktivkohle: 100 %, bei Phthalat, Huminsäuren, Cellulose und Calciumcarbonat: 0 %

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der elementare Kohlenstoff, wie z.B. Graphit, Steinkohle und Aktivkohle, gut mit Hilfe der Pyrolyse-Technik erfasst werden kann. Die organischen Verbindungen werden bei der Pyrolyse aber sehr unterschiedlich und teilweise nur unvollständig entfernt. Auch die Carbonate werden während der Pyrolyse nur teilweise umgesetzt.

1.2 Adaptiertes Pyrolyse-Verfahren

Da die Pyrolyse grundsätzlich gut geeignet ist den elementaren Kohlenstoff zu erfassen, wurde die Pyrolyse-Technik als Probenvorbereitungsschritt für eine modifizierte Methode gewählt. An zwei Aliquoten einer Probe wurde das temperaturgesteuerte Screening-Verfahren gemäß DIN EN 19539 durchgeführt, einmal direkt und einmal nach pyrolytischer Vorbehandlung. Zusätzlich wurde der TOC aus dem Differenzverfahren gemäß ÖNORM EN 15936 und der TIC gemäß ÖNORM L 1084 bestimmt.

Da Graphit zur Gänze im TIC900 verbrennt, kann aus der Differenz des TIC900 und des TIC gemäß ÖNORM L 1084 die Graphit-Konzentration berechnet werden. Aus der pyrolysierten Probe wird dann die Summe aus den Fraktionen TOC400 und ROC errechnet und mit dem berechneten Graphit-Anteil addiert, um den elementaren Kohlenstoff zu ermitteln. Mit dieser Vorgehensweise ist eine exakte Bestimmung des Graphit- sowie des Carbonat-Anteils möglich.

Limitierend sind weiterhin hohe Gehalte an organischen Verbindungen, welche beim Pyrolyse-Verfahren oftmals nur unvollständig entfernt werden. Bei sehr humusreichen Proben, wie z.B. Torf, liefert das Pyrolyse-Verfahren deutliche Überbefunde bezogen auf den elementaren Kohlenstoff. Zur Plausibilitätsprüfung sollte daher ebenfalls der Glühverlust bestimmt und das TOC:GV-Verhältnis berechnet werden. Ein TOC:GV-Verhältnis $< 0,50$ zeigt das Vorhandensein von viel Organik an, während ein TOC:GV-Verhältnis $> 0,70$ auf das Vorhandensein von relevanten Mengen an elementarem Kohlenstoff hindeutet.

Dieses Verfahren wurde an 118 Realproben getestet und im Vergleich mit den Methoden der DIN EN 19539 (Verfahren A und B; Wechsel zwischen oxidativen und nicht-oxidativen Trägergasen) und einem reinen Rechenansatz über das TOC:GV-Verhältnis evaluiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt.

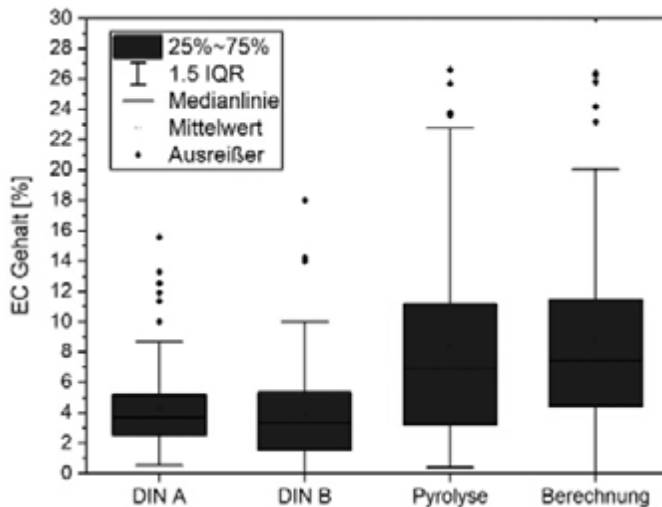


Abb. 2: Boxplots der Ergebnisse der EC-Bestimmung an 118 Realproben. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem adaptierten Pyrolyse-Verfahren und der Berechnung über das TOC:GV-Verhältnis. Whiskers entsprechen dem 1,5 fachen Interquartilsabstand (IQR)

Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung bei den Ergebnissen des EC zwischen dem adaptierten Pyrolyse-Verfahren und dem Rechenansatz. Die beiden DIN-Verfahren zeigen im Vergleich signifikant niedrigere Konzentrationen an elementarem Kohlenstoff. In Bezug auf eine Unterschreitung des 5 %-TOC-Grenzwertes laut Deponieverordnung nach Abzug des EC-Gehaltes ergibt sich ebenfalls ein klares Bild. Mit Hilfe der DIN-Verfahren werden 48 % bzw. 41 % der Proben als „deponierbar“ eingestuft, während es beim Pyrolyse- bzw. Berechnungsverfahren 88 % bzw. 83 % wären (siehe Abbildung 3).

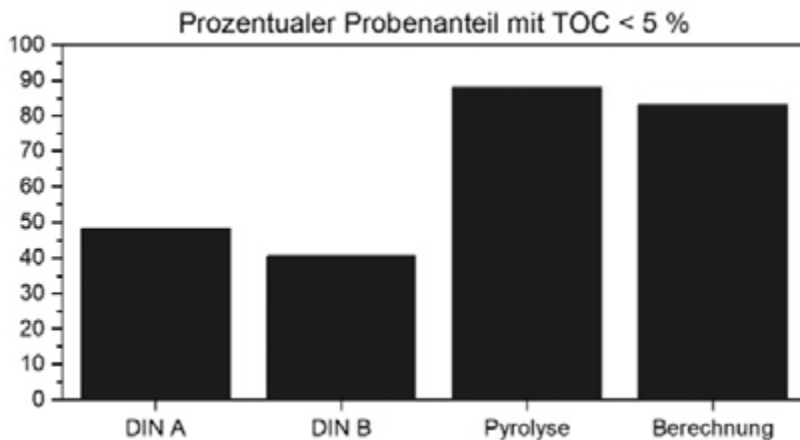


Abb. 3: Anzahl der Proben in %, welche nach entsprechender Analytik und Abzug des Gehaltes an elementarem Kohlenstoff den TOC-Grenzwert der Deponieverordnung von 5 % unterschreiten

Bei den DIN-Verfahren ist der EC in den meisten Fällen also deutlich niedriger als beim adaptierten Pyrolyse-Verfahren, was daran liegt, dass bei den DIN-Verfahren der Graphit-Anteil nicht erfasst wird und etliche Kohle-Arten, wie z.B. Holz- und Braunkohle, nur schlecht bis gar nicht erfasst werden. Eine Überprüfung der Methoden anhand von Reinsubstanzen bestätigte dies, wie in Tabelle 1 gezeigt.

Tab. 1: Bestimmung des elementaren Kohlenstoffes an verschiedenen Kohleproben. Die Angaben beziehen sich auf %C ausgedrückt als elementarer Kohlenstoff

	DIN A	DIN B	Pyrolyse	Berechnung
Braunkohle	-	-	29	37
Steinkohle	10	3,4	54	51
Aktivkohle	73	64	64	66

Nur der Pyrolyse-Ansatz vermag die Braun- sowie Steinkohle richtig zu quantifizieren. Bei höheren Konzentrationen an organischer Substanz kommt es aber zu Überbefunden bei der Pyrolyse, durch die Bildung aromatischer Cluster aus TOC-Bestandteilen (Verkockung). Dieses Phänomen kann aber sehr gut anhand des TOC:GV-Verhältnisses erkannt und kontrolliert werden. Bei den 118 gemessenen Realproben kam es bei 7 Feststoffen zu einer deutlichen Überschätzung des EC durch einen zu hohen Anteil an Organik. In allen Fällen lag das TOC:GV-Verhältnis bei $\leq 0,55$ (siehe Abbildung 4).

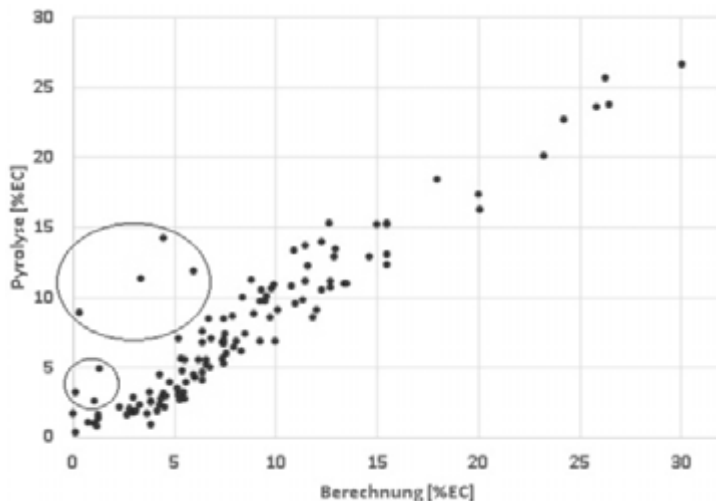


Abb. 4: Korrelation der Bestimmung des elementaren Kohlenstoffes mittels adaptierten Pyrolyse-Verfahren und Berechnung. Die markierten Punkte zeigen Proben, bei denen die Pyrolysetechnik zu einer Überschätzung des elementaren Kohlenstoffes geführt hat, aufgrund eines hohen Gehaltes an organischen Substanzen

2 ZUSAMMENFASSUNG

Der ROC nach DIN EN 19539 sollte nicht zur Bestimmung des elementaren Kohlenstoffes laut Deponieverordnung 2008 herangezogen werden, da sich die Verbrennungstemperaturen der verschiedenen Vertreter des EC über den gesamten Bereich vom TOC400 bis hin zum TIC900 erstrecken. Eine Anwendung der DIN EN 19539 zur Bestimmung des EC in Abfallproben würde in weiterer Folge einer Bestimmung des TOC bei 400°C gleichkommen. Dies wiederum steht im Gegensatz zu den bestehenden TOC-Bestimmungen.

Zur Differenzierung des EC bedarf es Probenvorbereitungsschritte, um den organischen Kohlenstoff im Vorfeld aus der Probe zu entfernen. Bei der Pyrolyse verbleiben die meisten EC-Arten zwar in der Probe, jedoch werden höhere Gehalte an organischer Substanz, wie z.B. Huminsäuren und Cellulose, nur unvollständig entfernt und/oder teilweise in EC umgewandelt (Verkokung). Die Carbonate werden bei der Pyrolyse auch nur unvollständig umgesetzt, was insgesamt zu einer schlechten Reproduzierbarkeit führt. Im Rahmen dieser Arbeit konnte mit einer Kombination aus Pyrolyse und temperaturgesteuerten Screening-Verfahren gemäß DIN EN 19539, sowie einer adaptierten Berechnung, die Aussagerichtigkeit der Pyrolyse-Technik deutlich verbessert werden. Zur Beurteilung des elementaren Kohlenstoffes im Sinne der Deponieverordnung ist es jedoch ratsam zusätzlich den Glühverlust heranzuziehen. Bei Abfallproben mit einem TOC:GV-Verhältnis $< 0,5$ ist mit hohen Organik- und niedrigen EC-Gehalten zu rechnen. Ein TOC:GV-Verhältnis $> 0,7$ deutet auf das Vorhandensein von relevanten Mengen an elementarem Kohlenstoff hin, wodurch das adaptierte Pyrolyse-Verfahren sehr gut anzuwenden ist.

LITERATUR

- DIN EN 19539 - Untersuchung von Feststoffen - Temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffes (TOC400, ROC, TIC900). (2016).
- DIN EN ISO 10693 - Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Carbonatgehaltes - Volumetrisches Verfahren. (2014).
- Jezierski, S. (2015). Sichere Erfassung der verschiedenen Kohlenstoffspezies in Feststoffen – mit richtiger Chemie zu richtigen Ergebnissen. *Österreichische Chemie Zeitschrift*.
- Kowalczyk, U., Schirmer, U., & Truppat, R. (1995). Differenzierung zwischen dem gesamten organischen Kohlenstoff (TOC) und dem abbaubaren organischen Kohlenstoff (AOC) in Rostaschen von Verbrennungsanlagen für Hausmüll und hausmüllähnliche Abfälle. *VGB Kraftwerkstechnik* 75 Heft 11.

- Mann, O., Coskuner, S., Klinger, T., Maringer, F., Sappl, L., Sappl, M., . . . Sigmund, G. (submitted). Bestimmung des elementaren Kohlenstoffs in Feststoffproben zur Beurteilung laut Deponieverordnung. *altlasten spektrum*.
- Marzi, T., Nowara, N., & Bruisten, M. (2017). Direktmessung zur Differenzierung zwischen abbaubarem organischen Kohlenstoff (AOC) und elementaren Kohlenstoff in Anlehnung an die VGB-Methode. *Erich Schmidt Verlag*.
- ÖNORM EN 15936 - Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung. (2012).
- ÖNORM L 1084 - Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von Carbonat unter Berücksichtigung von Luftdruck und Temperatur. (2016).
- Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, U. u. (2008). BGBl. II Nr. 39/2008. *Deponieverordnung 2008*.

Ölbindende Vliese zur Entfernung von Mineral- und Pflanzenöl aus Wasser

M. Lackner¹, K. Putz², M. Plank³ & A. Loibner⁴

¹⁾ FH Technikum Wien, Fakultät Industrial Engineering, Wien, Österreich

²⁾ ensowa GmbH, Schäffern, Österreich

³⁾ Spitzer GesmbH, Vorau, Österreich

⁴⁾ BOKU, Department IFA-Tulln, Institut Umweltbiotechnologie, Geobiotechnology and Environmental Chemistry, Tulln, Österreich

KURZFASSUNG: Es gibt eine Reihe an Möglichkeiten zur Öl/Wasser Trennung, allerdings sind diese nicht immer unmittelbar im Feld einsetzbar. Im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes wurde untersucht, inwieweit sich mit ölbindenden Vliesen ein robustes, kostengünstiges Verfahren zur Abtrennung von Mineralöl bzw. Pflanzenöl sowie Gemische beider aus Wasser entwickeln lässt. Hintergrund war die Notwendigkeit, aus der *in-situ* Bodenwäsche resultierende Wasser-Öl-Gemische, teilweise noch emulgiert, in größeren Mengen vor Ort zu trennen. Unterschiedliche Ausführungsformen, teilweise im Satz- und teilweise im kontinuierlichen Betrieb, wurden realisiert und nach ersten Laborversuchen auch im Feld getestet. Vliese aus Polyolefinen und Polyestern kamen zum Einsatz, mit einem Flächengewicht von 220 bis 400 g/m² und einer Ölbindekapazität des 5-15fachen Flächengewichts. Beim Abtrennen von Mineralölkohlenwasserstoffen (MÖL) und Pflanzenöl (PÖL) aus Wasser, sowohl in Phase als auch emulgiert, zeigten sich Restölgehalte im Wasser von 0,5 bis 1,5 mg/l sowie ein Wassergehalt im Öl von max. 2%. Anhand der Altlast N77 wurde auch untersucht, wie sich mineralölbelaftetes Grundwasser aufreinigen lässt. Bei Abzug von Grundwasser wurden folgende Restölgehalte gemessen:

- MÖA: 0,8 mg/l
- MÖA + SBF: 0,3 mg/l
- SBF: 0,4 mg/l (MÖA = Mineralölabscheider, SBF = Schrägbettfilter mit Vlies).

Bei Abzug von Emulsion aus dem Boden (10% PÖL in Wasser, mit MÖL kontaminiert) ergaben sich diese Restölgehalte (gesamt):

- MÖA: 0,8 mg/l
- MÖA + SBF: 0,7 mg/l
- SBF: 0,6 mg/l

Die Machbarkeit der Grundwasseraufreinigung wurde mit 511m³ kontaminiertem Grundwasser demonstriert. Der Schrägbettfilter erlaubt einen kontinuierlichen Betrieb. Nach Laborversuchen nahm die Beladepazität des Vlieses nach 20 Zyklen um weniger als 5% ab. Dies wurde in den Feldversuchen ebenfalls bestätigt.

Gerade in Kombination mit einem vorgeschalteten Mineralölabscheider bietet ein Schrägbettfilter mit ölabsorbierendem Vlies, welches als Endlosbahn geführt und regelmäßig ausgedrückt wird, Vorteile, indem der Restölgehalt im Ablauf um 0,1 bis 0,2 mg/l geringer ist als bei einem Ölabscheider im alleinigen Betrieb. Das Verfahren ist robust gegen Verunreinigung durch Sand und kann in Zukunft helfen, die Öl/Wasser-Trennung im Feld zu vereinfachen und effizient zu gestalten.

1 DURCHGEFÜHRTE VERSUCHE

Die Arbeiten aus 2020 (Lackner et al. 2020) im Rahmen des Projekts „Aufreinigungskaskade“ wurden im Feld fortgesetzt. Dies erfolgte am ehem. Standort der Petroleumfabrik Drösing, der Altlast N77. Siehe dazu auch (Lackner et al. 2022) und (Loibner 2022).

1.1 Trennen von Öl/Wasser mittels Vliesen im Rahmen einer Bodenwäsche mit Pflanzenöl

Vliese aus Polyolefinen und Polyestern, welche Öle binden können, kamen im Feldversuch zum Einsatz, mit einem Flächengewicht von 220 bis 400 g/m² und einer Ölbindekapazität des 5-15fachen Flächengewichts. Es zeigte sich, dass sie durch Auspressen regenerierbar (neu zu beladen) sind. Die Vliese nehmen selektiv Öl auf (sowohl Mineralöl als auch Pflanzenöl), jedoch kein Wasser. Die Laborversuche wurden mit Motoröl begonnen (SAE W40, SAE W30). Nach dem Bau mehrerer Modelle, die kontinuierlich und diskontinuierlich arbeiteten, wurde ein finaler Prototyp entwickelt, bei dem das Vlies durch ein Öl/Wasser-Gemisch gezogen wird und dabei das Öl herausscholt, siehe Abb. 1.



Abb. 1: Versuche zur Ölabtrennung mit Vliesen mit 1m³ Prototyp auf Basis eines IBC. Restölgehalt im Wasser 0,5 bis 1,5mg/l, Wassergehalt im Öl max. 2%

Für den Feldversuch wurde das Vlies zu einem Endlosband vernäht und in einer eigens gebauten Anlage eingesetzt. Wie im Abb. 1 zu sehen ist, wird das Vlies im Prototyp nur einmal benutzt. Im finalen Setup (Abb. 2) kann das Vlies durch wiederholtes Auspressen und Neu-Beladenwerden im Kreis geführt werden. Eine Nachspannvorrichtung sorgt dafür, dass leichte Dehnungen ausgeglichen werden. Der finale Schrägbettfilter (SBF) für den Feldversuch in Drörsing ist in Abb. 2 zu sehen:



Abb. 2: Links: Aufbau des Schrägbettfilters (SBF) auf Ergebnissen des Scale-up. Rechts: Bei den Feldversuchen. Zu erkennen sind im Vordergrund 2 IBC mit Pflanzenöl/Mineralöl, die mittels Schrägbettfilter abgetrennt werden konnten aus den geförderten 511m³ Grundwasser. Dieser Versuch zeigte eindrucksvoll die prinzipielle Machbarkeit des Verfahrens. Links hinten der SBF, der in 2 IBC platziert wurde. Rechts neben dem Autor befindet sich einer der Labor-Prototypen

Bei Abzug von Grundwasser im Feldversuch ergaben sich beim Einsatz dieses SBF folgende Ergebnisse (SBF = Schrägbettfilter, MÖA = Mineralölabscheider):

Restölgehalte nach den Verfahren

MÖA:	0,8 mg/l
MÖA + SBF:	0,3 mg/l
SBF:	0,4 mg/l

Damit liefert der SBF bessere Werte als ein klassischer Mineralölabscheider (MÖA). Die Kombination aus MÖA und SBF ergab sogar noch geringere Werte an Restölgehalt, lediglich 0,3 mg/l. Beim Einsatz des SBF zum Trennen von PÖL/MÖL in Wasser Emulsion zeigten sich diese Leistungsdaten (Restölgehalte (gesamt) nach den Verfahren):

MÖA:	0,8 mg/l
MÖA + SBF:	0,7 mg/l
SBF:	0,6 mg/l (SBF = Schrägbettfilter, MÖA = Mineralölabscheider)

Nach Laborversuchen nahm die Beladekapazität des Vlieses nach 20 Zyklen um weniger als 5% ab. Dies wurde in den Feldversuchen ebenfalls bestätigt. Damit sind die Werte für im Wasser verbleibendes Öl etwas höher als bei Grundwasser.

Der SBF konnte mit 3,5l/s (entsprechend 12,6 m³/h) betrieben werden. Im Leistungsbereich von 0,5 bis 12,6 m³/h zeigte sich kein Unterschied in der Qualität des Ablaufs. Als besonders vorteilhaft stellte sich heraus, dass mitgeförderter Sand kein Problem darstellte.

1.2 Aufreinigen von 511m³ Grundwasser

Ein wesentliches Ziel des Projekts war die Aufreinigung von min. 500m³ Grundwasser am Ort der Altlast N77, wo die Feldversuche erfolgten. Das aufgereinigte Grundwasser konnte laut Bescheid vor Ort versickert werden.

Zwischen 21.09.2021 und 30.09.2021 wurden insgesamt 511,290 m³ Grundwasser gefördert, aus einer Tiefe von etwa 8,5m. 259,35 m³ davon wurden über den Ölabscheider alleine, und 251,940 m³ über die in Serie geschalteten Aggregate SBF + Ölabscheider gefahren. Die 1,9l/l (Leistung der Pumpe) konnten problemlos vom Schrägbettfilter bewerkstelligt werden. Teilweise wurde beim abgepumpten Grundwasser Öl in Phase vorgefunden, besonders bei Abzug in der Nähe des Grundwasserhorizonts. 2,7m³ an Mineralöl konnten abgetrennt werden, das entspricht 0,53% der geförderten Menge. Der Schrägbettfilter wurde in dieser Zeit zweimal mit einer neuen Vliesbahn bespannt.

2 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Unterschiedliche Ausführungsformen, teilweise im Satz- und teilweise im kontinuierlichen Betrieb, wurden realisiert und nach ersten Laborversuchen auch im Feld getestet. Vliese aus Polyolefinen und Polyestern kamen zum Einsatz, mit einem Flächengewicht von 220 bis 400 g/m² und einer Ölbindekapazität des 5-15fachen Flächengewichts. Beim Abtrennen von Mineralölkohlenwasserstoffen (MÖL) und Pflanzenöl (PÖL) aus Wasser, sowohl in Phase als auch emulgiert, zeigten sich Restölgehalte im Wasser von 0,5 bis 1,5 mg/l sowie ein Wassergehalt im Öl von max. 2%. Anhand der Altlast N77 wurde auch untersucht, wie sich mineralölbelaftetes Grundwasser aufreinigen lässt. Bei Abzug von Grundwasser wurden folgende Restölgehalte gemessen:

- MÖA: 0,8 mg/l • MÖA + SBF: 0,3 mg/l
- SBF: 0,4 mg/l (MÖA = Mineralölabscheider, SBF = Schrägbettfilter mit Vlies).

Bei Abzug von Emulsion aus dem Boden (10% PÖL in Wasser, mit MÖL kontaminiert) ergaben sich diese Restölgehalte (gesamt):

- MÖA: 0,8 mg/l
- MÖA + SBF: 0,7 mg/l
- SBF: 0,6 mg/l

Die Machbarkeit der Grundwasseraufreinigung wurde mit 511m³ kontraminiertem Grundwasser demonstriert. Der Schrägbettfilter erlaubt einen kontinuierlichen Betrieb. Nach Laborversuchen nahm die Beladepazität des Vlieses nach 20 Zyklen um weniger als 5% ab. Dies wurde in den Feldversuchen ebenfalls bestätigt.

Gerade in Kombination mit einem vorgeschalteten Mineralölabscheider bietet ein Schrägbettfilter mit ölabsorbierendem Vlies, welches als Endlosbahn geführt und regelmäßig ausgedrückt wird, Vorteile, indem der Restölgehalt im Ablauf um 0,1 bis 0,2 mg/l geringer ist als bei einem Ölabscheider im alleinigen Betrieb. Das Verfahren ist robust gegen Verunreinigung durch Sand und kann in Zukunft helfen, die Öl/Wasser-Trennung im Feld zu vereinfachen und effizient zu gestalten.

3 DANKSAGUNG

Das Projekt „Aufreinigungskaskade“ wurde dankenswerterweise vom BMK, abgewickelt von der Kommunalkredit Public Consulting, unter der Projektnummer B820001 gefördert.

LITERATUR

- Lackner, M., Putz, K., Plank M., Loibner, A. (2022). *In-situ* Bodenwäsche mit Pflanzenöl/Wasser-Emulsionen zur Kohlenwasserstoff-Entfrachtung Posterpräsentation, Recy & DepoTech 2022, 9.-11- November 2022, Leoben, Österreich.
- Lackner, M., Braunschmid, V., Sumetzberger-Hasinger, M., Müllern, K., Putz, K., Plank, M., Rüttinger, N., Ribitsch, D., Loibner, A. (2020). „KASKADE - Vegetable oil extraction of hydrocarbons from soil and subsequent separation via non-woven fabrics“, Recy & DepoTech2020 (Vortrag), 18.-20. November 2020, Leoben, Österreich
- Loibner, A. P. (2022). Enzymatically enhanced biodegradation of persistent petroleum hydrocarbon mixtures, Vortrag, Recy & DepoTech2022, 9.-11- November 2022, Leoben, Österreich.

Recycling potential of recycled carbon fibers used in textile concrete from a technical and environmental point of view

B. Bayram¹, V. Overhage², K. Raulf¹, K. Greiff¹ & T. Gries²

¹⁾ RWTH Aachen University, Institute of Anthropogenic Material Cycles, Aachen, Germany

²⁾ RWTH Aachen University, Institut fuer Textiltechnik, Aachen, Germany

ABSTRACT: The application of carbon fibers (CF) has been increasing in the construction industry as they allow production of lightweight concrete structures. Aside from many advantages, the end-of-life management of carbon fiber reinforced concrete remains challenging. Through this study, we aimed to assess the recycling potential of recycled carbon fibers (rCF) that were used in concrete, considering the technical and environmental aspects. To identify the separation potential of carbon fibers from concrete, mechanical processing by means of hammer mill with different machine settings was conducted. In addition, a life cycle assessment was performed evaluating two life cycles of carbon fibers and identifying the hotspots. From the results of mechanical processing, it is seen that with the increased weight percentage of separated carbon fibers, the fine portion, which is a mix of carbon fibers and concrete, also increased. In addition, two assessed parameters, the total mass and length division of separated carbon fibers were observed to have the greatest value in two different machine settings. From an environmental point of view, virgin carbon fiber and concrete production were the highest contributors to environmental impacts. Furthermore, recycling through pyrolysis was found to be environmentally advantageous compared to virgin carbon fiber production.

1 INTRODUCTION

As an important element in construction industry, cement production caused alone 2 % of total greenhouse gas emissions in Germany in 2017 and global average was even with a greater value, 8 % (WWF 2019). Considering the great impact of construction industry on the environment, fiber reinforcement (carbon or glass) is seen as a meaningful alternative to steel reinforcement in the production of concrete. Due to their low weight, high strength and lifetime, carbon fibers have been increasingly used in construction industry. On the one hand, the use of CF reinforced concrete enables great amount of resource savings compared to conventional concrete, specifically steel reinforced concrete (Böhm et al. 2018). On the other hand, CFs have some disadvantages, such as high cost, energy intensive production process and challenging end-of-life (EOL) handling (Zhang et al. 2020). Thus, recycling of CFs plays an essential role both from economic and environmental point of view. Pyrolysis (thermal recycling) and solvolysis (chemical recycling) are two major recycling processes that are currently applied. However, one of the disadvantages of recycled CF is the shortened fiber length. When it comes to textile concrete, the length of CFs plays an essential role. Within the scope of the CarboYarn project, short rCFs were merged to produce yarn through a spinning process (Bell et al. 2019). The current study focuses on rCF textile concrete which was produced using this impregnated rCF yarn and assesses the recycling potential of it using mechanical processing. In addition, a LCA that covers two life cycles, in which CF first produced as CF reinforced plastic (CFRP) in the 1st life cycle and recycled at the end-of-life (EOL). Then, the 2nd life cycle covers the rCFs which were used in the concrete production and the EOL phase, in which mechanical processing using hammer mill was evaluated. Within the LCA, we also conducted a contribution analysis and sensitivity analysis. Also, a comparative LCA between rCF which were produced through pyrolysis and virgin CF was performed.

2 METHODS

2.1 Technical assessment

2.1.1 Production of rCF textile concrete samples

The production of rCF yarn was performed within the project CarboYarn by ITA (Bell et al. 2019). The impregnation of rCF yarns was carried out at ITA with a labcoater, using epoxy as an impregnating agent. The yarns were conveyed through the pressed-on rollers for the absorption of the impregnating agent. After this process, the impregnated rCFs were cured for 2 days in room temperature before concrete pouring, which was performed following DIN EN 12390-2. The impregnated rCFs were placed with a distance of 2 cm, and in each concrete sample, 5 pieces of impregnated rCF rovings were used. In total 18 concrete samples, with a length of 350 mm, a width of 100 mm and a height of 15 mm, were produced. For the technical part, we did not use textile structure rather impregnated rCF rovings due to the limited material availability. However, the textile structure with rCFs is planned to be further investigated in a follow-up study.

2.1.2 Mechanical processing rCF textile concrete samples using hammer mill

In total, six different machine settings of hammer mill were included in the comminution experiment, where different combination of rotational speed and grate size were assessed as presented in Tab. 1. For each machine setting, the comminution process was performed three times to increase the data reliability.

Tab. 1: Different machine settings of hammer mill used for comminution experiment

Machine Setting	Rotational speed (min^{-1})	Grate size (mm)
S1	1500	No grate
S2	1500	60
S3	1500	40
S4	2000	No grate
S5	2000	60
S6	2000	40

After the comminution process, the end material was sorted in four different groups. First, the fine portion, which is less than 2 mm, was sieved out. After that, within the remaining, rCFs, concrete and composite fractions were manually separated and weighted. In addition, the length of separated rCFs was measured.

2.2 Life cycle assessment

Life cycle assessment (LCA) was performed following the ISO 14040/44 in four steps, which are summarized in the following section. The LCA was conducted focusing on textile rCF concrete rather than the impregnated rCF rovings that were assessed in the technical part. This is because, the textile rCF concrete is more suitable for real life application.

2.2.1 Goal and scope definition

The aim of this LCA is to assess the environmental impacts of two life cycles of CFs and highlight the hotspots. The 1st life cycle starts with the raw material extraction and production of CFRP. The use phase was not considered, but the transport to and from the user was included within the system boundaries. The EOL handling, pyrolysis, was considered within the 1st life cycle. The 2nd life cycle starts with the transport of rCF after the pyrolysis process to the spinning plant, where the rCF yarns were produced. Then, the rCF yarns were transported to the impregnation process, in which epoxy resin was used for coating and textile grit was produced. Afterwards, the textile grit transported to the concrete production plant. In the 2nd life cycle, the use phase was again neglected, but transport to and from the user was assessed. The 2nd life cycle finishes with EOL handling through mechanical processing by hammer mill. The system boundary of this study is illustrated in Fig. 1.

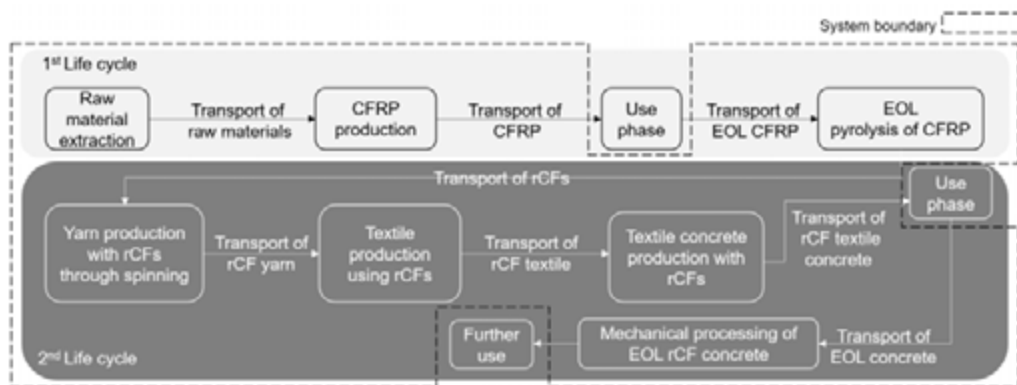


Fig. 1: System boundary of LCA and overview of the processes that were considered

In addition, a comparative LCA, in which primary production of primary CFs and rCFs produced through pyrolysis were compared on a cradle-to-gate level, was performed.

The functional unit was selected as the volume of concrete, which is 525 cm³ and produced according to ITA textile concrete mix.

2.2.2 Life cycle inventory (LCI)

The background data was taken from ecoinvent v3.8 cut-off database and the studied system was modelled using Umberto LCA+ software following an attributional LCA approach.

The following ecoinvent activities were used for the background processes:

- CFRP production: “carbon fibre reinforced plastic, injection moulded [GLO]”
- Transport processes: “market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RER]”
- Electricity: “market for electricity, medium voltage [DE]”
- Pyrolysis: modelled based on Vo Dong et al. (2018), in which energy input was taken as 30 MJ/kg CFRP and outputs consist of 65 % CF, 35 % matrix. For the incineration of the matrix, the ecoinvent activity “treatment of municipal solid waste, incineration [DE]” was used.
- Production of rCF yarn through spinning: For the yarn production from rCFs, spinning process was modelled according to Goyal & Nayak (2020), in which 72 % of PA6 and 28 % of rCF by weight will be used and 3.5 kWh electricity per kg yarn produced is required.
- Textile production: the electricity requirement for the textile production from Hohmann (2019) in which 0.052 kWh per m² textile reinforcement is given.
- For the rCF textile concrete production, concrete with 50MPa activity from ecoinvent is adjusted to energy mix of Germany and rCF concrete mix that was used in this study.
- For the mechanical processing with hammer mill, electricity demand was measured during the experiment, with an average of 0.52 kWh per sample. For the electricity, ecoinvent activity “market for electricity, medium voltage [DE]” was used.

Transport distances were assumed to be 200 km, except for the distance between the rCF impregnation to the concrete plant, which was assumed as 300 km, and the distance between the rCF textile concrete to the EOL mechanical processing plant that was assumed to be 100 km. The assumptions were made based on Meng et al. (2018), and included in the sensitivity analysis. It is worth noting that the electricity consumption for the mechanical processing is based on lab-scale application and the measured value is included in the sensitivity analysis, as the real application value may differ.

2.2.3 Life cycle impact assessment (LCIA)

ReCiPe Midpoint (H) impact method was used, and global warming potential (GWP) (kg CO₂-Eq) and resource depletion (kg Fe-Eq) were chosen as impact categories.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Mechanical processing result summary

As seen in Fig. 2, the maximum w-% of rCFs after comminution was achieved in S3 and S5, in which also the lowest weight of composite fraction was present. However, in S3 and S5 were observed to have the highest fine fractions, which cannot be separated.

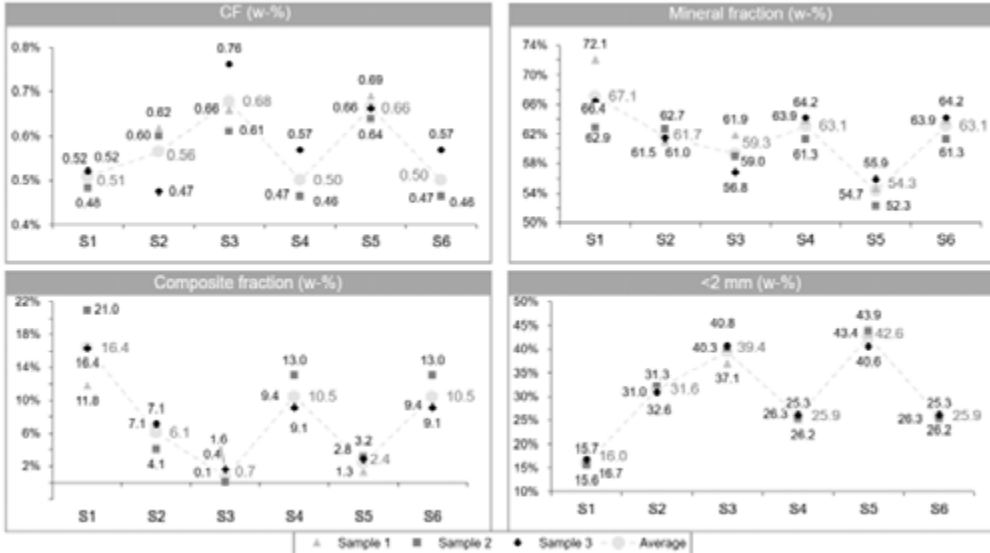


Fig. 2: Percent division by weight of four different fractions (CF, mineral, composite and < 2 mm) after comminution process

When it comes to the length of CFs, S1 had the highest average length and highest percentage of CFs with a length of equal and greater than 4 cm (15 % of total number of the sorted rCFs). For all the machine settings, the majority of rCFs, with a number about 35 %, ended up in the second range ($\leq 1...<2$) and this was followed by the third range ($\leq 2...<3$), which covered more than 20 % of the rCF pieces that were separated by hammer mill (Fig. 3).

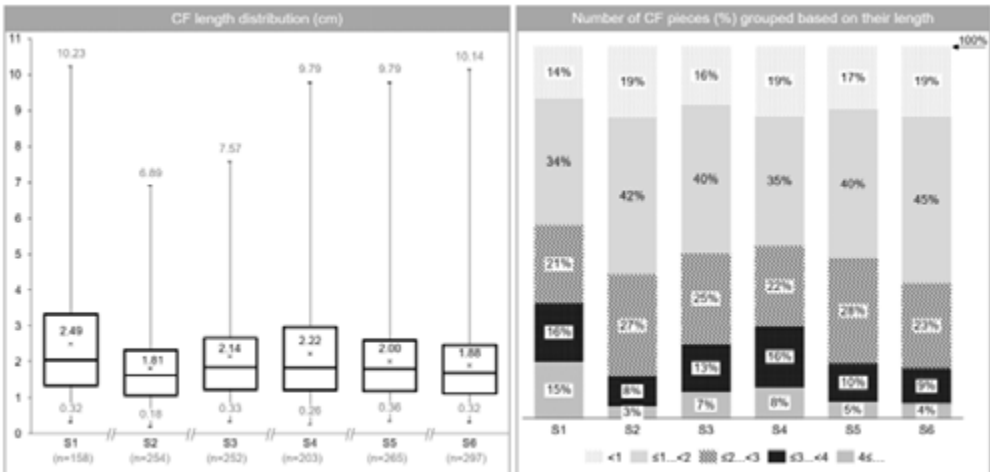


Fig. 3: The length distribution of CFs in cm (on the left side) and number of CF pieces, presented as % and grouped based on their length range (on the right side)

3.2 LCA interpretation

An overview of the process contribution in GWP and resource depletion impact categories were summarized in Tab. 2. Within the 1st life cycle, raw material extraction for CFRP production accounted for approximately 89 % of GWP and 92 % of resource depletion potential. In terms of GWP, the CFRP production and pyrolysis process had a similar impact with around 5 %; however, in the resource depletion category, pyrolysis caused approximately 6 % and CFRP production around 2 % of the total impact in 1st life cycle. When assessing the 2nd life cycle, a great environmental impact, both in GWP and resource depletion categories, was caused by concrete production process, mainly due to the cement production.

Tab. 2: GWP and resource depletion potential of 1st and 2nd life cycle of products

Life cycle	Process	GWP (% and kg CO ₂ -Eq) ¹	Resource depletion (% and kg Fe-Eq) ¹
1 st life cycle	raw material extraction	89.31 %	91.76 %
	CFRP production	5.03 %	1.84 %
	EOL Pyrolysis	5.50 %	5.88 %
	transport total	0.17 %	0.51 %
	Total 1st life cycle (kg impact)	0.0286	0.0003
2 nd life cycle	spinning process	4.10 %	0.74 %
	textile production	1.19 %	3.15 %
	production of rCF concrete	92.81 %	94.71 %
	EOL hammer mill comminution	1.83 %	1.32 %
	transport total	0.06 %	0.08 %
	Total 2nd life cycle (kg impact)	0.2124	0.0036

¹⁾ where the contribution of different processes are presented in %, and total impact written in **bold** format

In order to have a better understanding, a comparison of rCF and virgin CF production is included in Fig. 4 in terms of GWP per kg CF. While evaluating the GWP impact of rCF, transport to pyrolysis, pyrolysis process itself, transport to spinning and the spinning process were considered. The virgin CF production was taken from GaBi database. It is worth mentioning that this comparison should be interpreted carefully as detailed information on the quality of rCF and virgin CF was not available, thus, a one-to-one comparison can be misleading.

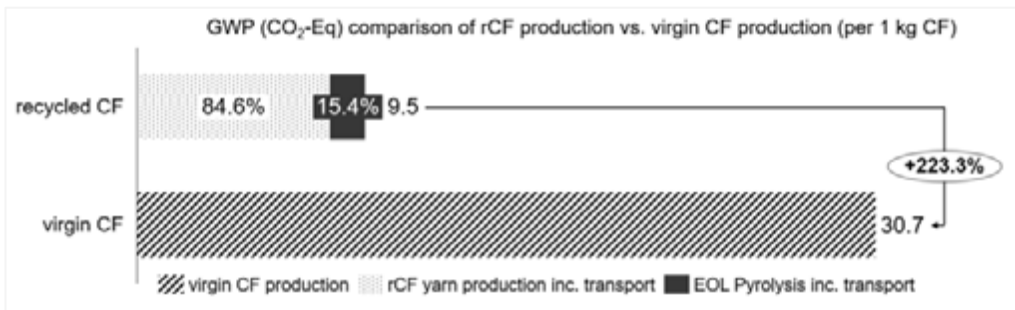


Fig. 4: A comparison on GWP of virgin CF production vs. rCF production, in which pyrolysis, transport and spinning processes are considered

3.2.1 Sensitivity analysis

In the Tab. 2, the contribution analysis for each process was already presented. Even though, from the contribution analysis, it is seen that the main process contributors are raw material extraction for the 1st life cycle and concrete production (mainly due to cement production) for the 2nd life cycle, a perturbation analysis was done for two parameters: assumed transport distances and electricity consumption for spinning and reinforcement production, and comminution through hammer mill. Both transport distances and each electricity consumption value were increased by 50 % and the sensitivity ratio (SR) values, which is calculates as the change in results divided by the change in parameter, were found to be relatives small, between 2.4E-05 and 1.2E-02.

4 CONCLUSION

In this study, we assessed two aspects, technical and environmental, of rCF concrete. The results of mechanical processing revealed that total mass and length of CFs which were separated through mechanical processing were at their greatest value in two different machine settings. Within the LCA, the raw material extraction for the production of CFRP in the 1st life cycle and the concrete production process within the 2nd life cycle had the greatest impacts, both in terms of GWP and resource depletion. In addition, compared to virgin CFs production, rCF that are produced using pyrolysis can be a good alternative considering the great amount of reduced GWP. Further research can assess if it is possible to use the comminuted rCF fractions in yarn or in concrete as short fibers. In terms of LCA, it will be interesting to further include the quality aspect of rCFs in the assessment.

5 ACKNOWLEDGEMENTS

This study was conducted within the research group “Verbund.NRW,” supported by the North Rhine-Westphalian funding scheme “Forschungskolleg NRW” by the Ministry of Innovation, Science and Research. We want to thank Marco Löwen and Katharina Terörde for their contribution through their study projects.

REFERENCES

- Bell, E. G., Lechthaler, L., Stegshuster, G., Schlichter, S., Ausheyks, L., Reichert, O. (2019) *Carboyarn: technologischer Vergleich von Spinnverfahren zur Herstellung von RCF-Stapelfasergarnen Textil Plus*. (Nr. 3). Informationen aus dem kunststoffland NRW. https://www.kunststoffland-nrw.de/fileadmin/Downloads/NRW-Report/nrw_report_2020_3-ds.pdf
- Böhm, R., Thieme, M., Wohlfahrt, D., Wolz, D. S., Richter, B., Jäger, H. (2018) Reinforcement Systems for Carbon Concrete Composites Based on Low-Cost Carbon Fibers. *Fibers*, 6(3), 56. <https://doi.org/10.3390/fib6030056>
- Goyal, A., Nayak, R. (2020) Sustainability in yarn manufacturing. In R. Nayak (Hrsg.), *The Textile Institute book series. Sustainable technologies for fashion and textiles* (S. 33–55). Elsevier WP Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102867-4.00002-5>
- Hohmann, A. (2019) *Ökobilanzielle Untersuchung von Herstellungsverfahren für CFK-Strukturen zur Identifikation von Optimierungspotentialen* [Technische Universität München]. [mediatum.ub.tum.de](https://mediatum.ub.tum.de/1451614). <https://mediatum.ub.tum.de/1451614>
- Meng, F., Olivetti, E. A., Zhao, Y., Chang, J. C., Pickering, S. J., McKechnie, J. (2018) Comparing Life Cycle Energy and Global Warming Potential of Carbon Fiber Composite Recycling Technologies and Waste Management Options. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(8), 9854–9865. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01026>
- Vo Dong, P. A., Azzaro-Pantel, C., Cadene, A.-L. (2018) Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.024>
- WWF (2019) *Climate protection in the concrete and cement industry*. Berlin. WWF Germany. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WEB_WWF_Zement_Broschuere_EN.pdf
- Zhang, J., Chevali, V. S., Wang, H., Wang, C.-H. (2020) Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling. *Composites Part B: Engineering*, 193, 108053. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108053>

Quantitative Brandrisikobeurteilung von Abfallschüttungen anhand eines modellbasierten Tools

M. Hohenberger¹, M. Grimm¹ & R. Raupenstrauch¹

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Mit dem Ziel der Weiterentwicklung der abfallbranchenspezifischen brandschutztechnischen Leitlinie wird eine Methodik zur quantitativen Beurteilung des Brandrisikos von Abfällen in Lagerbereichen vorgestellt. Zur Anwendung kommt eine systematische und objektive Risikobeurteilung entsprechend der ÖNORM ISO 31000. Die Teilschritte der Risikoidentifizierung, -analyse und -bewertung werden anhand facheinschlägiger Literaturstudien durchgeführt. Die stoffspezifischen Einflussparameter sind in einer Datenbasis für Stoffwerte gesammelt. Die Eingabeparameter der systemspezifischen Größen werden mittels einfacher Berechnungen für die Bewertung aufbereitet. Anschließend werden alle Parameter mit einem schlimmstmöglichen, aber dennoch glaubwürdigen Fall verglichen und durch literaturbasierte Faktoren bewertet. Die Darstellung von Entzündungswahrscheinlichkeit und Brandauswirkung in Werten zwischen 0 und 1 in einer Risikomatrix ermöglicht die quantitative Gefahrenabschätzung als auch die Auswirkungen von Brandschutzmaßnahmen.

1 EINLEITUNG

Brandereignisse stellen ein erhebliches Gefahrenpotential für Abfallaufbereitungs- und Entsorgungsbetriebe dar. Die Bestrebungen einer systematischen Erfassung der Schadensfälle in den letzten Jahren haben gezeigt, dass trotz teils enormer Investitionen in Schutzmaßnahmen die Brandzahl in Ländern mit hoher Aufbereitungstiefe, wie Österreich, steigt (Nigl et al. 2020).

Es konnte gezeigt werden, dass Abfall-Lagerbereiche in Entsorgungsbetrieben die höchste Brandgefahr aufweisen. In Österreich entstammen 36,7% aller abfallwirtschaftlichen Brände diesem Bereich (Nigl et al. 2020). Mit der im Jahre 2019 entworfenen brandschutztechnischen Leitlinie zur Definition von Mindestanforderungen für Brandschutzmaßnahmen (VOEB & VOO 2019) und der Risikoeinstufung von Abfällen (Nigl & Pomberger 2019) wurde ein erster Schritt gesetzt. Im Forschungsprojekt „AbER innovation - Innovationsnetzwerk Brandschutz in Abfallwirtschaft, Entsorgung und Recycling“ wurde eine Weiterentwicklung durch eine quantitative Risikobeurteilung nach (ÖNORM ISO 31000 2018) angestrebt. Die Berücksichtigung von Stoffdaten sowie schüttungsbedingte Zusammenhänge sollen die Quantifizierbarkeit der Brandgefahr als auch die Ableitung von Schutzmaßnahmen für Abfalllagerungen konkretisieren.

2 METHODE

Zur systematischen und objektiven Quantifizierung der Einflussgrößen wurde eine in diesem Zusammenhang erstmals zum Einsatz kommenden Methode des Risikomanagementprozesses nach (ÖNORM ISO 31000 2018) angewendet. Die Risikobeurteilung umfasst drei Schritte, die Identifizierung, die Analyse und die Bewertung der Risiken (siehe Abb. 1). Der Risikomanagementprozess gibt dabei einen standardisierten Ablauf vor, welcher sinngemäß auf den konkreten Fall anzuwenden ist. Eine laufende Kontrolle und Überwachung muss für alle Teilschritte sichergestellt sein und soll auch im Rahmen der Anwendung ständig Raum für Verbesserungen bieten. Die Umsetzung des Tools in MS Excel stellt aufgrund der einfachen Zusammenhänge und breiten Anwendbarkeit eine ideale Lösung dar.

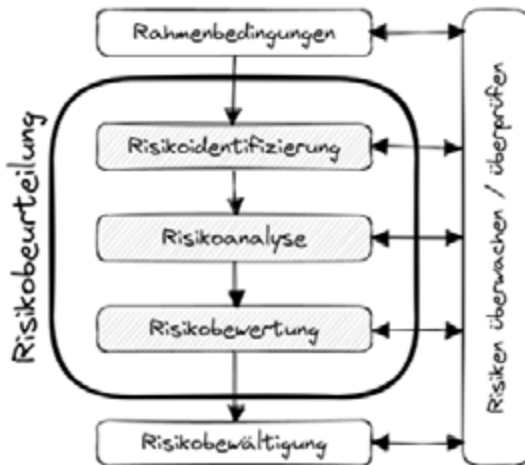


Abb. 1: Risikomanagementprozess nach (ÖNORM D 4901, 2021), eigene Darstellung

2.1 Risikoidentifikation

In Hinblick auf die Definition des Risikobegriffes (Risiko = Eintrittswahrscheinlichkeit mal Auswirkung) wurden die Brandrisiken durch die Entzündungswahrscheinlichkeit und die potenziellen Brandauswirkungen festgelegt. Die Szenarienanalyse ist eine der am häufigsten verwendeten präventiven Methode der Risikobeurteilung und erlaubt die Darstellung komplexer Risiken in verdichtender Form aus der Vogelperspektive. Dabei werden die Ergebnisse in einer Risikomatrix anhand von Szenarien abgebildet. Dies bietet eine ideale Darstellungsform für diesen Anwendungsfall (ÖNORM D 4902-2 2021).

Die Brandursachenerhebung von (Nigl et al. 2020) zeigt, dass über die Hälfte der Brandursachen in der öst. Abfallwirtschaft unbekannt sind und der größte bekannte Anteil der Selbstentzündung (rd. 19%) und falsch entsorgten gefährlichen Abfällen, wie Batterien und Druckgaspackungen (rd. 10%) zuzuordnen sind. Die Betrachtung der Selbstentzündung und der Fremdentzündung durch gefährliche Abfälle bzw. eingebrachte Störstoffe entspricht somit 60% der bekannten Brandursachen. Die Auswirkungen von Bränden wiederum sind hauptsächlich abhängig von der Freisetzung von Wärme und der Bildung von Brandrauch (Drysdale 2011).

2.2 Risikoanalyse

Die Analyse der Risiken dient dem Verständnis über die Art des Risikos, dessen Eigenschaften und der Risikohöhe und kann zu diesem Zweck einen unterschiedlichen Grad an Detaillierung und Komplexität aufweisen.

Die Selbstentzündung in Haufwerken brennbarer Schüttgüter entsteht durch ein thermodynamisches Ungleichgewicht an Stellen, wo die Wärmeproduktionsleistung durch chemische und biologische Reaktionen höher als die Wärmeabfuhrleistung durch Konduktion und Konvektion ist (Huber-Medek et al. 2007). Das Selbstentzündungspotential hängt von vielen Faktoren ab und kann in der Praxis anhand experimenteller Messungen in Kombination mit mathematischer Modellierung abgebildet werden.

Eine schnelle, überschlagsmäßige Betrachtung wird in dieser Risikobeurteilung anhand eines makroskopischen Ansatzes durchgeführt, indem durch das Studium facheinschlägiger Literaturen, Erfahrungswerte und Labormessungen die Einflüsse der maßgeblichen Parameter in einer Datenbasis hinterlegt werden. Zu diesem Zweck hat sich die Unterscheidung zwischen stoff- und systemspezifischen bzw. schüttungsspezifischen Parametern bewährt, wie bereits in (Wallner 2004) und (Huber-Medek et al. 2007) erwähnt wurde.

Aufgrund der komplexen Zusammensetzung von Abfällen kamen zur Implementierung von Stoffwerten sogenannte Vergleichsstoffe zum Einsatz. Dies erlaubt eine vereinfachte Beschreibung

der Abfälle durch relativ einfach zugängliche Stoffparameter. Damit ist es möglich die Beschreibung einer Restabfallschüttung, welche aus unzähligen Stoffen bestehen kann, durch lediglich 17 unterschiedlichen Stoffen durchzuführen.

Die Darstellung von schüttungsspezifischen Parametern, wie Schüttungsgeometrie und Korngrößen erfordern die Dateneingabe des Anwenders, welche durch Kombination von abgespeicherten Daten zusammen mit hinterlegten Berechnungen auf ein Minimum reduziert werden. Aus Korngröße und Kornform werden Kenngrößen der mechanischen Verfahrenstechnik, wie der freie und zur Gas-Feststoff-Reaktion verfügbare Luftraum innerhalb der Schüttung (Schüttungsporosität) und spezifische Oberfläche berechnet. Diese Größen beeinflussen teilweise ebenfalls die Wärme- und Rauchfreisetzung des Brandes und finden somit in zweierlei Hinsicht Anwendung. Alle Einflussgrößen sind in den Tabellen 1 und 2 entsprechend ihrer Zuordnung zu den Risikokategorien dargestellt.

Tab. 1: Verwendete Einflussparameter der Entzündungswahrscheinlichkeit

Entzündungswahrscheinlichkeit	
stoffspezifisch	systemspezifisch
Selbstentzündung	
„Org. Reaktionsvariable“ Oxidationskinetik	Schüttungsgeometrie Wassergehalt Freier Luftraum Spezifische Oberfläche Luftberührte Oberfläche Windeinfluss Geplante Lagerdauer
Fremdentzündung	
	Massenanteil gefährlicher Abfälle Massenanteil brennbarer Abfälle

Tab. 2: Verwendete Einflussparameter der Brandauswirkung

Brandauswirkung	
stoffspezifisch	systemspezifisch
Wärmefreisetzung	
Heizwert „Thermal Response Parameter“	Schüttungsgeometrie Wassergehalt Freier Luftraum Spezifische Oberfläche Luftberührte Oberfläche Windeinfluss Brennbares Volumen Brennbar berührter Umfang
Rauchbildung	
„Smoke Yield“	Wassergehalt Spezifische Oberfläche Luftberührte Oberfläche Windeinfluss

Wie in Tab. 1 ersichtlich ist, erfolgt die Beschreibung der Fremdentzündung durch den Massenanteil gefährlicher sowie brennbarer Abfälle.

Die Wärmefreisetzung wird durch die Stoffwerte Heizwert, als der bei einer Verbrennung maximal nutzbaren thermischen Energie, ohne Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes, und den „Thermal Response Parameter“, als thermische Aktivierungsenergie, die ein Stoff für die Entzündung benötigt, hinterlegt. Hinsichtlich der systemspezifischen Parameter werden jene Kennwerte der Selbstentzündung durch Berechnung des brennbarem Schüttungsvolumen ergänzt. (Drysdale 2011)

Die Brandrauchbildung wird durch den experimentellen Stoffparameter „Smoke Yield“, welcher bei idealen Verbrennungsbedingungen gemessen wird, um die für die Rauchbildung wichtigen schüttungsspezifischen Parametern wie Wassergehalt, Oberfläche und Luftzufuhr charakterisiert.

Insgesamt haben die stoffspezifischen Parameter einen Einfluss von 60% auf Entzündungswahrscheinlichkeit als auch Brandauswirkung und die systemspezifischen einen Anteil von 40%. Nach (Association National Fire Protection 2022) wird das quantitative Brandrisiko in Zahlenwerten von 0 bis 1 dargestellt, dabei stellt 0 das kleinstmögliche und 1 das größtmögliche Risiko dar. Alle vier Teilkategorien tragen gleichviel am Gesamtrisiko bei, womit jede Kategorie einen Wert von 0 bis 0,5 einnehmen kann, siehe Gleichung (1). Die systemspezifischen Parameter selbst werden wiederum in Werte von 0 bis 1 eingeteilt, wobei die Abhängigkeiten verschiedenen Verläufe aufweisen können. In der Abb. 2 a), b) c) sind beispielhaft die Einflüsse der spezifischen Oberfläche auf die Wärmefreisetzung, die Selbstentzündung und die Rauchbildung dargestellt.

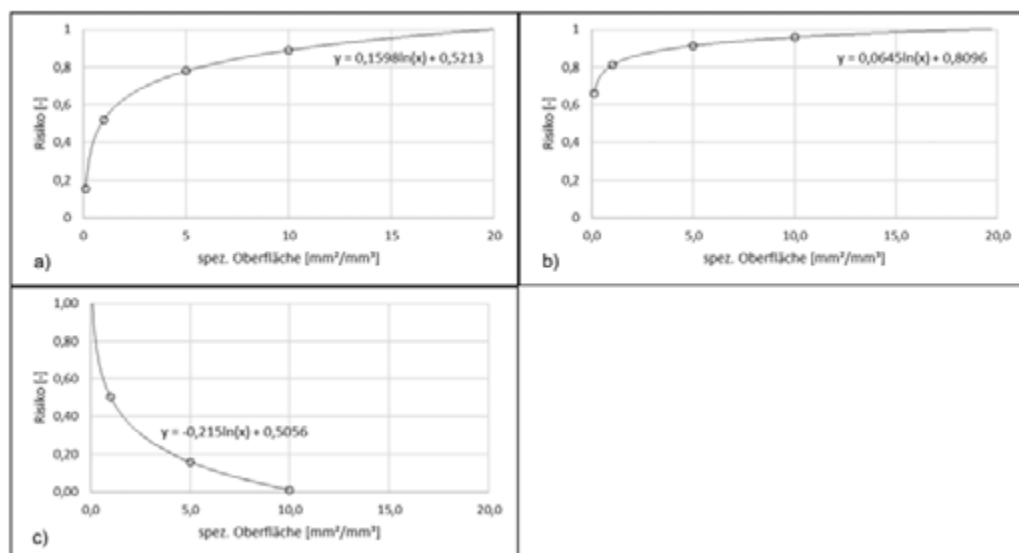


Abb. 2: Einfluss der spezifischen Oberfläche auf das Risiko für a) Wärmefreisetzung, b) Selbstentzündung, c) Rauchbildung auf Basis der Literaturstudie

2.3 Risikobewertung

Die Bewertung des Risikos beinhaltet den Vergleich der Ergebnisse der Risikoanalyse mit festgelegten Risikokriterien, um Entscheidungen zur Risikobewältigung durchzuführen. Dies erfolgt in zwei Teilschritten, zuerst werden die Werte der Risikoanalyse in Relation zu einem Vergleichswert gesetzt. Dieser Referenzwert ist ein schlimmstmöglicher, aber immer noch glaubwürdiger Fall („Credible Worst Case“) (ÖNORM D 4902-2 2021). Zum Beispiel wird der über die Vergleichsstoffzusammensetzung berechnete Heizwert der Schüttung mit dem höchsten zu erwartenden Heizwert in Verhältnis gesetzt.

In einem zweiten Schritt wird die Größe des Einflusses der Parameter anhand von Faktoren von 0 bis 1 bewertet werden. Die Bewertungsgrundlage stellt die durchgeführte Literaturstudie dar, trotzdem konnte vor allem in diesem Schritt eine subjektive Voreingenommenheit nicht ausgeschlossen werden. Die Einführung einer laufenden Prozessüberwachung und Verbesserung wie in (ÖNORM ISO 31000 2018) vorgegeben ist deshalb ein wichtiger Teil der weiteren Tool-Verwendung.

3 ERGEBNISSE

Die Ergebnisdarstellung erfolgt als allgemein bekannte Risikomatrix, wobei die Ordinate die Entzündungswahrscheinlichkeit und die Abszisse die Brandauswirkung jeweils von 0 bis 1 quantifiziert. Die Berechnung des jeweiligen Gesamtrisikos erfolgt beispielhaft dargestellt für den Heizwert nach Gleichung (1). Dabei ist 0,2 der Bewertungsfaktor für den Heizwert und 0,5 der Faktor für die Wärmefreisetzung, welche zusammen den Einfluss des Heizwertes auf das gesamte Brandrisiko quantifizieren.

$$\frac{\text{Heizwert}}{\text{höchster Heizwert}} \cdot 0,2 \cdot 0,5 = \text{Gesamtwert Heizwert} \quad (1)$$

Die Anwendung des Tools am Beispiel einer Restabfallschüttung ist in der Abb. 3 ersichtlich. Der Punkt „1RM“ stellt die Abfallschüttung dar, dabei wurde die Entzündungswahrscheinlichkeit mit 0,90 und die Brandauswirkung mit 0,38 quantifiziert und liegt somit im Bereich des erhöhten Risikos. Die Matrix stellt drei Bereiche dar, wobei der untere Bereich ein niedriges Risiko, der obere Bereich ein hohes Risiko und der mittlere Bereich den Übergangsbereich markiert. Da die sogenannten Entscheidungsgrenzen zwischen den Bereichen noch nicht objektiv festgelegt wurden, sind die Bereiche lediglich aus Darstellungsgründen eingezeichnet.

Die Anwendung von Maßnahmen zur Minimierung des Risikos für Selbst- und Fremdentzündung können die Entzündungswahrscheinlichkeit halbieren. Die Komprimierung der Schüttung und die Aussortierung von Gefahrstoffen zeigen die größten Effekte, welche durch „3RM“ sowie „4RM“ in Abb. 3 abgebildet sind.

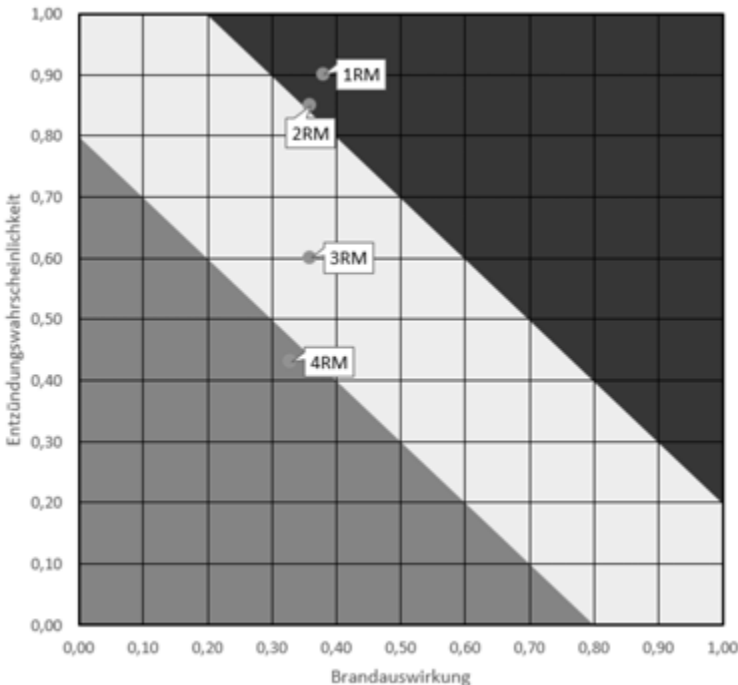


Abb. 3: Quantitative Risikomatrix für eine Restabfallschüttung mit unterschiedlichen entzündungsmindernden Maßnahmen

4 ZUSAMMENFASSUNG BZW. SCHLUSSFOLGERUNG

Die Anwendung einer quantitativen Risikobeurteilung nach Norm auf die Brandgefährdung von Abfallschüttungen konnte durch Verwendung einfacher, literaturbasierte Zusammenhänge und Bewertungsschemen gezeigt werden. Neben der Einbindung von vorbeugenden Brandschutzmaßnahmen ermöglicht die Beurteilung direkte Aussagen über deren Wirksamkeit, da die Gefahrenhöhe abgeschätzt wird.

Die Einbindung der Beurteilungsmethode als Planungstool für Lagerbereiche erfordert noch weitere Tätigkeiten. So sind vor allem Parameterauswahl, -einflüsse und -bewertung nicht umfassend objektiv gestaltet und im Moment noch nicht ausreichend validiert. Deshalb wird im Rahmen der Durchführung von Maßnahmen der ständigen Kontrolle und Verbesserung Sensitivitäts- und Validierungsanalysen durchgeführt, welche es erlauben die Fehler und Entscheidungsgrenzen der Methode aufzuzeigen.

LITERATUR

- Association National Fire Protection. (2022). *NFPA 551 - Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments*. Quincy.
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Huber-Medek, K., Wimmer, J., Neubacher, F., Raupenstrauch, H., & Greßlehner, G. (2007). *Anforderungen an die Zwischenlagerung von heizwertreichen Abfällen*. Wien: BMLFUW.
- Nigl, T., & Pomberger, R. (2019). Risikoeinstufung von Abfällen in Abhängigkeit ausgewählter Eigenschaften. Leoben: Arbeitskreis Brandschutz.
- Nigl, T., Bäck, T., & Pomberger, R. (2020). Vertiefende Ursachenermittlung zu Brandereignissen in der österreichischen Abfall-, Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft. Leoben.
- ÖNORM D 4901. (2021). *Risikomanagement für Organisationen und Systeme - Anforderungen an das Risikomanagementsystem*.
- ÖNORM D 4902-2. (2021). *Risikomanagement für Organisationen und Systeme - Leitfaden; Teil 2: Methoden der Risikobeurteilung*.
- ÖNORM ISO 31000. (2018). *Risikomanagement - Leitlinien*.
- VOEB, & VOO. (2019). *Brandschutz für Abfall- und Ressourcenwirtschaftsbetriebe*. Wien.
- Wallner, S. (2004). *Ein Modell zur Untersuchung des Selbsterwärmungsverhaltens von Schüttgütern*. Graz: Dissertation.

Metrology for the Recycling of Technology Critical Elements to Support Europe's Circular Economy

S.T. Lancaster¹, A. Walch¹, M. Eberhard¹, A. Rachetti¹, T. Prohaska^{1,2} & J. Irrgeher^{1,2}

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Chair of General and Analytical Chemistry, Leoben, Austria

²⁾ University of Calgary, Department of Physics and Astronomy, Calgary, Canada

ABSTRACT: Recent historical events have shown that now, more than ever, it is imperative that the European Union (EU) strives towards a more circular economy and avoid dependence on imports from other countries. Technology critical elements (TCEs), which are irreplaceable in the majority of technology that forms the basis of modern society as well as for renewable energy technology, are one such group of raw materials that suffer from potential supply risks due to global stock shortages and selected countries who produce them. In 2017, the European Commission issued new targets for the recycling of TCE containing waste (2018/851/EU), such as electronic waste, however these targets are not currently being met due to the low availability of methods and materials used to accurately measure these elements in electronic waste products. Thus, the MetroCycleEU project has been introduced to provide analytical solutions for the measurement of TCEs in electronic waste, such as digestion of the material and development of reference materials, in order to aid the recycling industry.

1 INTRODUCTION

Technology critical elements (TCEs) are vastly used throughout societal consumer products; including phones, computers, and renewable energy products, such as solar panels and wind turbines. These elements are deemed critical due to their economic importance and supply risk. However, dwindling supplies of TCEs threaten to disrupt such technology production worldwide, which is especially concerning given a recent drive for more renewable energy sources as part of the European Green Deal. Thus, there is a drive for the European Union (EU) to strive for a circular economy approach that reduces dependence on imports of such raw materials. To provide a more secure supply of TCEs, the EU promotes more efficient recycling through the Waste Framework Directive (2018/851/EU). However, recycling of TCEs in electronic waste remains a challenge due to the lack of reference materials and methods for analysis of such a sample, which are instrumental in the estimation of the economic value of the waste and to inform the industry of the correct recycling routes.

2 THE METROCYCLE-EU PROJECT

The MetroCycleEU project (www.metrocycle.eu) has started in June 2021 and aims to support the recycling industry with the analysis of TCEs in electronic waste. This Europe-wide project belongs to the European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) initiative, which is co-funded by European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating states. It is led by the Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) in France and involves collaborations between 15 different institutions across the continent, including leading national metrology institutes. The primary aim is to develop new reference materials and reference methods for the analysis of selected TCEs in printed circuit boards (PCBs), lithium-ion (Li-ion) batteries, and light emitted diodes (LEDs) to establish traceability to the SI units and global harmonization and comparability of measurements. The TCEs of particular focus for the MetroCycleEU project are Co, Ga, Ge, In, Ta, Nd, Pr, Dy, Gd, La, Au, Pt, Pd, and Rh.

3 ANALYTICAL CHALLENGES

Electronic waste is an extremely heterogeneous matrix, therefore estimation of their TCE content is difficult. The first challenge is to perform an analysis of a representative sample. Sample representativeness can be improved by grinding the material into a powder, however electronic waste is challenging to grind and fine powders are difficult to obtain. Even with a representative sample, the determination of TCEs in electronic waste suffers from numerous obstacles. One method is to digest the material and analyse the solution by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), however the high carbon load (due to plastics) makes the material especially difficult to digest. Additionally, electronic waste contains numerous elements not typically considered in routine analysis, which therefore contribute numerous uncommon and challenging interferences that cause analytical biases that need to be resolved. An alternative approach is to use x-ray fluorescence spectroscopy (XRF), which does not rely on sample dissolution and can be used to analyse the samples directly. Though it is a rapid and simple technique, low sensitivity and poor calibrations for such sample types also introduce biases. Through the MetroCycleEU project, these issues will be addressed to produce „best practice“ guides for simpler and effective routine analysis of TCE-containing wastes.

4 OUTLOOK

Given the high demand for TCEs, and a greater focus on recycling, it is likely that the economic value of TCE-containing waste will rise. The improved TCE analysis for electronic waste matrices through the MetroCycleEU project will be a great asset to industry, with „best practice“ guides allowing more laboratories to perform high-quality TCE measurements at lower costs. In the first instance, industries involved in the recycling of TCE-containing waste and industries that collect and trade wastes will benefit from a much greater ability to estimate the economic value and gain better information regarding the recycling pathways for waste products. Additionally, accredited laboratories and instrument manufacturers benefit from the improved methodology. Further ahead, an abundance of high-quality data on TCE contents in electronic waste will allow policy makers and regulatory bodies to make decisions to improve the recycling of TCE-containing waste.

Aufbereitung von Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung zu biogenem Restbrennstoff

V. Scheff¹, G. Dürl¹ & D. Laner¹

¹⁾ Universität Kassel, Fachgebiet Ressourcenmanagement & Abfalltechnik, Kassel, Deutschland

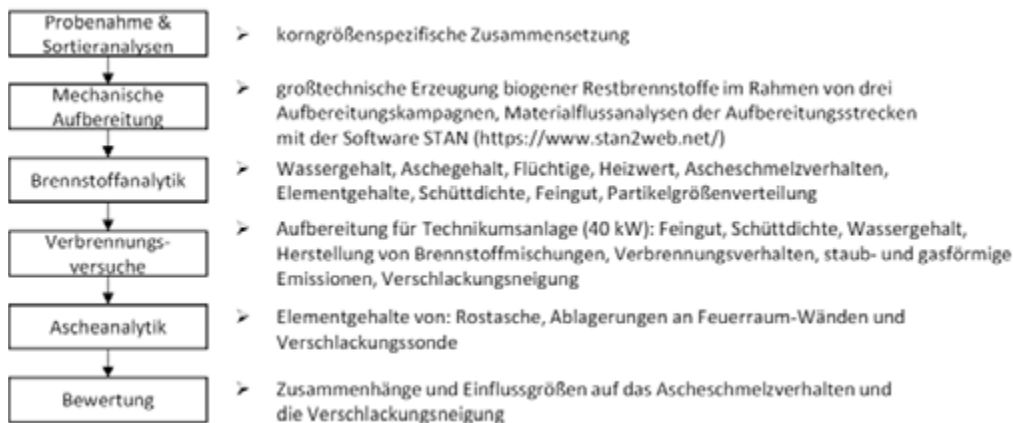
KURZFASSUNG: Vor dem Hintergrund steigender Mengen von Bioabfällen und dem damit verbundenen Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung wird im Projekt BioRestBrennstoff ein energieeffizienter Einsatz im Biomasseheizkraftwerk untersucht. Durch Variation der Aufbereitungsstrecke konnte eine Aufkonzentration der holzigen Fraktionen erreicht werden. Hohe Konzentrationen von Chlor, Kalium und Natrium im Siebüberlauf-Holz führen allerdings zu einem erhöhten Verschlackungsrisiko bei der Verbrennung. Um die kritischen Inhaltsstoffe zu entfernen, werden in einer aktuellen Kampagne nasse Aufbereitungsverfahren eingesetzt.

1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG

Vor dem Hintergrund der seit dem 1. Januar 2015 geltenden Getrennthaltungspflicht von Bioabfällen (§ 11 KrWG) und den höheren Qualitätsanforderungen an den Kompost durch die von der in Deutschland 2021 beschlossenen „kleinen“ Novelle der Bioabfallverordnung, werden die Mengen an Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung voraussichtlich weiter ansteigen. Derzeit wird dieser Stoffstrom als sekundärer Abfall meist kostenintensiv in Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet (Richter et al. 2021). Neben einem hohen Fremdstoff- und Feinanteil besteht der Siebüberlauf jedoch zu großen Anteilen aus holzigen Fraktionen, weshalb der Einsatz in Biomasseheizkraftwerken (BMHKWs) nach vorheriger mechanischer Aufbereitung einen alternativen Verwertungsweg darstellen kann, der deutlich energieeffizienter und kostengünstiger ist. Daher wird im Rahmen des Forschungsprojektes BioRestBrennstoff (Laner & Scheff 2022) unter anderem untersucht, inwieweit Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung durch stufenweise Aufbereitung und Brennstoffkonfektionierung als biogener Restbrennstoff in BMHKWs eingesetzt werden kann, ohne sich nachteilig auf Anlagenbetrieb und Emissionen auszuwirken. Ein Fokus wird dabei auf das Ascheschmelzverhalten gelegt, da niedrige Erweichungstemperaturen der Asche zu Verschlackungen und Korrosion in Verbrennungsanlagen führen, die wiederum zu einer geringeren Energieeffizienz, Anlagenschäden und vermehrtem Emissionsausstoß führen (Niu et al. 2016). Die Projektergebnisse sollen schließlich einen Beitrag zum energieeffizienten Einsatz von aufbereitetem Siebüberlauf in BMHKWs leisten und das generelle Verständnis des Verschlackungsverhaltens beim Einsatz biogener Restbrennstoffe verbessern.

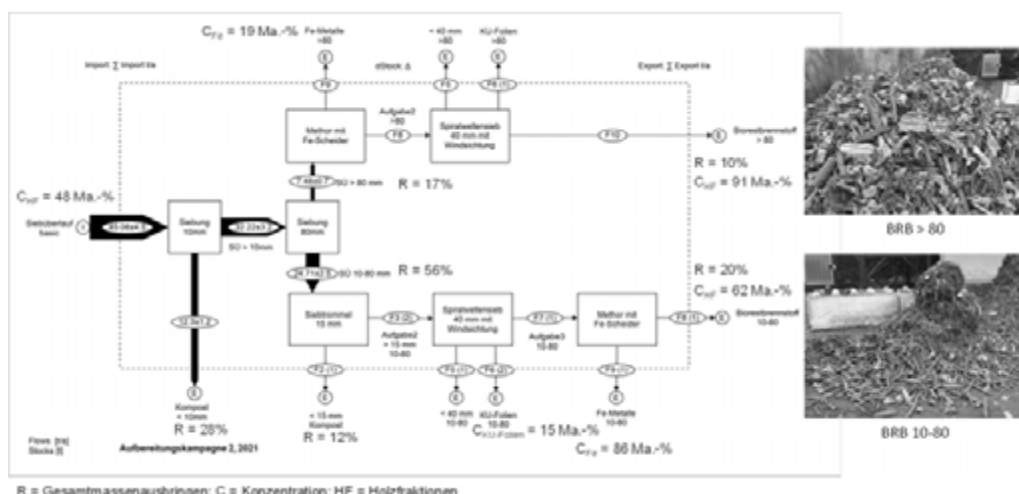
2 METHODIK

Im Rahmen des Projekts werden umfangreiche Untersuchungen und Analysen des Ausgangsmaterials sowie von aufbereitetem Siebüberlauf aus insgesamt drei Aufbereitungskampagnen durchgeführt. Die einzelnen Schritte und Untersuchungsziele werden in Abb. 1 dargestellt. Bis Ende 2021 wurden zwei Aufbereitungskampagnen an einer Kompostierungs- und Vergärungsanlage abgeschlossen. Die In- und Outputströme der implementierten Aufbereitungsketten wurden korngößenspezifisch charakterisiert und anhand typischer Kenngrößen wie Massen- oder Zielstoffausbringen sowie Materialflussanalysen wurde der Aufbereitungserfolg der Kampagnen bewertet. Darüber hinaus wurden Brennstoffanalysen nach den für biogene Festbrennstoffe bekannten DIN ISO Normen durchgeführt, um die Brennstoffqualität im Vergleich zu konventionellen Biomassebrennstoffen zu beurteilen. Aktuell wird im Rahmen von Verbrennungsversuchen im Technikummaßstab (40 kW) das Verbrennungsverhalten und insbesondere die Verschlackungsbildung im Feuerraum analysiert. Die erzeugte Datenbasis wird schließlich auf statistische Zusammenhänge zwischen Brennstoffeigenschaften und Verschlackungsbildung ausgewertet.



3 VOLRÄUFIGE ERGEBNISSE

In Abb. 2 ist exemplarisch das Materialflussmodell der zweiten Aufbereitungskampagne dargestellt. Auffällig ist das hohe Massenausbringen durch eine erneute Absiebung des Siebüberlaufmaterials bei 10 mm. Das hierbei erzeugte Feinmaterial konnte dabei die Qualitätsanforderungen für Kompost zuverlässig erfüllen und vermarktet werden. Durch eine Siebung bei 80 mm wurde eine Teilung in zwei Teilströme vorgenommen, um in der Grobfraction Holzpartikel aufzukonzentrieren. Der Holzanteil der Grobfraction konnte durch die Aufbereitung auf 91 Ma.-% erhöht werden, wobei das Massenausbringen mit 10 Ma.-% jedoch eher gering war. Zudem erschwerte eine hauptsächlich durch KU-Folien verursachte Zopfbildung in der Siebtrommel den weiteren Aufbereitungsprozess der > 80 mm-Fraktion erheblich. Insgesamt wiesen die zwei generierten Restbrennstoffe BRB > 80 und BRB 10-80 aus Aufbereitungskampagne 2 im Vergleich zum Inputmaterial deutlich niedrigere Fremdstoffgehalte auf (vgl. Abb. 2 und 3).



3.2 Siebüberlauf Zusammensetzung

In Abb. 3 ist die Zusammensetzung einer Auswahl von Siebüberlaufproben dargestellt. Bei den bisher durchgeführten Kampagnen unterschieden sich die behandelten Siebüberläufe aus dem Frühjahr und dem Sommer erheblich in den Holzkonzentrationen und dem Feingut < 10 mm. Im Zusammenhang mit dem niedrigeren Wassergehalt im Sommer (vgl. Tab. 1) kann davon ausgegangen werden, dass das Feingut von trockenem Material besser als bei feuchtem Inputmaterial abgesiebt werden kann. Die höchste Holzkonzentration durch eine mechanische Aufbereitung wurde in der zweiten Aufbereitungskampagne mit dem groben Material > 80 mm erzielt. Vor allem mineralische Bestandteile sind hier noch als Störstoffe enthalten, die im Rahmen einer weiterführenden Aufbereitung noch entfernt werden müssen. Da in der zweiten Kampagne Windsichter und Magnetscheider als Aggregate eingesetzt wurden, fielen die Konzentrationen an leichten Fremdstoffen und Fe-Metallen in den erzeugten Biorestbrennstoffen wesentlich geringer aus als in der ersten Kampagne. Als Referenzmaterial für den maximal möglichen Trennerfolg in Bezug auf die holzigen Zielfraktionen wurde darüber hinaus eine Siebüberlaufprobe durch manuelle Sortierung komplett von Störstoffen befreit (SÜH).

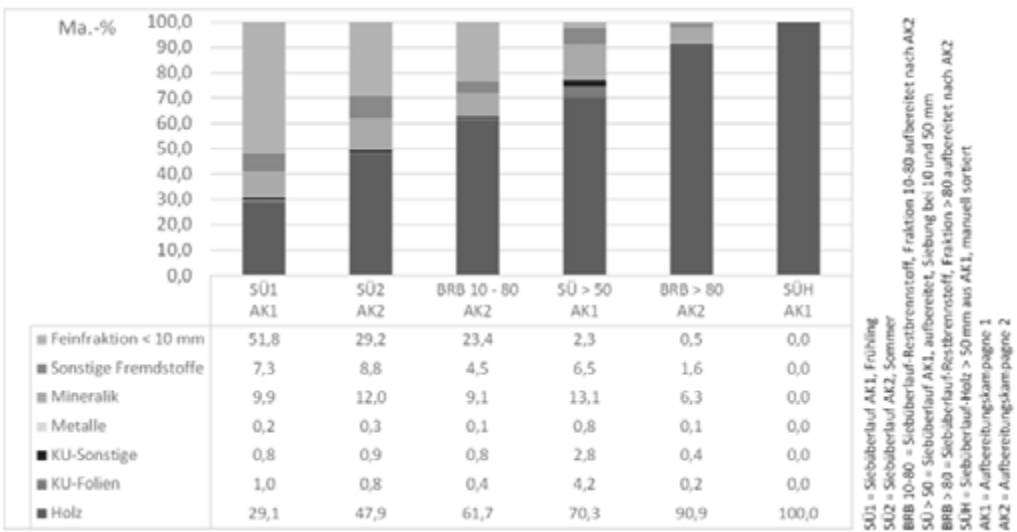


Abb. 3: Zusammensetzung ausgewählter Proben sortiert nach dem Anteil der Holzfraktionen

3.3 Brennstoffanalytik

Eine Auswahl vorläufiger Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen wird in Tab. 1 gezeigt. Der unaufbereitete Siebüberlauf ist gekennzeichnet durch einen hohen Anteil an inertem Material sowie einem niedrigen Heizwert. Das Sommermaterial SÜ2 hat aufgrund des höheren Trennerfolgs in der Feinabsiebung einen deutlich niedrigeren Aschegehalt als das Frühlingmaterial. Siebüberlauf-Holz weist in Bezug auf viele Brennstoffeigenschaften ähnliche Werte wie in BMHKWs eingesetztes Landschaftspflegematerial auf. Ein wesentlicher Unterschied ist allerdings der hohe Gehalt der Elemente Chlor, Kalium und Natrium im Feststoff, die zu einer Erniedrigung des Ascheschmelzpunktes führen. Durch Ermittlung der charakteristischen Temperaturen, konnte die im Vergleich zu den Referenzbrennstoffen LPM und HHS niedrige Erweichungstemperatur des Siebüberlauf-Holzes bestätigt werden. Daher wird ein erhöhtes Verschlackungsrisiko beim Einsatz von Siebüberlauf-Holz in Verbrennungsanlagen erwartet.

4 FAZIT UND AUSBLICK

Insgesamt konnte durch die beiden durchgeführten Aufbereitungskampagnen gezeigt werden, dass die Siebüberläufe durch einfache mechanische Aufbereitungsprozesse erheblich in der Zu-

sammensetzung verändert und der Fremdstoffanteil im erzeugten Restbrennstoff deutlich reduziert werden kann. So kann durch eine erneute Absiebung der Siebreste bei 10 mm die Gesamtmasse der zu entsorgenden Siebreste um bis zu 1/3 reduziert werden, was zum einen Kosten einspart und zum anderen zusätzliche Wertschöpfung durch mehr Kompost generiert. Eine Aufteilung in zwei Teilströme zur separaten Aufbereitung in unterschiedlichen Korngrößen hat sich vor allem für die erzeugte Grobfraktion durch den Effekt der Zopfbildung als nachteilig erwiesen. Das Feinkorn dient bei der Aufbereitung als Puffermaterial und verhindert insbesondere bei Verwendung von Trommelsieben so die Ausbildung starker Verwicklungen. Das durch manuelle Sortierung generierte Referenzmaterial Siebüberlauf-Holz weist zwar gute Verbrennungseigenschaften in Form eines niedrigen Aschegehaltes und hohen Heizwertes auf, jedoch ist aufgrund der hohen Gehalte an Chlor, Natrium und Kalium die Erweichungstemperatur vergleichsweise gering, sodass eine erhöhte Verschlackungsbildung bei einer Verbrennung zu erwarten ist. Diese Erwartung konnte durch erste Verbrennungsversuche im Technikumsmaßstab tendenziell bestätigt werden. Um die Verbrennungseigenschaften neben der Reduzierung des Fremdstoffanteils weiterhin zu verbessern, wird daher derzeit im Rahmen der dritten Aufbereitungskampagne eine nasse Aufbereitung geplant, um die kritischen Elementgehalte zu reduzieren. Darüber hinaus werden weitere Verbrennungsversuche mit unterschiedlichen Brennstoffmischungen durchgeführt, um Verschlackungsneigung und Emissionsverhalten der biogenen Restbrennstoffe zu untersuchen. Abschließend werden im Rahmen des Projektes die unterschiedlichen Verwertungspfade für Siebreste ökologisch und ökonomisch bewertet.

Tab. 1: Vorläufige Ergebnisse der Laboruntersuchungen ausgewählter Brennstoffmaterialien

Brennstoffmaterial			LPM	HHS	SÜ1	SÜ2	SÜH	SÜ>50	BRB>80
Beschreibung			BMHKW	Forstbetrieb	AK1	AK2	AK1	AK1	AK2
Chemische Eigenschaften									
Wassergehalt	ar	Ma.-%	39,6	15,2	39,0	24,2	*29,9	30,0	25,0
Aschegehalt	d	Ma.-%	4,4	3,5	55,6	29,4	5,1	28,5	12,1
Flüchtige	d	Ma.-%	79,5	82,0	35,4	53,0	72,6	53,9	63,0
Heizwert	d	kJ/kg	18.200	18.120	9.700	16.060	18.680	14.930	16.930
Kohlenstoff	d	Ma.-%	47,5	50,1	25,7	36,9	45,0	37,1	48,8
Wasserstoff	d	Ma.-%	5,3	6,1	2,7	4,8	4,7	4,4	6,0
Schwefel	d	Ma.-%	0,09	0,01	0,22	0,17	0,25	0,14	0,11
Stickstoff	d	Ma.-%	0,44	n.b.	1,74	n.b.	0,78	0,77	n.b.
Sauerstoff*	d	Ma.-%	42,3	n.b.	13,9	n.b.	44,3	29,0	n.b.
Chlor	d	Ma.-%	0,013	n.b.	n.b.	n.b.	0,559	n.b.	n.b.
Chlor wl	d	Ma.-%	0,015	0,002	n.b.	n.b.	0,574	n.b.	0,697
K und Na wl	d	Ma.-%	0,226	0,066	n.b.	n.b.	1,16	n.b.	0,025
Ascheschmelzverhalten									
Schrumpfung	°C		1.195	802	1.100	n.b.	533	n.b.	n.b.
Erweichung	°C		1.174	1.202	1.157	n.b.	605	n.b.	n.b.
Halbkugel	°C		1.243	1.257	1.227	n.b.	1.216	n.b.	n.b.
Fließen	°C		1.254	1.290	1.301	n.b.	1.278	n.b.	n.b.

*berechnet; n.b. = nicht bestimmt; wl = wasserlöslich; d = trocken (dry); ar = im Anlieferungszustand (as received); LPM = Landschaftspflegematerial; HHS = Holzhackschnitzel; SÜ = Siebüberlauf; SÜH = Siebüberlauf-Holz; BRB = Biorestbrennstoff

LITERATUR

- Laner, D., & Scheff, V. (2022) *BioRestBrennstoff*. Von Energetische Biomassenutzung: <https://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/BioRestBrennstoff-684> abgerufen
- Niu, Y., Houzhang, T., & Hui, S. (2016) Ash related issues during biomass combustion. *Progress in Energy and Combustion*, S. 1-61.
- Richter, F., Tork, T., Kern, M., & Raussen, T. (2021) *Optimierte Verwertung von Siebresten aus Biogutvergärungs- und -kompostierungsanlagen (Sieb-OPTI)*. Witzenhausen-Institut.

Integration of regional socio-economic LCA and environmental LCA for the assessment of industrial bioeconomy networks

A. Bezama¹, W. Zeug¹, J. Hildebrandt^{1,2} & D. Thrän^{1,3}

¹⁾ Helmholtz Centre for Environmental Research, Department of Bioenergy, Leipzig, Germany

²⁾ Zittau/Görlitz University of Applied Sciences, Institute for Process Development, Peat and Natural Materials Research, Zittau, Germany

³⁾ Deutsches Biomasseforschungszentrum GmbH – DBFZ, Leipzig, Germany

ABSTRACT: This work presents the socio-economic and environmental life cycle evaluation of alternative defossilization pathways for a bio-based industrial network in the Central Germany region. The pathways were defined considering the potential energy utilization of regionally available biomass residual streams. The evaluation has been made using an integrated approach, i.e. using a traditional life cycle assessment methodology, complemented by a regionalized socio-economic life cycle assessment, utilizing the “RESPONSA” framework developed at UFZ. It has been shown that the environmental advantages of the defossilization of the value chain add up to 5% of the reduction of the overall impacts, which was somehow expected due to the already existing integration and optimization in the value chain. The socio-economic results, however, show that the path to defossilization can provide a clear enhancement of the regional socio-economic impacts, which can be of great value to the bioeconomy sector.

1 INTRODUCTION

The current geopolitical situation in Europe has led to revisit the evaluation of energetic independence of countries but also of regions. In this sense, previous works have shown the advantages of implementing regional integration schemes for bio-based production systems to promote the internal exchange of heat and by-products (Hildebrandt et al., 2020) (Bijon et al., 2022; Fytli & Zabaniotou, 2022).

However, there is still a need to establish the effects of the linkages among different disciplines and economic sectors, which can be done through the demonstration of the advantages of the integration of regional infrastructures and biomass residual streams and bio-based resources into already existing bio-based value chains and networks. Here a major role can be expected from organizations outside of the traditional value chains, which includes the involvement of clusters, technological solutions providers as well as service organizations, together with regional and stakeholder groups representing national and regional societal groups (Bezama et al., 2019).

Through this involvement, it is possible to expect a more transparent design of the regional value chains that can complement the current infrastructures for optimizing the regional value chains in terms of their material and energy usage, but also in terms of the socio-economic advantages that they may bring into the regions (Solarte-Toro & Cardona Alzate, 2021; Stark, et al., 2022).

This work intends to analyze from a life cycle perspective the potential advantages of integrating regional bio-based capacities into an already integrated bio-based industrial network, especially considering the full defossilization of its associated energy provision system.

2 MATERIALS AND METHODS

A potential industrial network based in Central Germany has been defined, based on the regional resources' capacities and on the technological alternatives currently under development, which can complement the regional infrastructures. Fig. 1 shows an overview of the case study, considering a mixture of beech wood and coniferous wood as regional resources basis for the production of engineering wood products with a total output of ca. 270,000 Mg/a. The selection of the technological approaches has been made considering the technical alternatives with a technology-readiness-level of at least 6 (i.e. a technological concept that has already been evaluated and demonstrated in an actual system application), and where therefore there can be a consistent

data for the process specifications. The data for specifications of the individual value chains has been previously reported in (Hildebrandt et al., 2020).

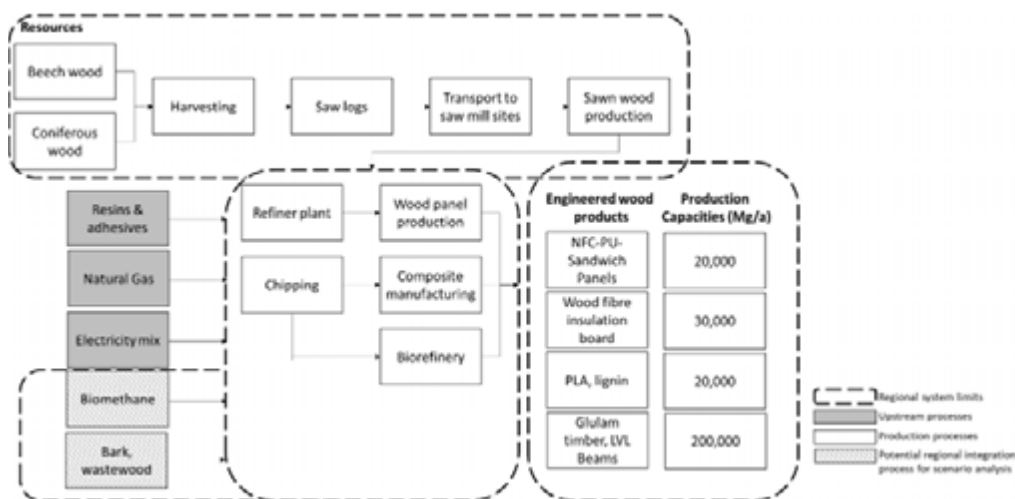


Fig. 1: Definition of the case study

In order to evaluate the potential impacts of introducing a further regional energy integration for the established industrial network, a total of four scenarios (see Tab. 1) were defined, considering the available regional resources as well as their regional capacities.

Tab. 1: Definition of scenarios

Scenario ID	Decoupling degree from natural gas	Types of energy carriers	Further sources of origin for the required biomass
0	0% (Baseline scenario)	Natural gas, bark, industrial wood residues	-
1	25 %	Natural gas, bark, industrial wood residues	-
2	50 %	Natural gas, biomethane, bark, industrial wood residues, waste wood	Fermentation stillage, sewage sludge, LVL production, glulam production, CLT production, waste wood from external waste systems
3	75%	Biomethane from sewage sludge, corn, biowaste; bark, industrial wood residues, waste wood	Fermentation stillage, sewage sludge, LVL production, glulam production, CLT production, waste wood from external waste systems
4	100%	Biomethane from sewage sludge, corn, biowaste; bark, industrial wood residues, waste wood	Fermentation stillage, sewage sludge, LVL production, glulam production, CLT production, waste wood from external waste systems

The first evaluation step consisted on an environmental life cycle assessment. The LCA modelling was performed based on data gathering and aggregation of conversion factors collected from previous published works in the bioeconomy field (Hildebrandt et al., 2019) including allocation factors for by-product valorization. When specifying the life cycle model for engineered wood products the water and energy balances for wood and fiber drying and the waste formation and utilization factors for saw mill by products and for clippings had to be included, which has been retrieved from the existing previous works. Moreover, Table 2 presents some of the most relevant assumptions taken into consideration for preparing the material and energy balances associated to the product system.

Tab. 2: List of main assumptions for the modelling of the processes in the case study

Modelling unit	Assumptions	Sources
energy side	demand for process energy in the production systems of wood manufacturing such as heat for wood drying, fiber drying and electricity for pressing had to be cumulated	(Rüter & Diederichs, 2012; Werner & Richter, 2007)
lignocellulosic biorefinery	the demands for steam, heat and electricity are aggregated and are relying on the life cycle modelling of previous works in the case study region (Hildebrandt et al., 2020; Budzinski & Nitzsche, 2016; Budzinski et al., 2017)	(Hildebrandt et al., 2020; Budzinski & Nitzsche, 2016; Budzinski et al, 2017)
fractionation of wood for producing lignin and lignin derivatives	based on the process developments and findings from the Lead-Edge Cluster Bioeconomy and especially from the works of CBP Leuna.	(Pufky-Heinrich et al., 2016)
	The definition of product alternatives and the specification of process data as life cycle inventory data for the manufacturing of wood-fiber based and lignin-based composite materials was based findings from R&D and implementation activities conducted also in the context of the Leading-Edge Cluster.	(Krombholz et al., 2015) (Werner, 2007)
overall modelling of multi-output product system	set-up by more de-tailed analysis and further scenario specifications and parameter variations included into models established by the authors	(Hildebrandt et al., 2020)

For the evaluation of the socio-economic impacts of the value-added chain, the sLCA model RESPONSA was applied, as proposed by Siebert et al (2018) and modified by (Bezama et al, 2021). 10 organizations were identified from the upstream resource extraction processes to the final products described in Fig.1:

- Organization 1 (O1) corresponds to the forest operations and logistics management located in the Federal State of Thuringia.
- Organization 2 (O2) corresponds to a saw mill in Central Germany. The datasets for the characterization of O1 and O2 have been acquired from previous studies (Jarosch et al., 2020). In order to complete the organizational value chain, a series of facilities have been identified to be participants of the case study.
- Organization 3 (O3), corresponds to a panel production facility.
- Organization 4 (O4) is a composite manufacturer facility.
- The organization 5 (O5) is a biorefinery, and organization 6 (O6) is a facility that produces engineered wood products. For characterizing O3-O6, the social archetypes constructed based on the RESPONSA database, following the methodology proposed by (Siebert et al., 2018) were utilized, considering the regional scale of Central Germany.
- In addition, Organizations 7 and 8 correspond to the producers of resins and adhesives, as well as the energy distributors in the region. Finally, Organization 9 corresponds to a sewage sludge facility, provider of biomethane, and Organization 10 corresponds to an electricity generator from biomass, also located in Central Germany. In the case of these organizations, also the social archetypes from the RESPONSA data-base were used for characterizing their socio-economic performance.

3 RESULTS

Fig. 2 presents the environmental LCA results for the five scenarios (0 to 4) considering the set of 18 ReCiPe 1.08 Endpoint (E) impact categories. As it can be observed, the most significant reductions of negative environmental impacts are achieved for the impact categories ReCiPe 1.08 Endpoint (E) - Climate change, human health and ReCiPe 1.08 Endpoint (E) - Climate change, Ecosystem. In terms of the impacts of the defossilization of the energy provision system within regional limits, the progression of defossilization through scenarios 1-4 shows that the climate change impacts are reduced by around 4%. On the other hand, an increase of negative

environmental impacts is seen when comparing the four scenarios and increasing the share of biogenic energy carriers. Moreover, the categories “Freshwater eutrophication, Fine particulate matter formation” and “Fresh water ecotoxicity” also presented increasing negative impacts of around four to five percent, compared to the baseline scenario.

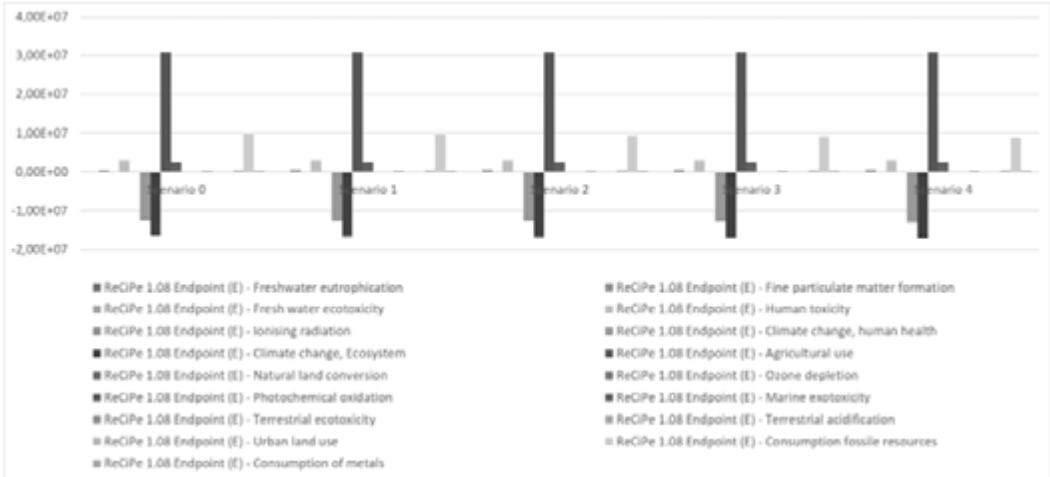


Fig. 2: Total environmental impact results associated to the baseline and defossilization scenarios according to the life cycle assessment modelling

In term of the regional socio-economic effects, Fig. 3 shows the overall characterization values for the RESPONSA indexes, calculated as the average of the individual indexes of the organizations participating in the different scenarios, i.e. not considering an activity functional unit that would consider the actual number of hours associated to the production of the regional bio-based products. It can be observed that the results associated to the baseline scenario (Scenario 0) in terms of their socio-economic performance is rather low. In particular, the indexes “health and safety,” “knowledge capital” and “equal opportunities” all present relatively low in comparison to their regional performance reference points. This is yet another example of how sustainability issues regarding bioeconomy must not be taken for granted when designing integrated bio-based chains. Only through the regional integration for defossilization the overall scores of the resulting networks show increasing socio-economic performances. When reaching a fully defossilization, Fig. 3 shows an average increase of ca 90% in all socio-economic indices of the value chain. This allows to suggest that the further regional integration allows for a more socio-economic competitive region, which is reflected on the number and quality of jobs associated to the regional network. In addition, one could suggest that the indices are affected by an enhanced regional competitiveness which could be a major factor of attention when planning the actual implementation of the value chains in the region, as it may positively affect the social acceptance of the established industrial infrastructures.

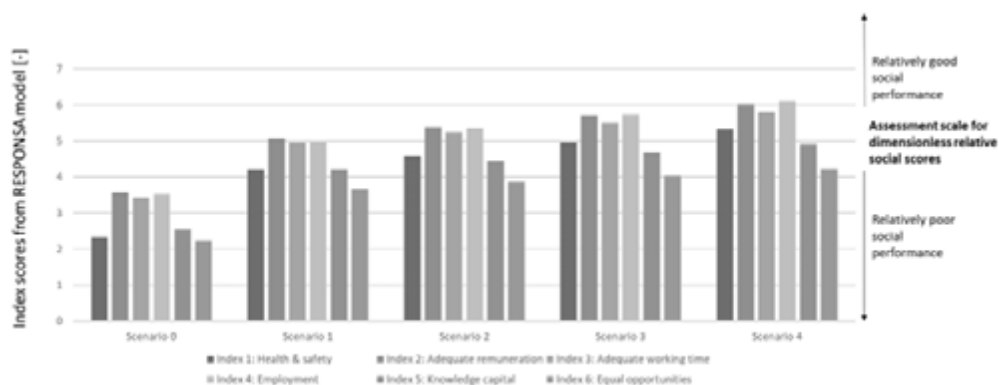


Fig. 3: Results of the RESPONSA modelling for the evaluated scenarios

It can be suggested that implementing an integrated network in the bioeconomy field does bring a series of environmental advantages. The environmental advantages of the defossilization path observed as results of the scenario analysis are quite limited, showing a reduction of around 5% of the total environmental impacts. This situation was nonetheless expected, as the wood industry already has a high level of process energy integration in place. However, for economic competitiveness reasons and for climate protection reasons the fuel switch towards full defossilization of process energy provisioning is a highly relevant mid-term target.

It is however in the analysis of the socioeconomic impacts where the results show more interesting features. The most relevant one is that the path to defossilization of the integrated network implies a further integration within the region, which implies the additional integration of organizations working in the bioeconomy sector. This further integration, even though it deals with a small part of the total mass, implies the improvement of the overall socio-economic conditions within the region.

4 CONCLUSIONS

The ex-ante evaluation of intertwined trade-offs, synergies and optimization constraints of socio-economic and environmental performance of different transformation scenario trajectories for regionally integrated bioeconomy systems is highly important for proper decision making in regional business development, regional economic planning and for regional policy advice for decision makers in different counties and states.

A combination of life cycle approaches as the ones presented in this work can allow to identify a wider range of hotspots and opportunities for the implementation of technological alternatives. This can therefore provide with a more solid decision basis for regional authorities and investors when deciding on the implementation of technological alternatives.

On the other hand, it is important to mention at this point that these results must be considered as preliminary ones. It is expected first, that these potential results can be further refined by the implementation of further primary data coming from the regional organizations that can be potential actors of the value chains involved in this case study. Another important issue is the need to include further socio-economic stakeholder groups in the discussion. Thus far the regional socio-economic life cycle assessment has been carried out by considering three stakeholder groups (i.e. workers, as well as local and national community) in the assessment. In order to align the analysis to the current sLCA guidelines, it would be needed to incorporate the analysis of the stakeholder groups government and value chain actors, which is currently a work in progress.

The market aspects and the constraints on the resources' availability and their associated prices, as well as the energy availability are not included in this analysis, for which it will be taken into consideration in future studies.

REFERENCES

- Bezama, A., Hildebrandt, J., & Thrän, D. (2021). Integrating regionalized socioeconomic considerations onto life cycle assessment for evaluating bioeconomy value chains: A case study on hybrid wood–concrete ceiling elements. *Sustainability-Basel*, 13, art 4221.
- Bezama, A., Ingrao, C., O'Keeffe, S., & Thrän, D. (2019). Resources, collaborators, and neighbors: The three-pronged challenge in the implementation of bioeconomy regions. *Sustainability-Basel*, p. art. 11.
- Bijon, N., Wassenaar, T., Junqua, G., & Dechesne, M. (2022). Towards a sustainable bioeconomy through industrial symbiosis: Current situation and perspectives. *Sustainability-Basel*, p. art. 14.
- Budzinski, M., & Nitzsche, R. (2016). Comparative economic and environmental assessment of four beech wood based biorefinery concepts. *Bioresource Technol*, pp. 216, 613-621.
- Budzinski, M., Bezama, A., & Thrän, D. (2017). Monitoring the progress towards bioeconomy using multi-regional input-output analysis: The example of wood use in Germany. *J Clean Prod*, pp. 161, 1-11.
- Fytli, D., & Zabaniotou, A. (2022). Organizational, societal, knowledge and skills capacity for a low carbon energy transition in a circular waste bioeconomy (cwbe): Observational evidence of the thessaly region in greece. *Sci Total Environ*, p. 813.
- Hildebrandt, J., Bezama, A., & Thrän, D. (2020). Insights from the sustainability monitoring tool SUMINISTRO applied to a case study system of prospective wood-based industry networks in Central Germany. *Sustainability-Basel*, pp. 12, 3896.
- Hildebrandt, J., O'Keeffe, S., Bezama, A., & Thrän, D. (2019). Revealing the environmental advantages of industrial symbiosis in wood-based bioeconomy networks: An assessment from a life cycle perspective. *J Ind Ecol*, pp. 23, 808-822.
- Jarosch, L., Zeug, W., Bezama, A., Finkbeiner, M., & Thrän, D. (2020). A regional socio-economic life cycle assessment of a bioeconomy value chain. *Sustainability-Basel*, 12, art. 1259.
- Krombholz, A., Theumer, T., Hildebrandt, J., Budzinski, M., & Weber, A. (2015). *LCA and mechanics of beech fiber laminates with lignin based phenolic resin systems*. Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH : 11. Holzwerkstoffkolloquium, 2015.
- Pufky-Heinrich, D., Rößiger, B., Röver, R., & Unkelbach, G. (2016). Process scale-up for the production of bioaromatic compounds from lignin. *Chemie Ingenieur Technik*, pp. 88, 1229-1230.
- Rüter, S., & Diederichs, S. (2012). *Ökobilanz-basisdaten für Bauprodukte aus Holz*. Hamburg: Bundesforschungs-institut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei Institut für Holztechnologie und Holzbiologie (HTB), Institut für Holztechnologie und Holzbiologie, Zentrum Holzwirtschaft, Universität Hamburg.
- Siebert, A., O'Keeffe, S., Bezama, A., Zeug, W., & Thrän, D. (2018). How not to compare apples and oranges: Generate context-specific performance reference points for a social life cycle assessment model. *J Clean Prod*, 198, 587-600.
- Solarte-Toro, J., & Cardona Alzate, C. (2021). Biorefineries as the base for accomplishing the sustainable development goals (SDGs) and the transition to bioeconomy: Technical aspects, challenges and perspectives. *Bioresource Technol*, pp. 340, 125626.
- Stark, S., Biber-Freudenberger, L., Dietz, T., Escobar, N., Förster, J., Henderson, J., . . . Börner, J. (2022). Sustainability implications of transformation pathways for the bioeconomy. *Sustainable Production and Consumption*, pp. 29, 215-227.
- Werner, F. (2007). *Life cycle inventories of wood as fuel and construction material; Final report ecoinvent data v2.0*. Dübendorf: Swiss Centre for LCI, Empa - TSL: .
- Werner, F., & Richter, K. (2007). Wooden building products in comparative lca: A literature review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 12, 470-479.

Lebensmittelabfallaufkommen österreichischer Haushalte

G. Obersteiner¹, S. Luck¹, L. Ortega Menjivar¹, M. Pamperl¹ & E. Schmied¹

¹⁾ Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Abfallwirtschaft, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Rund 50 Prozent aller Lebensmittelabfälle werden von Haushalten verursacht. Prinzipiell sind bereits zahlreiche Maßnahmen zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen bei Haushalten bekannt und werden auf unterschiedlichste Weise auch kommuniziert. Dennoch konnte trotz zahlreicher Maßnahmen bisher vor allem im Bereich der Haushalte noch keine relevante Wirkung im Sinne von einem Rückgang der Lebensmittelabfälle erzielt werden. Eine umfassende Wissensbasis über Hindernisse und Widerstände zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen in Haushalten fehlt jedoch nach wie vor. Mit Hilfe einer im Rahmen des ERDF finanzierten Projektes CEWA (Circular Economy of Waste) durchgeführten repräsentativen Umfrage wurden nun erstmals für Österreich, Verbrauchergruppen identifiziert, um gezielt Maßnahmen zur Lebensmittelabfallvermeidung anbieten zu können. Mithilfe von k-medians-Clustering erfolgte eine Aufteilung in Verbrauchergruppen. Die bevorzugte Clusterlösung mit vier Clustern erlaubt die Unterscheidung in zwei Gruppen mit niedrigem Abfallaufkommen und zwei mit hohem Abfallaufkommen wobei die Gruppe der „Unwissende Verschwender“ (mit viel Abfall und wenig Wissen zu Lebensmittelabfällen) als Brennpunktgruppe identifiziert wurde.

1 EINLEITUNG

In der EU werden jährlich etwa 88 Millionen Tonnen an Lebensmittelabfällen verursacht; dies entspricht einem monetären Wert von rund 143 Milliarden Euro (Stenmarck et al. 2016). Entlang der gesamten Wertschöpfungskette - bei jedem Verarbeitungsschritt und auf jeder Ebene - entstehen vermeidbare Lebensmittelabfälle. Insgesamt zeigen die Zahlen für Österreich, Deutschland und die Europäische Union, dass Haushalte für rund 50 % aller Lebensmittelabfälle verantwortlich sind. Das vermeidbare Lebensmittelabfallaufkommen von österreichischen Haushalten wird aktuell auf rund 521.000 Tonnen pro Jahr geschätzt (Obersteiner & Luck 2020).

Die Gründe für die Verschwendung von Lebensmitteln sind vielfältig und können nicht auf einzelne Verhaltensweisen bzw. Einflussfaktoren reduziert werden. Prinzipiell sind bereits zahlreiche Maßnahmen zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen bei Haushalten bekannt und werden auf unterschiedlichste Weise auch kommuniziert und umgesetzt. Dennoch konnte bisher vor allem im Bereich der Haushalte noch keine relevante Wirkung im Sinne von einem Rückgang der Lebensmittelabfälle erzielt werden.

Mittels Befragungen wurde auch bereits mehrfach versucht, fördernde und hindernde Gründe zur Lebensmittelabfallvermeidung bzw. den Hintergrund zum Wegwerfverhalten zu analysieren. Eine gezielte Erarbeitung von Maßnahmen für unterschiedliche Verbraucher bzw. Lebensmittelabfallverursachergruppen fehlt jedoch bisher. Genauso wie die zugrundeliegende Wissensbasis über Hindernisse und Widerstände zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen in österreichischen Haushalten. Mit Hilfe einer im Rahmen des ERDF finanzierten Projektes CEWA (Circular Economy of Waste) durchgeführten repräsentative Umfrage wurden nun erstmals für Österreich, Verbrauchergruppen identifiziert, um gezielt Maßnahmen zur Lebensmittelabfallvermeidung anbieten zu können.

2 METHODE

In Kooperation mit dem Marktforschungsinstitut market wurde im Frühsommer 2021 eine bundesweite, aussagekräftige Repräsentativstudie bei 1002 Haushalten durchgeführt. Die repräsentative Quotierung des Samples umfasst dabei Faktoren wie Alter (5-stufig), Geschlecht, Bundesland sowie Bildung, als Basis dafür dienten die aktuellen Mikrozensus-Daten der Statistik Austria. Der Fragebogen umfasste über 50 Fragen unter anderem Fragen zu Einkaufsverhalten, Umwelteinstellung, Einstellung zu Lebensmittelabfall, Wissen und Umgang mit Lebensmitteln zu Hause

sowie Lebensmittelabfallaufkommen. Nach Bereinigung des Datenmaterials wurden die geeigneten Variablen für ein Clustering ausgewählt. Mithilfe von k-medians-Clustering erfolgte eine Aufteilung in Verbrauchergruppen.

3 ERGEBNISSE UND ZUSAMMENFASSUNG

Die bevorzugte Clusterlösung mit vier Clustern erlaubt die Unterscheidung in zwei Gruppen mit niedrigem Abfallaufkommen und zwei mit hohem Abfallaufkommen wobei die Gruppe der „Unwissende Verschwender“ (mit viel Abfall und wenig Wissen zu Lebensmittelabfällen) als Brennpunktgruppe identifiziert wurde. In diesem Cluster wurden jeweils überdurchschnittlich hohe Angaben in Bezug auf das eigene Lebensmittelabfallaufkommen gemacht. Trotzdem ist die persönliche Wahrnehmung in Bezug auf das eigene Lebensmittelabfallaufkommen äußerst gering. Das könnte in die Richtung interpretiert werden, dass es den Personen in dieser Gruppe nicht bewusst ist, dass sie viele Lebensmittelabfälle erzeugen. Dazu passend sind auch die unterdurchschnittlichen Werte in Bezug auf die Einstellung zur Umwelt allgemein und Lebensmittelabfällen im speziellen und auch das generelle Wissen zum Thema Lebensmittel(abfall) liegt unter dem erwartbaren Durchschnitt. Diesem Cluster wurden 17 % (107 Personen) der Befragten zugeordnet.

Es konnte ein deutlicher Zusammenhang zwischen Clusterzugehörigkeit und Alter nachgewiesen werden. Mit höherem Alter scheint die Wahrscheinlichkeit zu steigen, zu höher nummerierten Clustern zu gehören- also zu denen, die angeben, weniger Lebensmittelabfall zu produzieren. Dieser Zusammenhang wurde getestet und die Altersmittelwerte zeigten sich signifikant unterschiedlich.

Mehr als ein Viertel der Befragten (28 %) gaben an zumindest einmal pro Woche Lebensmittel wegzuerwerfen. Nur 12 % werfen nach eigener Einschätzung keine Lebensmittel weg. Um genauere Kenntnis über die Zusammensetzung der Lebensmittelabfälle zu bekommen, wurden die teilnehmenden Personen gefragt, welches Produkt sie zuletzt entsorgt haben. Am häufigsten (18 % der Antworten) wurde hier Obst genannt, gefolgt von Brot und Gebäck (14 %) und Gemüse (10 %). 75 der 1002 Befragten gaben an, als letztes Milchprodukte entsorgt zu haben (7 %), gekochte Speisen wurden von 6 % der TeilnehmerInnen genannt. Relativ selten (<1 % der Befragten) werden Cerealien und Snacks (süß und salzig) oder Zucker, Mehl und Hülsenfrüchte entsorgt.

Je nach Produktgruppe wurden unterschiedliche Gründe für die Entsorgung genannt. Für Tiefkühlprodukte liegt die Ursache für mehr als 50 % der Befragten bei einem überschrittenen Mindesthaltbarkeitsdatum, generell bei gekochten Speisen, aber vor allem bei Reis und Nudeln konnte als Hauptgrund „zu viel gekocht“ identifiziert werden. Insgesamt ist es aber zumeist sichtbarer Verderb, der zur Entsorgung von Lebensmitteln führt.

LITERATUR

- Obersteiner, G., Luck, S. (2020) Lebensmittelabfälle in österreichischen Haushalten - Status quo. Studie im Auftrag von WWF Österreich
- Stenmarck, Å., Jensen, C., Quedsted, T., Moates, G. (2016) Estimates of European Food Waste Levels. Report of the project FUSIONS (contract number: 311972) granted by the European Commission (FP7). ISBN 978-91-88319-01-2

Die Analysen wurden durch die Finanzierung aus dem Programm INTERREG V-A Österreich – Tschechische Republik ermöglicht.

Comparative analysis of the industrial dust efficiency use as a filler in building composite materials

E.V. Zelinskaia¹, O.V. Ulanova¹, V.V. Barakhtenko¹ & A.E. Burdonov¹

¹⁾ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk region, Irkutsk, Russian Federation

ABSTRACT: The article presents a comparison of the characteristics of several types of industrial dusts in terms of their use as a filler in polymer compositions. To confirm the possibility of using the studied waste, their material composition and properties were studied. The paper presents studies on the processing of industrial dusts into polymer composite materials for construction purposes. The characteristics of the developed composite materials have been studied. The influence on the strength characteristics of composite materials of the shape of dust particles, their size distribution, the value of the specific surface area, and the maximum packing density of particles is determined. The prospects for the use of dispersed mineral waste for the production of building composite materials are considered.

1 INTRODUCTION

Processing of large-tonnage industrial waste is currently an important task to ensure environmental safety. The lack of a full integrated use of raw materials in production, technologies that are not always used to perfection lead to the formation of man-made waste at various stages of the production cycle. One of the problematic stages of the technological schemes of enterprises is the system for cleaning waste gases from metallurgical and thermal power enterprises, where the use of captured industrial dust by returning to the cycle is either not provided for by the technology, or the conditions of these materials, or they are the end product of the technology, like ash and slag at coal-fired power plants. However, such wastes are mostly inert and do not have hazardous properties, so there are technologies for their large-tonnage use, for example, as man-made soil during reclamation or road construction (Bharathi 2022). Also known methods of disposal of dispersed mineral industrial waste is the manufacture of building materials: cement, concrete, ceramics (Gaustad 2020, Mane 2022).

In addition, there are methods for extracting valuable components from technogenic mineral raw materials, since they have a rather diverse microelement composition, where rare earth and precious metals can be the resulting products. These technologies are at different stages of implementation and remain quite controversial in terms of environmental impact, since there is a small amount of extractable elements in mineral industrial waste, and the methods themselves involve the use of an acid solution as an extractant. At the same time, a significant amount of waste remaining after extraction still requires disposal, along with this important factor is the economic issue of such processing (Huang, 2022).

In addition, in most large cities there is another task - the removal of ash and slag waste from waste incinerators. Basically, such wastes are buried in landfills, and valuable components are often extracted from incineration ash and slag, for example, magnetic separation can be used to extract the magnetic fraction, gravity methods can be used to separate the heavy part, which contains metals and alloys, and electroseparation can also be used to extract metals. However, it seems unlikely at the moment to completely process ash and slag from waste incineration, due to the remaining toxic organic and mineral part, as a result of which such material, according to strict legislation, cannot be used, for example, as artificial soil. There are only technologies at enterprises that reduce the degree of danger of ash and slag by various methods. This is done to reduce the cost of disposal, since there are often several categories of landfills, the disposal prices of which depend on the concentration of pollutants in the ash.

The article discusses the method of using various dispersed mineral industrial wastes as functional fillers for structural polymer composite materials, because, as practice shows, the characteristics of these materials coincide with the properties of natural materials used as fillers. The method of obtaining composites is extrusion and injection molding. A comparative analysis of the properties of industrial dusts and the characteristics of composites obtained from them is given.

The development of new polymer compositions using dispersed wastes from various industries as fillers is one of the main modern trends in the development of the production of structural and building materials. The use of such fillers in polymer compositions is due to the goals of reducing the need for polymers in the context of their high cost and to reduce the volume of their use. At the same time, the use of industrial waste with the necessary characteristics can solve several practical problems in the production and operation of polymer composite building materials: reducing the cost of finished products; improvement of technological parameters for the processing of polymer compositions; improving the physical and mechanical properties of the composite and, of course, reducing the negative impact on the environment as a result of industrial waste disposal (Huang 2022).

1.1 Analysis of the characteristics of the studied wastes for use as fillers in polymer compositions

The objects of the study were dispersed fillers - man-made waste from the metallurgical, energy waste processing industries, as well as rigid polyvinyl chloride compositions filled with them. As a filler, the following were used: gas cleaning dust from the refined silicon production of the ZAO Kremniy (Kremniy, CJSC) enterprise, ash and slag mixture from the CHPP-10 enterprise (both - Irkutsk region, Russian Federation), dust from the aspiration system of the slag processing enterprise from municipal waste incineration (EU).

Laboratory studies of samples made it possible to establish the values of the main characteristics of industrial dusts that affect the processing of the polymer-mineral composition and operational properties. Such characteristics are defined by many authors and are criteria for the applicability of materials as fillers. Among the main characteristics are: particle shape, particle size distribution, bulk and true density, particle packing density, particle specific surface area, chemical composition (Simonov-Emel'yanov 2021).

Analysis of the particle size distribution of the studied fillers was carried out on a Fritsch Analysette 22 MicroTec Plus laser granulometer from Fritsch (Germany); The particle shape was determined on a JIB-4500 MultiBeam SEM-FIB double-beam scanning electron microscope (JEOL Ltd.). (Japan) material density was determined in accordance with DIN 18127-1997 Soil; Investigation and testing - Proctor-test; the packing density of the particles and the value of the specific surface area of the particles was calculated by the results of granulometric analysis, microscopy and studies to determine the true and bulk density; The chemical composition was studied using a Varian 730-ES Axial Eur optical emission spectrometer of inductively coupled plasma (Australia) and a Leco SC-144DR analyzer (USA). All tests were carried out in the research laboratories of the Irkutsk National Research Technical University.

1.2 Research results

1.2.1 Particle shape

The study of the shape of particles is important, since this indicator affects the structure, properties and technological parameters of obtaining polymer composites. From studies (Tyutrin, 2021) it is known that the dust particles of silicon production have a spherical shape. Figure 1 shows photographs from an electron scanning microscope.

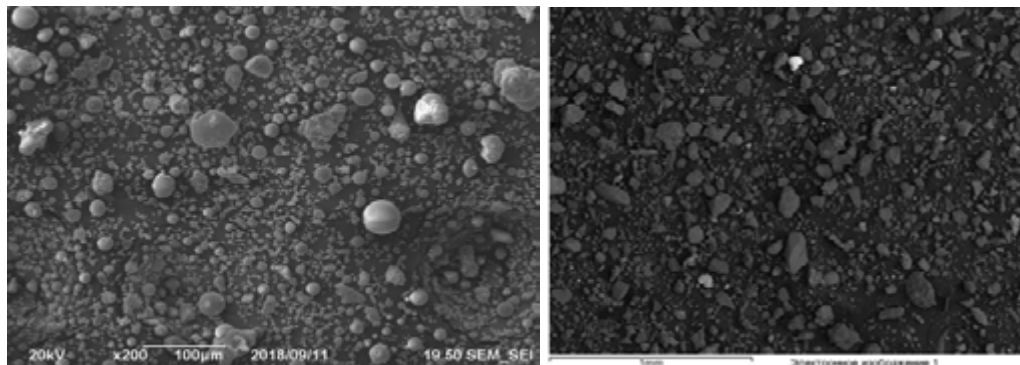


Fig. 1: The shape of the particles of the ash and slag mixture from coal combustion (left) and dust from the aspiration system of the enterprise for processing slag from MSW combustion

Particles of ash and slag mixture from coal combustion have mostly regular spherical shape (microspheres) ranging in size from 2 to 30 microns, among which there are destroyed spherical particles up to 50 microns in size and rounded particles of irregular shape of various sizes. The shape of dust particles from the processing of the aspiration system of the enterprise for processing slag from the incineration of MSW is irregular. Particles in structure are mainly detrital, acute-angled, with a small amount of rounded particles, some particles of a layered type, there are particles of a scaly type, there is a small amount of oblong particles, as well as particles in the form of pieces of irregular shape. Microscopically determined particle sizes in these images range from about tenths to one hundred microns.

1.2.2 Particle Size Distribution

Fig. 2 shows the distribution of particles by size of the studied waste.

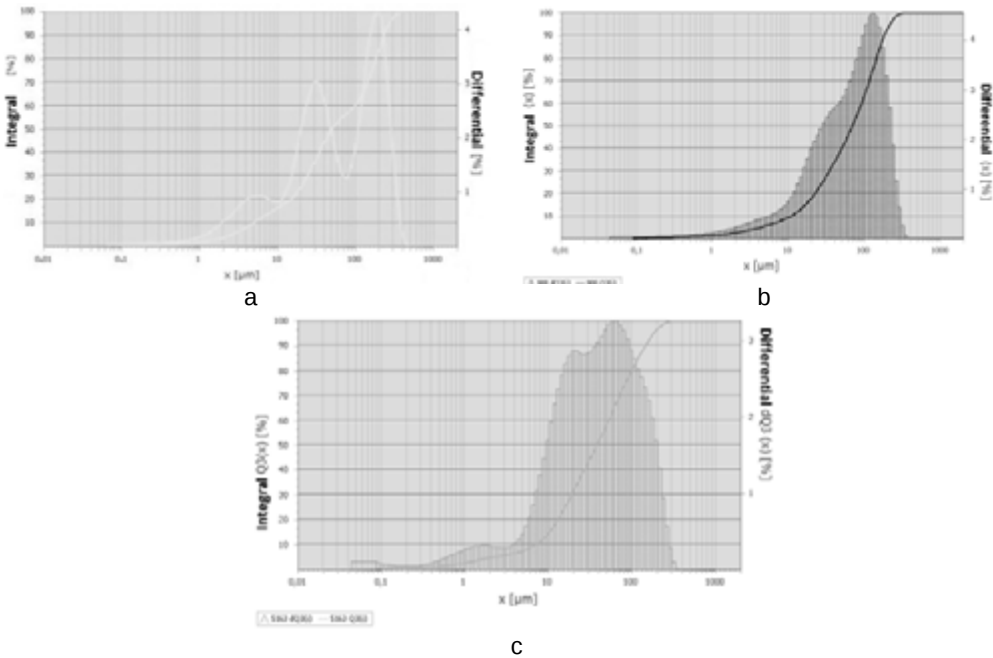


Fig. 2: Granulometric composition of the studied wastes, a - for dust from silicon production, b - for ash and slag from coal combustion, c - aspiration dust from the processing of slag from MSW incineration.

Silicon production dust has a wide particle size distribution ranging from 0.1 to 600 μm . The class of particles with a size range from 20 to 100 μm is contained in the test sample in the largest amount (about 60 %). A sample of ash and slag from coal combustion has a particle size distribution from 0.1 to 400 microns. An analysis of the fineness of the dust of the aspiration system from the processing of slag from the incineration of MSW shows a wide distribution of particles by material size ranging from 0.1 to 350 microns.

Thus, the entire material under study has a wide range of particle size distribution and meets the most important condition for the applicability of materials as fillers in a polymer composition.

1.2.3 Solid and bulk density, specific surface area, particle packing density

The values of the indicators of dispersion of waste particles are presented in Tab. 1. For comparison, the table gives indicators for calcium carbonate, as a widely used filler in polymers.

Tab. 1: Indicators of dispersed fillers

Indicator	Type of filler			
	Silicon dust	Ash and slag coal CHP	Dust MSW from incineration	Calcium carbonate
Mass average diameter, $D_w \cdot 10^{-6}$, m	99,2	55,057	67,551	93,7
Bulk density, ρ_{bulk} , kg/m ³	710	813	1085	575
Solid density, ρ_{solid} , kg/m ³	2650	2000	2306	2200
Shape factor, K	6	6	9	6
Specific surface area, S_{sp} , m ² /kg	189	592,108	441,298	565
Estimated ultimate packing of filler particles, φ_m	0,48	0,256	0,471	0,48

The indicators determined by the calculation method show that the characteristics of the studied waste are comparable to those for the classic filler, and in some cases these characteristics of the waste are much better.

1.2.4 Chemical composition

Chemical analysis of silicon dust and ash and slag from coal combustion did not reveal toxic components, namely, heavy metals (copper, zinc, nickel, lead, chromium, cobalt, cadmium, mercury) and arsenic, or their trace concentrations. An analysis of dust aspiration from the processing of slag from MSW incineration showed that the indicators for heavy metals exceed the standards (Vollzugshilfe VVEA 2021) disposal at landfills and use in concrete, however, the analysis of highly toxic organic compounds did not reveal their presence.

2 THE USE OF THE STUDIED WASTES AS FILLERS OF THE POLYMER COMPOSITION

After studying the properties of the waste, laboratory and pilot experiments were carried out to develop formulations of polymer compositions based on polyvinyl chloride. As a result, building composites in the form of a decking board used for decking were obtained on a twin-screw conical extruder. New composites have been tested for combustibility, physical, mechanical and consumer properties in certified laboratories. Tests have shown a significant advantage of the developed composite in terms of strength properties, compared with the analogue material, wood-polymer composite, widely used in the manufacture of decking. Also, the material does not spread flame and is self-extinguishing. In addition, it does not absorb moisture, is not wetted by water, and has a high resistance to UV radiation.

In addition to building materials, the new composite can be used to produce various machine building parts for other industries.

3 CONCLUSION

An analysis of all the necessary properties of the studied waste confirms the fundamental possibility of their use for the production of polymer composites.

Samples of composites filled with waste were obtained in laboratory and pilot industrial conditions, the study of the properties of which showed the promise of their application.

At the moment, there are standards for the content of heavy metals only for raw materials entering concrete and for the disposal of waste incineration at landfills. In accordance with these standards, the content of heavy metals in aspiration dust from the processing of waste incineration slags is exceeded. It is necessary to develop a new standard with regulations, and then conduct additional studies of materials for compliance with sanitary and hygienic requirements.

At the same time, our research has established that when dust is used in polymer composites, it will be in a bound state inside the polymer matrix. As a result, emissions of pollutants will be minimal or absent.

REFERENCES

- Bharathi, K.P.P., Adari, S.K., Pallemamula, U. (2022) *Mechanical properties of self-compacting concrete using steel slag and glass powder*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation 7, Band 1. <https://doi.org/10.1007/s41024-022-00184-z>.
- Gaustad, G., Williams, E., Leader, A. (2021) *Rare earth metals from secondary sources: Review of potential supply from waste and byproducts*. Resources, Conservation and Recycling 167. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105213>.
- Huang, Y., Lu, L., Ding, C., Pan, M. (2022) *Eco-friendly wood-plastic composites from laminate sanding dust and waste poly(propylene) food pails*. Waste Management 149, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.012>.
- Liu, J., Fan, X., Li, Z., Zhang, W., Jin, H., Xing, F., Tang, L. (2022) *Novel recycling application of high volume municipal solid waste incineration bottom ash (MSWIBA) into sustainable concrete*. Science of the Total Environment 838. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156124>.
- Ma, Y., Zhao, H., Zhang, X., Fan, C., Zhuang, T., Sun, C., Zhao, S. (2022) *Structure optimization of pyrolysis carbon black from waste tire and its application in natural rubber composites*. Applied Surface Science 593. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153389>.
- Mane, K.M., Joshi, A.M., Kulkarni, D.K., Prakash, K.B. (2022) *Influence of retempering on properties of concrete made with manufactured sand and industrial waste*. Cleaner Materials 4. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100060>.
- Simonov-Emel'yanov, I.D., Apeksimov, N.V., Shalgunov S.I. (2021) *Generalized Parameters of the Structure of Reinforced Plastics and Their Classification and Properties*. Theoretical Foundations of Chemical Engineering 55, Band 4, 725–36. <https://doi.org/10.1134/S0040579521040333>.
- Tyutrin, A. & Vologin A.S. (2021) *Analysis of the composition and properties of the silicon production wet cleaning sludge to identify sustainable techniques for its processing*. Solid State Phenomena 316 SSP, 649–54.
- Vollzugshilfe VVEA, BAFU (2021) <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/publikationen-studien/publikationen/vollzugshilfe-vvea.html>4.

Deep Learning basiertes Sortieren von Aluminiumschrott auf Grundlage von Röntgentransmissionsdaten

S. Rüger¹, J. Goschenhofer^{1,2}, A. Nath¹, M. Firsching¹, A. Ennen¹ & B. Bischl^{1,2}

¹) Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Erlangen, Deutschland

²) Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Statistik, München, Deutschland

KURZFASSUNG: In dieser Arbeit wird ein Deep Learning basiertes Sortiersystem vorgestellt, mit dem es möglich ist, relevante Merkmale für die Sortierentscheidungen von Grund auf aus den erfassten Daten zu erlernen. Wir orientieren uns an einer anwendernahen Fragestellung im Kontext des Recyclings: Die Sortierung von End-of-Life Aluminiumschrott in eine hochwertige reine Aluminiumfraktion und in eine minderwertige Restfraktion. Wir verwenden Röntgentransmissionsdaten, die von zerkleinerten Haushaltsaltgeräten stammen. Für die Modellevaluierung verwenden wir ein auf die Datenlage zugeschnittenes Verfahren und eine im Recyclingkontext stehende Metrik. Unsere Arbeit zeigt vielversprechende Ergebnisse für die automatische Aluminiumsortierung mittels Deep Learning, wir erreichen einen F_β von 91,74 % und eine resultierende Präzision von 93,08 %. Neben einer ausreichend starken Modell-Performanz hängt der endgültige Einsatz solcher Deep Learning Ansätze von dem Vertrauen in solche Modelle ab. Wir setzen daher moderne erklärbare KI-Methoden ein, um diese Black-Box-Modelle zu öffnen und Einblicke in die Art und Weise zu geben, wie das Modell seine Vorhersagen über verschiedene Inputdaten hinweg trifft.

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Eine gesicherte Verfügbarkeit an Rohstoffen für die Industrie und die zunehmende Verknappung an Rohmaterialien bestärken die Ziele der Kreislaufwirtschaft und rücken den Einsatz von Sekundärrohstoffen stärker in den Fokus. Ein Teil der Kreislaufwirtschaft ist die Recyclingindustrie, durch die es möglich wird, effizient und nachhaltig die enthaltenen Materialien in Altgeräten zur Wiederverwertung aufzubereiten und die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen zu sichern. Dies erfordert robuste und präzise Sortiersysteme, die zwischen verschiedenen Materialien unterscheiden können. Die aktuell eingesetzten Systeme verwenden hauptsächlich regelbasierte Methoden, die von menschlichen Experten parametrisiert werden müssen und kaum Informationen über die tatsächliche Sortierentscheidung liefern, die für den Prozess der Rohstoffrückgewinnung wertvoll wären. Diese Parametrisierung ist eine zeitintensive Aufgabe, das Expertenwissen erfordert. In dieser Arbeit schlagen wir eine auf Deep Learning (DL) basierende Pipeline vor, um diesen Prozess zu automatisieren und die Sortierentscheidung auf datengesteuerte Weise zu erlernen.

Unsere Arbeit stellt ein Multirater-Annotationsverfahren für die Erfassung der Datenbasis vor, die benötigt wird, um Deep Learning Modelle zu trainieren. Hierfür stand die Bewertung der Annotationsentscheidung von angelernten Nicht-Experten und Fachexperten der Röntgentechnik und Recyclingdomäne im Fokus. Des Weiteren wurden verschiedene Deep Learning Architekturen und Methoden mit einem individualisierten Modellbewertungsschema untersucht, das zusätzlich je nach zugrundeliegender Fragestellung adaptierbar ist. Darüber hinaus wurden erklärbare KI-Methoden erforscht, um das Vertrauen in solche Modelle zu fördern.

Unsere Hypothesen wurden anhand einer im Recyclingkontext stehenden realen Fragestellung durchgeführt: die automatisierte Sortierung von Aluminiumschrott in eine hochwertige und reine Aluminium- und eine minderwertige Restfraktion auf der Grundlage von Dual Energie Röntgentransmissionsaufnahmen (DE-XRT) von zerkleinerten Haushaltsaltgeräten.

2 ERSTELLUNG DER DATENBASIS

Der verwendete Materialienstrom beinhaltet End-of-Life (EoL) Haushaltsgeräte (Weiße Ware) für das Recycling. Diese wurden in einem vorangestellten Prozessschritt zu sogenannten Flakes zerkleinert, bevor sie auf einem Förderband durch ein Röntgensystem für die Datenaufnahme

befördert wurden. Zur Erstellung einer repräsentativen Datenbasis für das Training von Deep Learning Modellen gehört nicht nur eine auf die Lernmethode zugeschnittene Datenvorverarbeitung, zusätzlich wird auch eine Zuweisung jedes einzelnen zugrundeliegenden Samples in eine Sortierfraktion (Datenannotation) benötigt, das im Folgenden näher erläutert wird.

2.1 Datenaufnahme

Dem DL Modell liegen Dual Energie Röntgentransmission (DE-XRT) Daten zugrunde. Für deren Erzeugung wurden die zerkleinerten Flakes mittels eines Förderbandes durch ein Röntgensystem befördert, das aus einer Röntgenquelle und einem Dual Energie Zeilendetektor besteht. Als Aufnahmeparameter wurde eine Röhrenspannung von 160 kV und ein Röhrenstrom von 2 mA verwendet. Der Dual Energie Zeilendetektor besteht aus 896 Pixeln mit einem Pixelabstand von 1,6 mm.

Die XRT Aufnahmen liefern materialspezifische Informationen, die der resultierenden Intensität $I(E)$ nach einer exponentiellen Änderung der Anfangsintensität $I_0(E)$ durch den Massenschwächungskoeffizienten $\mu'(E)$ des zugrundeliegenden Materials und der Flächendichte p gemäß dem Lambert-Beer'sches Gesetz (Firsching et al. 2011) entsprechen (Gleichung (1)):

$$I(E) = I_0(E) e^{-\mu'(E)p} \quad (1)$$

Durch gezielte Vorfilterung auf Seiten des Dual Energie Zeilendetektors liegen zwei Informationen je Pixel vor. Abbildung 1 zeigt die einzelnen Schritte der Datenvorverarbeitung der zerkleinerten Flakes 1), die auf einem Förderband mit dem DE-XRT System aufgenommen 2) und die detektierten Röntgenzeilen 3) zu einem fortlaufenden Bild zusammengesetzt wurden 4). Aus diesem wurden die einzelnen Flakes mittels eines Schwellenwertverfahrens extrahiert 5) und in dem letzten Vorverarbeitungsschritt in einem $222 \times 224 \times 2$ dimensionalen Eingangsbild für das DL Modell zentriert 6).



Abb. 1: Veranschaulichung der einzelnen Schritte von der Datenaufnahme bis hin zu den vorverarbeitenden Eingangsdaten für das Deep Learning Modell

2.2 Datenannotation

Für das Training von überwachten Lernverfahren wird zusätzlich zu den Eingangsdaten eine Zuordnung dieser in entsprechende Klassen benötigt. In dieser Arbeit haben wir einen weiteren Fokus auf die Zuweisung in Klassen, mit Hilfe von mehreren menschlichen Annotatoren, gelegt. Unser Annotationskomitee bestand aus zwei Experten aus dem Fachbereich der Röntgentechnik und der Recyclingdomäne und weiteren drei Domänenfernen Personen (Nicht-Experten). Dabei galt es zu untersuchen, ob eingewiesene Nicht-Experten in der Lage sind eigenständig eine sichere Klassenzuweisung der Eingangsdaten vornehmen zu können. Hierfür war das übergeordnete Ziel, jeden Flake als reines Aluminium oder restliches Material zu klassifizieren. Diese Entscheidung wurde von jedem Annotator eigenständig getroffen.

Als Annotationsgrundlage wurden die DE-XRT Daten, die als Graustufenbilder zur Verfügung stehen (6 in Abb. 1), vorab auf das menschliche visuelle System hin mittels zweier Methoden adaptiert. In Abbildung 2 sind die Methoden gezeigt. Zuerst erfolgt eine Verarbeitung der DE-XRT Daten zu Materialspezifischen Informationen mittels der Basismaterialzerlegung (Firsching et al.

2011) (I in Abb. 2) und in einem weiteren Schritt wird eine Falschfarben Darstellung der verarbeiteten Daten (II in Abb. 2) vorgenommen. Das Ergebnis dient ausschließlich dem Annotationsprozess und erleichtert die Klassenzuweisung für die Annotatoren.



Abb. 2: Verarbeitungsmethoden der DE-XRT Daten zu als Annotationsgrundlage dienenden Farbbildern. Exemplarisch gezeigt anhand der beiden Klassen, die es galt zu annotieren

Für die Bewertung der Annotationsqualität zwischen Experten und Nicht-Experten wurden zufällig Hundert Flakes aus den Daten gewählt und die Klassenzuweisung aller Annotatoren miteinander verglichen. Als Kriterium dient Cohens Kappa Maß (Cohen 1960), (McHugh 2012). Es liefert Werte zwischen $\kappa \in [0; 1]$, die die Urteilsübereinstimmung zweier Annotatoren misst. Dabei werden folgende Unterteilungen gemacht (siehe Abb. 3):

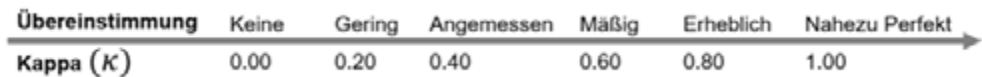


Abb. 3: Unterteilung der Kappa-Werte für die Urteilsübereinstimmung

Basierend auf den erzielten Ergebnissen (siehe Tab. 1) konnte zum einen beobachtet werden, dass die Zuweisung der zugrundeliegenden Annotationsentscheidung nicht trivial ist. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass auch durch Experten eingewiesene Domänenferne Personen (Nicht-Experten) in der Lage sind, eigenständig zu annotieren. Dies geht aus dem erzielten *angemessenen* bis *erheblichen* Ergebnissen des Cohens Kappa Maß hervor. Basierend auf diesen beiden Beobachtungen haben wir uns entschieden a) eingewiesene Nicht-Experten sind in der Lage eigenständig zu annotieren und b) einhergehend mit der Komplexität der Annotationsentscheidungen jeden Flake individuell von jedem Annotator bewerten zu lassen.

Tab. 1: Resultate der erzielten Cohens Kappa Maße zwischen Experten und Domänenfernen Personen (Nicht-Experten)

	Experte Nr. 1	Experte Nr. 2	Nicht- Experte Nr. 1	Nicht- Experte Nr. 2	Nicht- Experte Nr. 3
Experte Nr. 1	1	0,62	0,58	0,72	0,68
Experte Nr. 2	0,62	1	0,40	0,47	0,53
Nicht-Experte Nr. 1	0,58	0,40	1	0,59	0,69
Nicht-Experte Nr. 2	0,72	0,47	0,59	1	0,76
Nicht-Experte Nr. 3	0,68	0,53	0,69	0,76	1

Insgesamt wurden zufällig 3000 Flakes aus den 7346 vorverarbeiteten DE-XRT Daten (erläutert in Kapitel 2.2) ausgewählt und von jedem Annotator begutachtet und einer Klasse $Y \in \{0, 1\}$ zugewiesen. Dabei steht 0 für die reine Aluminium-Klasse und 1 für die restlichen Materialien. Eine Klassenverteilung im Verhältnis ca. 1:2 von reinem Aluminium zu restlichen Materialien hat sich hieraus ergeben. Resultierend aus der übereinstimmenden Klassenzuweisung der drei Annotatoren gelten 2172 Flakes als „sichere“ Annotation, die verbleibenden 828 Flakes gelten als „rauschig“ annotiert.

3 MACHINE LEARNING METHODIK

Methoden aus dem Bereich des Maschinellen Lernens lassen sich in un-, semi- und überwachte Lernverfahren gliedern. Dabei müssen bei dem überwachten Lernen zusätzlich zu den Eingangsdaten auch entsprechende Labels (Klassenzuweisung) für jedes Sample verfügbar sein. Im Gegensatz dazu benötigen Methoden aus dem unüberwachten Lernen keine Labels für eine Identifikation von Mustern innerhalb der Eingangsdaten, um diese zu gruppieren. Jedoch kann hierbei

auch keine spezifische Zuweisung in die „gesuchten“ Fraktionen (Labels) erfolgen. Eine Möglichkeit zwischen einer vollständig annotierten Datenbasis, deren Erstellung meist mit viel Zeit und hohe Kosten verbunden ist und Sampeln die keine Labels tragen, aber auf die Datenbasis bezogene Merkmale enthalten, kann mit Lernmethoden aus dem Bereich des semi-überwachten Lernens realisiert werden (siehe Abb. 4).

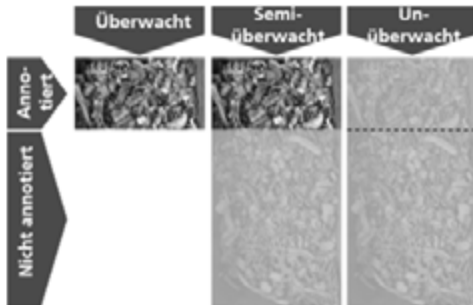


Abb. 4: Veranschaulichung der zugrundeliegenden Datenbasis bestehend aus annotierten und nicht annotierten Sampeln bezugnehmend auf die un-, semi- und überwachten Lernverfahren

Die Experimente dieser Arbeit umfassen Methodiken aus den drei Bereichen des Maschinellen Lernens. Dabei wurde bei dem überwachten und semi-überwachten Lernen das Deep Learning fokussiert und folgende Experimente untersucht (Rüger et al. 2022):

1. Verwendung verschiedener Modell-Architekturen. Mit dem Ziel zu beobachten, ob sich unterschiedliche Designs der Architektur besser für die zugrundeliegende Datenbasis eignen. Hierfür wurde ein ResNet18 (He et al. 2016) und verschiedene Varianten des EfficientNet (Tan & Le 2019) untersucht.
2. Kontrolle über Anzahl und Stärke von Datenerweiterungsstrategien mit der RandAug Methode (Cubuk et al. 2020). Mit den Strategien der Datenerweiterung lassen sich die Eingangsdaten transformieren, sodass bei dem Training der Modelle möglichst robuste Merkmale erlernt werden auf denen die zu treffende Entscheidung über die Klassenzugehörigkeit basiert. Hierfür wurden Methoden wie: Rotation, Kippen, Kontrastveränderungen und Rauschen (Salz & Pfeffer, Gaussian-Noise) integriert.
3. Umgang mit dem Annotations-Rauschen, das durch unterschiedliche Klassenzuweisung desselben Flake durch die drei Annotatoren entsteht.
 - a. Saubere Annotationen: 100 %ige Übereinstimmung bei der Klassenzuweisung aller drei Annotatoren
 - b. Mehrheitsvotum: Die Mehrheit wird als globale Klasse ausgewählt (Tanno et al. 2019)
 - c. Soft Annotations: Die Annotationen werden zu einem kontinuierlichem Wert als globale Annotation gemittelt $y_i \in \{0\%, 33\%, 67\%, 100\%\}$ (Szegedy 2016)

Hinzu kommen Experimente aus dem unüberwachten Lernen bei denen Methoden wie k-Means und Gaussian-Mixture-Modelle (GMM) verwendet wurde (Hastie et al. 2009). Diese ermöglichen eine Gruppierung der Eingangsdaten in k Gruppen ohne Kenntnisse über deren Annotation zu haben (siehe Abb. 4). In dieser Arbeit ist die Anzahl der Gruppen $k=2$ hinsichtlich der zu erzielenden Gruppierung in reines Aluminium und restliche Materialien. Als Eingangsdaten der Methoden dienen Merkmale, die mittels eigens konzipierten Verfahrens aus den DE-XRT Daten berechnet wurden. Da die Klassenzugehörigkeit bei unüberwachten Methoden unbekannt ist, wurden für die finale Klassifizierung die als „sauber“ annotierten Trainingsdaten observiert und die Gruppenzugehörigkeit bezogen auf deren Ergebnis hin vergeben.

Alle Methoden wurden bezogen auf das Klassifizierungsergebnis der Flakes zu reinem Aluminium oder restlichen Materialien hin ausgewertet und untereinander verglichen. Die erzielten Ergebnisse sind in Kapitel 5 dargestellt.

4 ERKLÄRBARKEIT DER MODELLE

Erklärbare KI-Methoden (XAI) ermöglichen das Vertrauen von Dritten in die Entscheidung des Modelles zu schaffen, erleichtern die Fehlersuche bei der Entwicklung, helfen bei der Interpretation erlernter Merkmale und unterstützen den Modelleinsatz in der realen Welt (Geirhos 2020). Wir haben uns auf lokale Interpretationsmethoden konzentriert, die es ermöglichen den Anteil jedes Eingangspixels an der Modellvorhersage zu bewerten. Attribution Maps ermöglichen die Berechnung von pixelweisen Attribution-Werten, wodurch die Zuordnung des Pixels zu den zugrundeliegenden, vorhergesagten Klassen beschreibbar wird. Hierfür verwenden wir die Methode Expected Gradient SHAP (Rüger et al. 2022), welche wiederum auf dem Konzept der Shapley-Values (Shapley 1952) basiert. Abb. 5 zeigt Resultate für die Pixel, die der absoluten Entscheidung zugehörig sind und der klassenspezifischen Attribution-Werte, bei denen -1 zur Entscheidung für reines Aluminium beiträgt und +1 entscheidend für die restlichen Materialien ist. Zusätzlich können die visualisierten Modellentscheidungen der Attribution Maps für eine bessere Interpretierbarkeit auch der Ausgabe der physikalischen Methode, die Basismaterialzerlegung (siehe Abbildung 5), gegenübergestellt werden.

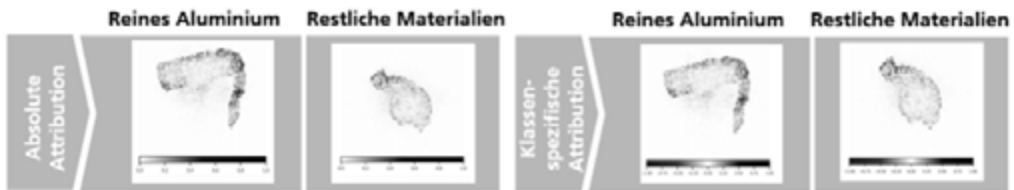


Abb. 5: Visualisierung der absoluten Attribution Maps (links) und der klassenspezifischen Attribution (rechts) hierbei beziehen sich die Farbwerte -1 (rot) auf eine Entscheidung des Modelles für reines Aluminium und +1 (blau) für restliche Materialien

5 EVALUATION DER ERGEBNISSE

5.1 Bewertungsmaß

Für die Bewertung der Modellergebnisse dient das F_β Maß (Gleichung (2)), das eine Anpassung mit dem β -Parameter an das im Recyclingkontext geforderte Ziel, einer reinen Aluminiumsortierung, ermöglicht.

$$F_\beta = \frac{(1+\beta^2) TP}{(1+\beta^2) TP + \beta^2 FN + FP} \quad (2)$$

In Absprache mit Domänenexperten ergab sich ein β von 0,2, dass eine falsch positiv (FP) Klassifizierung fünfmal so teuer gewichtet wie eine falsch negativ (FN) Klassifizierung, wenn ein positives Label (TP) der Aluminium-Klasse entspricht. In der Praxis bedeutet dies, dass die Fehlklassifizierung einer tatsächlichen Rest-Klasse fünfmal höhere Kosten verursacht wie eine fehlerhafte Klassifizierung der Aluminium-Klasse als Rest.

5.2 Bewertungsschema und erzielte Resultate

Für eine realistische Einschätzung der Generalisierungsleistung des endgültigen Modells, trotz begrenzter Größe der annotierten Datenbasis, haben wir ein fünffaches Kreuzvalidierungsverfahren als äußere Schleife zum Testen der Modelle (Hastie et al. 2009) verwendet. Darüber hinaus haben wir eine innere Schleife mit einem Holdout-Validierungssplit verwendet, um die optimalen Hyperparameter mittels des Hyperband-Algorithmus (Li 2017) zu ermitteln. Es wurde ein Test- und Validierungsverhältnis von jeweils 20 % mit konsistent Validierungs- und Testdaten verwendet. Das Optimierungsbudget wurde auf 100 GPU-Stunden festgelegt und das Bewertungsmaß aus Abschnitt 5.1 verwendet. Für die erzielten Resultate (siehe Tab. 2) wird der arithmetische Mittelwert der Modell-Performanz über alle fünf Folds hinweg angegeben.

Tab. 2: Finale Resultate der einzelnen Experimente

Lernverfahren	Modelle und Methoden	$F_{\beta=0,2}$
Unüberwacht	k-Means	76,28 %
Unüberwacht	GMM	76,70 %
Semi-überwacht	ResNet18 mit Fix-Match (Sohn, et al. 2020)	89,00 %
Überwacht	ResNet18 keine Datenerweiterung	87,12 %
Überwacht	ResNet18 fixe Datenerweiterung	87,60 %
Überwacht	ResNet18 mit RandAug Methode	87,88 %
Überwacht	ResNet18 mit RandAug und Soft Annotation	86,98 %
Überwacht	ResNet18 mit RandAug und Saubere Annotation	87,88 %
Überwacht	ResNet18 mit RandAug und Mehrheitsvotum	88,72 %
Überwacht	EffNet-B0 fixe Datenerweiterung und Saubere Annotation	88,36 %
Überwacht	EffNet-B2 fixe Datenerweiterung und Saubere Annotation	89,56 %
Überwacht	EffNet-B4 fixe Datenerweiterung und Saubere Annotation	91,74 %

6 ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurden verschiedene Maschinelle Lernmethoden aus dem Bereich des un-, semi- und überwachten Lernens für die automatisierte Sortierung von zerkleinertem End-of-Life Aluminiumschrott in eine hochwertige Aluminium- und restliche Materialien Fraktion auf der Grundlage von Dual Energie Röntgentransmission Daten evaluiert. Wir stellen ein Multilater-Annotations-system für die Erfassung der Datenbasis vor. Des Weiteren wurde das Potential verschiedener Methoden und Deep Learning Architekturen von unterschiedlicher Komplexität und Design untersucht. Zusätzlich wurde ein realistisches Modellbewertungsschema und Bewertungsmaß vorgestellt und der Einsatz von erklärbaren KI-Methoden erforscht. Es wurden $F_{\beta=0,2}$ Ergebnisse in dem un-, semi- und überwachten Lernen von 76,70 %, 89,00 % und 91,74 % erzielt.

LITERATUR

- Cohen, J. (1960) *A coefficient of agreement for nominal scales*. Educational and Psychological Measurement, 20, S. 37-46. doi:10.1177/001316446002000104
- Cubuk, E. D., Zoph, B., Shlens, J., Le, Q. V. (2020) *RandAugment: Practical automated data augmentation with a reduced search space*. Neural Information Processing Systems, 34, S. 18613-18624.
- Firsching, M., Nachtrab, F., Uhlmann, N., Hanke, R. (2011) *Multi-Energy X-ray Imaging as a Quantitative Method for Materials Characterization*. Advanced Materials, 23, S. 2655-2656.
- Geirhos, R. a.-H. (2020) *Shortcut learning in deep neural networks*. Nature Machine Intelligence, 2(11), S. 665-673.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H. (2009) *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. New York: springer.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. (2016) *Deep residual learning for image recognition*. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (S. 770-778).
- Li, L. a. (2017) *Hyperband: A novel bandit-based approach to hyperparameter optimization*. The Journal of Machine Learning Research, S. 6765-6816.
- McHugh, M. L. (2012) *Interrater reliability: the kappa statistic*. Biochemia medica, 22, S. 276-282.
- Rüger, S., Goschenhofer, J., Nath, A., Firsching, M., Ennen, A., Bischl, B. (2022) *Deep-Learning-based Aluminum Sorting on Dual Energy X-Ray Transmission Data*. Sensor-Based Sorting & Control, 9. Aachen.
- Shapley, L. S. (1952) *A Value for N-Person Games*. Santa Monica, CA: RAND Corporation.
- Sohn, K., Berthelot, D., Carlini, N., Zhang, Z., Zhang, H., Raffel, C. A., Li, C. L. (2020) *Fixmatch: Simplifying semi-supervised learning with consistency and confidence*. Advances in Neural Information Processing Systems, 33, S. 596-608.
- Szegedy, C. a. (2016) *Rethinking the inception architecture for computer vision*. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 2818-2826.
- Tan, M., Le, Q. (2019) *EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks*. International Conference on Machine Learning, 97, S. 6105-6114.
- Tanno, R., Saeedi, A., Sankaranarayanan, D., Alexander, D. C., Silberman, N. (2019) *Learning From Noisy Labels by Regularized Estimation of Annotator Confusion*. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (S. 11236-11245). doi:10.1109/CVPR.2019.01150

Destillation als Recyclingmethode für metallische Rohstoffe

D. Böhm^{1,2,3}, D. Weißbach^{1,2,3}, S. Gottlieb^{1,2,4}, G. Ruprecht^{1,2}, A. Huke^{1,2} & K. Czerski^{1,2,3}

¹⁾ Dual Fluid Energy Inc., Vancouver, Kanada

²⁾ Institut für Festkörper-Kernphysik, Berlin, Deutschland

³⁾ Universität Stettin, Stettin, Polen

⁴⁾ Fachhochschule Dortmund, Dortmund, Deutschland

KURZFASSUNG: Diese Studie beschreibt ein alternatives Trennkonzzept bestehend aus Chlorierung, Entspannungsverdampfung und Destillation für das Recycling von Seltenen Erden und anderen metallischen Wertstoffen wie Titan oder Lithium. Ziel war die Abschätzung der Machbarkeit und des Aufwands dieser möglichen Recyclingoptionen. Dabei zeigten Simulationsergebnisse unter idealisierten Phasengleichgewichtsbedingungen, dass Neodym und Dysprosium als gemeinsame Gemische aus NdFeB-Magneten als hochsiedende Produkte innerhalb einer 12-14-stufigen Trennkolonne bei Temperaturen bis 1594°C mit hoher Reinheit destillativ abgetrennt und somit als Rohstoffe zurückgewonnen werden können. Die Rückgewinnung von Titan aus TiAlV-Legierungen und FeNiCr-Legierungen erwies sich nach den Simulationsergebnissen auch bei Temperaturen von 136°C bis 316°C als leichtsiedendes Produkt in einer 8-18-stufigen Destillationskolonne als verfahrenstechnisch machbar, sofern nur sehr geringe Mengen an Aluminium und Zirkonium in den Legierungen vorhanden sind. Analoge Ergebnisse wurden bei der Simulation der Lithiumtrennung als Schwersieder in einer 22-stufigen Destillationskolonne beobachtet, allerdings bei höheren Temperaturen von 1026-1382°C.

1 EINFÜHRUNG IN TRENNPROBLEMATIK UND RECYCLINGSTRATEGIE

Der Rohstoffbericht der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Deutschland (Marscheider-Weidemann 2016) rechnet mit einem deutlichen Anstieg des Bedarfs an seltenen Erden und metallischen Rohstoffen für die kommenden Jahrzehnte. Darum und aus Gründen der Nachhaltigkeit, könnte das Recycling von primär seltenen metallischen Rohstoffen bald zu einem industriellen Schlüsselprozess werden. Potenzielle Anwendungsgebiete sind Leichte Seltene Erden (Scandium & Lanthan bis Europium), die vor allem für NdFeB-Magneten in Windkraftanlagen und mechanischen Antriebssystemen benötigt werden, außerdem für Autos, Handys und PCs. Trotz der umweltbelastenden Rohstoffgewinnung durch den Bergbau und die Gewinnung dieser selten vorkommenden Rohstoffe, die gleichzeitig in der Elektronik und für Maschinenantriebe unverzichtbar wichtig sind, findet aus markttechnischen Gründen bisher kaum ein Recycling dieser Rohstoffe statt. So geht pro Jahr eine erhebliche Menge an potenziell wiederverwertbaren Rohstoffen verloren (siehe u.a. Yang (2017)). Dies liegt daran, dass die derzeit verfügbaren Recyclingverfahren verfahrenstechnisch sehr komplex sind und auf den umfangreichen Einsatz der Flüssig-Flüssig-Extraktion (vgl. u.A. Chen (2017)) oder zahlreicher anderer hydrometallurgischer oder pyrometallurgischer Recyclingverfahren setzen Yang (2017). Zweitens von Bedeutung ist das potenzielle Recycling von Refraktär- und Edelmetallen aus Legierungen, sowie das Recycling von metallischen Grundrohstoffen, wie Titan oder Lithium für zahlreiche grundlegende Massenprodukte (Lithium-Ionen-Batterien, Titanlegierungen und vieles mehr). Als Beispiel ist die Titanrückgewinnung aus TiAlV-Legierungen und die Lithiumrückgewinnung aus Li-Batterien zu nennen, in der ein Recyclingverfahren besonders einfach und besonders ökonomisch sein muss, um markttechnisch mit einfachen Downrecyclingverfahren mithalten zu können. Eine Auflistung aktueller Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien sind in Islam & Raniga (2022), Gaines et al. (2011), und Royen & Fortkamp (2016) vorfindbar und für das Recycling von Titanlegierungen dementsprechend in Tadeka & Okabe (2019) und Peters & Leyens (2002).

Für alle genannten Rohstoffe aus recyclingfähigem Legierungsmaterial stellt sich in ähnlicher Weise die Fragestellung, ein verfahrenstechnisch möglichst einfaches Recyclingverfahren zu realisieren, das kostengünstig und zugleich praktisch keine weiteren Zusatzstoffe benötigt. Um den Einsatz von Zusatzstoffen, Extraktionsmitteln oder Lösungsmitteln zu vermeiden, kommen nur pyrochemische Trennverfahren im Rahmen dieser Studie in Frage.

Daher wird in dieser Studie ein alternatives Trenn- und Recyclingverfahren vorgestellt, das abgesehen von Chlor oder sonstigen Chlorierungsmitteln gänzlich ohne diese Zusatzstoffe auskommt, um seltene Erden und andere Rohstoffe per Destillation über die chlorierten Stoffkomponenten zurückzugewinnen zu können. Das in diesem Beitrag vorgeschlagene industrielle Hochtemperaturdestillationsverfahren hat das marktführende Destillationsverfahren zur Titangewinnung aus Titanerzen (Kroll-Verfahren, siehe: Stoddard & Pietz (1947)) zum Vorbild. Das bereits in den 1940er Jahren entwickelte Destillationstrennverfahren basiert auf der Verflüchtigung der Bestandteile, inklusive Titan durch Chlorierung (mittels Chlor und Koks oder direkt durch Tetrachlormethan) und anschließender Destillation der folgenden Chloride in industriellen Destillationskolonnen. Ein ähnliches Trennverfahren über Verflüchtigung durch Chlorierung wird in Mochizuki et al. (2013) für die Rückgewinnung von leichten Seltenen Erden aus NdFeB-Magneten vorgeschlagen. Weniger flüchtige Chloride wie Neodymtrichlorid (vgl. Siedepunkt von Neodymtrichlorid bei 1600°C) verbleiben dabei in der Schmelze, während flüchtige Bestandteile wie Bor als Bortrichlorid (Siedepunkt 12,6°C) und Eisenchloride (vgl. Siedepunkt von Eisen(III)-chlorid bei 316°C) abgedampft werden. Die Chlorierung von NdFeB-Magneten durch Chlor ist ebenfalls technisch einfach umsetzbar, wie auch Okabe et al. (2020) unter Anderem beschreibt. Neben Chlor als Chlorierungsmittel besteht jedoch auch die Möglichkeit, die Chlorierung von Tantal- und Niobpentaoxid nach Eckert (1993-1994) bei 500-600°C mit NaCl/FeCl₃-Gemischen durchzuführen. Alle genannten Trennverfahren, die auf Chlorierung und Destillation basieren, zeigen daher bereits eindrucksvoll die potenzielle Anwendbarkeit. Darauf aufbauend schlägt dieser Beitrag ein destillationsbasiertes Trennkonzzept zum Recycling und zur Wiederrückgewinnung solcher genannten metallischen Rohstoffe aus Legierungsmaterial vor.

2 VORGEHEN UND AUSWERTUNGSMETHODIK ZUR TRENNKONZEPTENTWICKLUNG

Ziel des neuen Verfahrens soll sein, eine Trennung der metallischen Rohstoffe bei möglichst niedrigen Temperaturen und Drücken zu ermöglichen. Für die destillative Rückgewinnung von metallischen Rohstoffen über die Chloride ist eine geeignete Kombination der erforderlichen Trenneinheiten unter minimalem Trennaufwand als Nebenbedingung zu konzipieren.

Die Auswertung des vorgelegten Trennentwurfs verläuft über die Simulation einstufiger und mehrstufiger Destillationsverfahren, wie in Doherty (1997) ausführlich beschrieben wird. Auf Grund gänzlich fehlender Daten von Dampf-Flüssiggleichgewichten (thermodynamische VLE-Mischungseigenschaften) aller Mischungen aus den resultierenden Recyclingbeispielen sind leider für eine erste Trennprozessentwicklung nur Simulationen unter idealen Phasengleichgewichtsbeziehungen möglich. Nach dem Gesetz von Raoult und Dalton wird damit die folgende idealisierte Gleichung für alle Simulationen verwendet (mit Flüssig-/Dampfanteil x/y , Druck p und Dampfdruck p_i^{LV} , je Stoffkomponente i):

$$x_i p_i^{LV} = y_i p \quad (1)$$

Die Simulation einer Flashverdampfung erfolgt unter isothermen Bedingungen wie in Doherty (1997, S. 13-25f) beschrieben wird. Die Stofftrennung in Destillationskolonnen wird ersatzweise durch Simulation von total-reflux Destillationskolonnen untersucht, aus der sämtliches Destillationsprodukt wieder in die Destillationskolonne zurückgeführt wird. Für alle simulierten Trennbeispiele zur jeweiligen Trennprozessentwicklung, lässt sich dann ein vereinfachtes verallgemeinertes Trennfließbild für alle Trennbeispiele nachfolgend präsentieren.

3 TRENNKONZEPTENTWICKLUNG UND SIMULATIONSERGEBNISSE

Zur Veranschaulichung des reinen Destillationsprozesses unter idealisierten Bedingungen werden die folgenden vier Recyclingbeispiele betrachtet und ein detaillierteres Verfahrenskonzept für sie entwickelt. Die gewählten repräsentativen Recyclingbeispiele nach der Chlorierung sind ($n=1$, $m=2,3$ oder $n=2$, $m=6$ und Angaben in mol%):

- NdFeB-Recycling: 77,57% FeCl_m, 15,21% NdCl₃, 1,63% BCl₃, 4,25% DyCl₃, sonstige geringere Verunreinigungen (1,34%): CoCl₂, CuCl, CuCl₂, ZrCl₄ (siehe: Mochizuki et al. (2013))

- FeNiCr-Legierungen (ohne Nickel): 73,25% Cr&CrCl₂, 19,09% Fe_nCl_m, 0,87% TiCl₄, 2,92% NbCl₅, 3,85% Mo&MoCl₅, 0,02% MnCl₂ (siehe: Unfried-Silgado & Ramirez (2014))
- TiAlV-Legierungen nach geeigneter Abtrennung von Aluminium: 94,87% TiCl₄, 0,37% Fe_nCl_m, 4,75% VCl₄ (Oxochloride vernachlässigt), 0,01% YCl₃ (siehe: Peters & Leyens (2002))
- Lithium-Rückgewinnung aus Elektrodenmaterial von Lithium-Ionen-Batterien: 34,90% LiCl, 5,89% CoCl₂, 20,46% Fe_nCl_m, 28,86% MnCl₂, 0,31% TiCl₄, (Restanteile an Aluminium, Phosphor und sonstigen Bestandteilen werden vernachlässigt) (siehe: Gaines et al. (2011))

Das entwickelte Trennverfahren ist in Abb. 1 dargestellt (ohne Nachbehandlungsschritte). Nach der Chlorierung des Recyclingmaterials in PB-1 wird das Gemisch in V1-PC-1 in zwei trennbare Fraktionen aufgeteilt, so dass die Temperaturunterschiede innerhalb der Destillationskolonne nicht zu groß werden und eine technische Durchführung der Destillation möglich ist. In C1 erfolgt eine zweistufige Kondensation der nichtflüchtigen Chloride und die anschließende Abtrennung des Chlorgases. Das Chlorgas wird dann in der C2-Anlage recycelt und als Chlorierungsmittel in PB-1 wiederverwendet. Die nach PC-1 in der Schmelze verbleibenden Stoffkomponenten gelangen in eine Konzentrations-/Sedimentationseinheit S1, in der die ungelösten Feststoffe von der Salzsäure getrennt werden. Die auskondensierten Stoffkomponenten aus C1 werden zusammen mit der Salzsäure aus S1 in der Trennkolonne DC-1 in Fraktionen von Chloriden mit ähnlichen Siedepunkten getrennt. Entsprechend werden die leicht siedenden Komponenten aus C1 in der DC-2-Kolonne abgetrennt. Treten in der DC-2-Kolonne bei 1 atm sublimierende Komponenten auf, wie z. B. Zirkoniumtetrachlorid, werden höhere Drücke eingestellt.

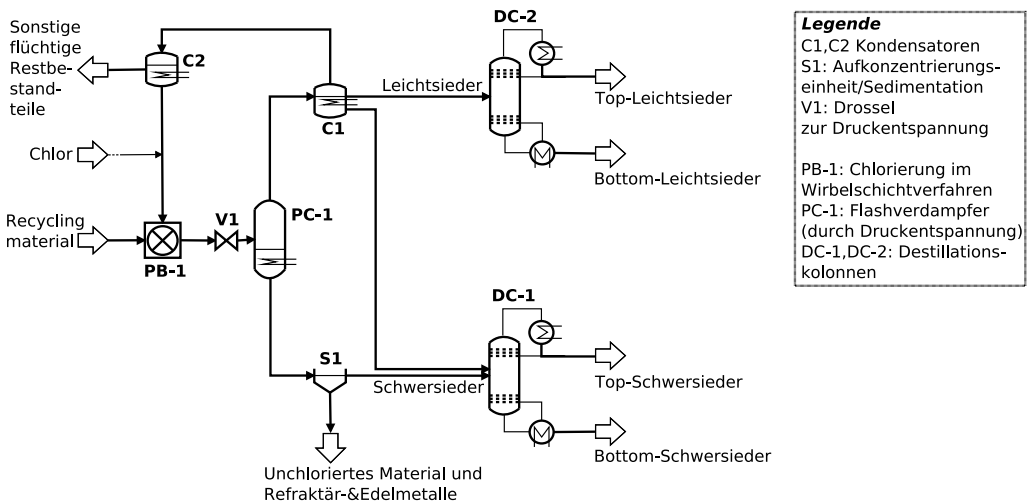


Abb. 1: Das entwickelte Trennfließbild zum destillationsbasierten Trennprozess

Abb. 2 zeigt exemplarisch für das NdFeB-Magnetrecycling das Simulationsergebnis für die DC-1 Destillation in zwölf Trennstufen nach dem total-reflux Destillationskolonnenprinzip. Wie bei allen folgenden Trennungsbeispielen sammeln sich die Leichtsieder im Kopf der Kolonne an und entsprechend die wenig flüchtigen Schwertsieder im Verdampfer, wobei die Mittelsieder sich innerhalb der Kolonne vermehrt anreichern. Nach Abb. 2 lässt sich im Kondensator (Zusammensetzung der ersten Trennstufe eine Leichtsiederfraktion von Eisen- und Kobaltdichlorid frei von anderen Chloriden destillativ gewinnen. Dieser Anteil nimmt in Richtung des Verdampfers mit drastischer Änderung im Feintrennbereich nach Abb. 2 zwischen den Trennstufen 6-10 ab. Im Gegensatz dazu, nimmt der Anteil der schwersiedenden Fraktion an Neodym- und Dysprosiumtrichlorid ab der letzten Trennstufe der Verdampferstufe der Kolonne in Richtung Kondensator ab, wobei sich die Zusammensetzung zwischen der fünften bis achten Trennstufe stark verändert. Bortrichlorid und Zirkoniumtetrachlorid sind in dieser DC-1 Kolonne nicht vorliegend, da sie bereits als Dampf in PC-1 und C1 abgezogen worden sind und in der DC-2 Kolonne destilliert werden.

Mit einer Trenngenauigkeit von 1E-03-mol% kann festgestellt werden, dass in den ersten beiden Trennstufen die reine leichtsiedende Fraktion von Eisen- und Kobaltdichlorid durch Destillation gewonnen werden kann. Im Gegensatz dazu, wird in den Trennstufen 11-12 die schwer siedende Fraktion gewonnen, die frei von Kobalt- und Eisendichlorid, aber Verunreinigungen an Kupferchlorid enthält. Aufgrund ähnlicher Siedepunkte können Neodymtrichlorid und Dysprosiumtrichlorid destillativ nicht voneinander getrennt werden. Dennoch zeigen die Simulationsbeispiele, dass eine signifikante Aufreinigung der verwertbaren Rohstoffe möglich ist. Für die Abtrennung von Kupferchlorid wäre eine größere Trennkolonne mit deutlich mehr Trennstufen erforderlich.

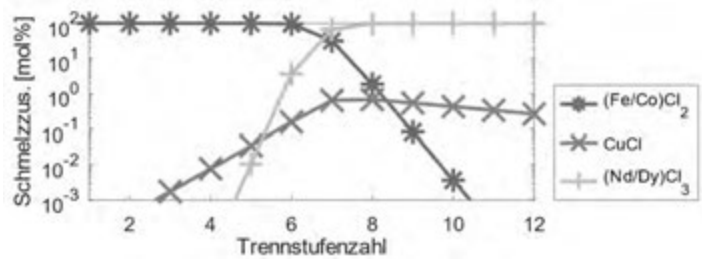


Abb. 2: Simulationsergebnisse der DC-2 Kolonne zum NdFeB-Magnet Trennbeispiel

Analog zum NdFeB-Trennergebnis für die DC-2-Kolonne sind die wichtigsten Simulationsergebnisse für die weiteren Trennbeispiele in Tab. 1 für die DC-1-Leichtsiederkolonne und Tab. 2 für die Schwersiederkolonne zusammengefasst. Für das Beispiel der TiAlV-Trennung ist im Wesentlichen nach Abb. 1 nur die DC-2 Leichtsiederkolonne erforderlich, während für das Beispiel der Lithiumrückgewinnung aus Lithium-Ionen-Batterien nur die DC-2 Schwersiederkolonne benötigt wird.

Tab. 1: Zusammengefasste Trennergebnisse der DC-2 Leichtsiederkolonne

Trennbeispiel	Benötigte Trennstufen	Temperaturbereich in °C	Top in mol%	Bottom in mol%	Mittelsiederkomponenten
NdFeB ²⁾	10	149-552	~100% BCl ₃	~100% Fe _n Cl _m	ZrCl ₄
FeNiCr ¹⁾	18	137-316	~100% TiCl ₄	~100% Fe _n Cl _m	NbCl ₅ , (MoCl ₅)
TiAlV ¹⁾	8	136-316 (für YCl ₃ bis 817)	94,99% TiCl ₄ , 2,01% VCl ₄	YCl ₃ ³⁾ , Fe _n Cl _m	Fe _n Cl _m

¹⁾ betrieben bei 1 atm, ²⁾ betrieben bei 25 atm, ³⁾ Nicht genau quantifizierbare Stoffmengenanteile

Im NdFeB-Trennbeispiel lassen sich Eisenchloride, sowie Bortri- und Zirkoniumtetrachlorid nach der Flashverdampfung und Kondensation bei 1 atm abtrennen. Erst in der Destillationskolonne DC-2 ist ein höherer Druck von 25 bar einzustellen, damit Zirkoniumtetrachlorid als Reinstoff auch als Flüssigkeit vorliegen kann. Nach den Ergebnissen in Tab. 1 lassen sich trotz des hohen Trennaufwands jedoch nur Bortrichlorid und die Eisenchloride sauber abtrennen, während Zirkoniumtetrachlorid nur als stärker verunreinigte Mittelsiederkomponente in der Trennkolonne verbleibt. Die destillative Aufreinigung von Zirkontetrachlorid wäre mit diesem Trennschritt nahezu abgeschlossen, da höhere Prozessdrücke bei 25 bar in Kombination mit hohen Temperaturen und einem höheren Verunreinigungsgrad die Rückgewinnung geringer Mengen an Zirkonium verfahrenstechnisch extrem aufwendig machen würde.

Im FeNiCr-Trennbeispiel lässt sich nach Tab. 1 reines Titanatetrachlorid destillativ innerhalb einer 18-stufigen Trennkolonne zurückgewinnen. Aber auch im TiAlV-Trennbeispiel zeigt sich eine Abtrennung von Titan in einer nur achtstufigen Trennkolonne inklusive Vanadiumtetrachloridverunreinigungen. Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, dass sich Aluminiumtrichlorid vorher mit hohen Trenngenauigkeiten abtrennen lässt. Unter höheren Verdampfertemperaturen von 817°C in DC-2 des TiAlV-Trennbeispiels ist anhand von Simulationsergebnissen sogar eine hochreine Abtrennung geringer Yttriumtrichlorid Anteile möglich. Allerdings wäre die Trennung technisch schwerer umzusetzen wegen größerer Temperaturänderungen innerhalb der Trennkolonne und zugleich dem Erhalt geringer Mengen an Verdampferprodukt, in dessen der überwiegende restliche mengenmäßig größte Eisenanteil erst verdampft werden müsste. Alternativ ließe sich

jedoch ein Gemisch aus Yttriumtrichlorid in der größeren Eisenchlorid-Schmelzefraktion einfacher durch Destillation bei Temperaturen bis zu 316°C als Verdampfer Temperatur gewinnen und könnte in einem weiteren Trennvorgang durch Abdestillieren der Eisenchloride leichter gewonnen werden.

Tab. 2: Zusammengefasste Trennergebnisse der DC-1 Schwersiederkolonne unter 1 atm.

Trenn- beispiel	Benötigte Trennstufen	Temperatur -bereich in °C	Top in mol%	Bottom in mol%	Mittel- sieder- Komp.
NdFeB	12-14	1029-1594	70,78±2,73% Fe _n Cl _m , 29,16±2,73% CoCl ₂	93,21±2,61% NdCl ₃ , 2,95±0,97% DyCl ₃ , 3,84±3,58% CuCl Cr&CrCl ₂ , MnCl ₂ ³⁾	CuCl
FeNiCr	22	316-1302	~100% Fe _n Cl _m		FeCl ₂ , MnCl ₂
Li-Ionen Bat.	22	1026-1382	87,23% Fe _n Cl _m , 12,88 CoCl ₂	~100% LiCl	MnCl ₂ , (CrCl ₂)

Die Schwersiederkolonne DC-1 muss hingegen bei höheren Temperaturen betrieben werden, die besonders hoch im NdFeB-Recyclingbeispiel sind, um die darin enthaltenen Seltenen Erden destillativ zurückgewinnen zu können. Wie bereits erwähnt lässt sich im Verdampfer in einer zwölfstufigen Trennkolonne eine Mischung aus Neodym- und Dysprosiumtrichlorid mit geringen Kupferchloridverunreinigungen als Prozessergebnis gewinnen. Im Beispiel des NdFeB-Recyclings, aber auch im Beispiel des Lithium-Recyclings, werden im Kopf der Schwersiederkolonne Mischungen aus Kobaltdichlorid und Eisenchloriden gewonnen. Im FeNiCr-Recycling lassen sich jedoch auch mit 22 Trennstufen leider keine wertvollen metallischen Rohstoffkomponenten unter hohen Trenngenauigkeiten zurückgewinnen, sondern nur Eisenchloride. Nur im Elektrodenmaterialrecycling aus Lithium-Ionen-Batterien lässt sich noch Lithium als Schwersiederprodukt ansonsten hochrein durch Destillation zurückgewinnen. Mangan- und Chromdichloridreste verbleiben dann als Mittelsiederkomponenten in der Kolonne.

4 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUR INDUSTRIELLEN ZUKÜNFTIGEN EINSETZBARKEIT DESTILLATIVER RECYCLINGVERFAHREN

Simulationen und Trennkonzepktionierung als Aufwandsabschätzung für destillationsbasierte Recyclingoptionen haben gezeigt, dass Destillation sich ausgehend von den genannten Recyclingbeispielen besonders für die Rückgewinnung von leichten Seltenen Erden aus beispielsweise NdFeB-Magneten hervorragend eignet. Darin werden die leichten Seltenen Erden als gemeinsame Schwersiedergemische der Destillationskolonne gewonnen. Aber auch die destillative Titanrückgewinnung als Leichtsieder mit Kondensatortemperaturen von 137°C zeigt sich als potenziell lohnenswert anwendbare Recyclingtechnologie, sofern eine Vortrennung von Aluminium existiert oder nur geringe Mengen davon enthalten sind.

Unter der Annahme der gleichen Trennschärfe wie bei der Destillation des Kroll-Verfahrens nach Stoddard & Pietz (1947) und gleicher Betriebskolonnenführung wären für die Titanrückgewinnung Kolonnenhöhen von nur 1,6 bis maximal 3,3 m nötig, was sich technisch einfach realisieren ließe. Auch für die Lithiumrückgewinnung aus Lithiumbatterien ist Destillation eine mögliche realistische Trennalternative, allerdings existieren bereits konkurrierende, weniger energieintensive Downrecyclingverfahren (vgl. u.A.: Islam & Raniga (2022)).

Zu allen genannten Trennbeispielen sind – abgesehen von Chlorierung und Rückchlorierung – nur wenige Trennoperationen nötig. Die Simulationsergebnisse legen nahe, dass das Recycling mit relativ geringem technischem Aufwand und daher lukrativ umgesetzt werden könnte, nämlich mit Hilfe einer einfachen einstufigen Verdampfung unter Druckentspannung sowie einer kompakten Destillationskolonne mit integrierten Trennstufen. Zusatzstoffe, Lösungs- oder Extraktionsmittel sind nicht nötig. Auch das verwendete Chlor könnte innerhalb des Trennprozesses analog zum Kroll-Prozess wieder erfolgreich zurückgewonnen werden.

Eine Herausforderung für das Recycling von leichten Seltenen Erden und Lithium liegt in der Notwendigkeit, mit hochtemperaturresistenten Werkstoffen zu arbeiten, wie zum Beispiel SiC oder ZrC (vgl. auch Böhm et al. (2019)). Trotz höherem Energieaufwand auf Grund höherer

Temperaturen von 1382°C bis 1594°C zur Anwendung einer Schwersiederdestillationskolonne kann sich in Zukunft ein solches Trennverfahren auf Grund der wenigen notwendigen Trenneinheiten dennoch lohnen, denn in den nächsten zwei bis drei Dekaden werden weltweit Millionen von NdFeB-Magneten aus Windkraftanlagen entsorgt werden müssen (Pavel et al. 2017). Ein Recycling durch Destillation wäre nicht nur technisch machbar, sondern naturfreundlich und ökonomisch sinnvoll. Gleichzeitig würden Rohstoffe wie Lithium zurückgewonnen, die zum Beispiel für die Energiespeicherung wichtig sind. Insgesamt erscheint daher Destillation als optionales Trennverfahren als eine vielversprechende Möglichkeit, Wertstoffe zu erhalten und die Naturzerstörung durch immer intensivere Ressourcenextraktion zu begrenzen.

LITERATUR

- Böhm, D., Huke, A., Weißbach, D., Ruprecht, G., Gottlieb, S., Czerski, K., Macian-Juan (2019) Partitionierung radioaktiver Abfallstoffe durch Rektifikation, Reactor Safety Research-Project No.: 1501535 ("NuDest"). Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
- Chen, B., He, M., Zhang, H., Jiang, Z., & Hu, B. (2017) Chromatographic techniques for rare earth elements analysis. *Physical Science Reviews*, 1-35. doi:10.1515/psr-2016-0057.
- Doherty, M. (1997) *Perry's chemical engineers' handbook*. Section 13, Distillation. New York: McGraw-Hill.
- Eckert, J. (1993-1994) Niobium Compounds and Alloys. *International Journal of Refractory Metals & hard Materials*, 12, 335-340. doi:10.1016/0263-4368(93)90023-9.
- Gaines, L., Sullivan, J., & Burnham, H. (2011) Paper No. 11-3891 Life-Cycle Analysis for Lithium-Ion Battery Production and Recycling. Transport Research Board 90th Annual Meeting, (S. 1-16). Washington.
- Islam, M., & Raniga, U. (2022) Lithium-Ion Battery Recycling in the Circular Economy: A Review. *Recycling*, 7(33), 1-40. doi:10.3390/recycling7030033.
- Marscheider-Weidemann. (2016). *Dera Rohstoffinformation*. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Mochizuki, Y., Tsubouchi, N., Sugawara, K. (2013) Selective Recovery of Rare Earth Elements from Dy containing NdFeB Magnets by Chlorination. *ACS sustainable Chemistry & Engineering*, 655-662. doi:10.1021/sc4000187.
- Okabe, P., Newton, M., Rappleye, D., Simpson, M. (2020) Gas-Solid Reaction Pathway for Chlorination of Rare Earth and Actinide Metals using Hydrogen and Chlorine Gas, LLNL-JRNL-793560. *Journal of Nuclear Materials*, 534f, 152156. doi:10.1016/j.jnucmat.2020.152156.
- Pavel, C., Thiel, C., Degreif, S., Blagoeva, D., Buchert, M., Schüler, D., Tzimas, E. (2017) Role of substitution in mitigating the supply pressure of rare earths in electric road transport applications. *Sustainable Materials and Technologies*, (12) 62-72. doi:10.1016/j.susmat.2017.01.003.
- Peters, M., Leyens, C. (2002) *Titan und Titanlegierungen*, Third Edition. Chichester: Wiley-VCH.
- Royen, H., Fortkamp, U. (2016) Rare earth elements - purification, separation and recycling report No. C 211. IVL Swedish Environmental Research Institute.
- Stoddard, C., Pietz, E. (1947) Pilot-Plant distillation and purification of titanium tetrachloride. United States. Bureau of Mines.
- Takeda, O., Okabe, T. (2019) Current status of titanium recycling and related technologies. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 71(6), 1981-1990. doi:10.1007/s11837-018-3278-1.
- Unfried-Silgado, J., Ramirez, T. (2014) Modeling and characterization of as-welded microstructure of solid solution Strengthened Ni-Cr-Fe Alloys Resistant to Ductility-Dip Cracking Part II: Microstructure characterization. *Metals and Materials International*, 307-315. doi:10.1007/s12540-014-1023-z.
- Yang, Y. (2017) REE Recovery from End-of-Life NdFeB permanent Magnet scrap: A critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3, 122-149. doi:10.1007/s40831-016-0090-4.

Sorting Based on Bits – The Technical Background of Digital Markers in the Context of High-Quality Recyclate Generation

N. Kuhn¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

ABSTRACT: The entire plastics value chain is currently looking for new processes to produce high-quality recyclates. One measure is to add relevant product-specific information that can be retrieved during the sorting process. Digital watermarks are currently being discussed for this purpose. However, the basics of this technology are currently only known to a limited extent in the recycling industry. This paper first gives a brief overview of the theory and principles of digital watermarking. Next, the characteristics of watermarks are presented to improve the understanding of the strengths and limitations of this technology. Finally, the encoding process on physical products and the decoding process in sensor-based sorting are highlighted.

1 INTRODUCTION

In the nexus of new regulatory requirements of the European Union in the framework of the European Plastics Strategy, increasing ambitions of companies regarding their impact on climate and resource consumption, and the desire of consumers for a sustainable lifestyle, the quality requirements for plastic recyclates are increasing. This is currently reflected in the demand for material streams that consider not only the polymer type but also other, non-inherent (material) properties such as food grade or distributor. As a result, the entire value chain is looking for new processes that enable plastic packaging waste to be sorted according to properties beyond the polymer type. In principle, this can be achieved either through alteration of the evaluation process during the sorting (e.g., the usage of machine learning) or on the product itself (e.g., through adding tracer substances or digital watermarks). This contribution addresses the technical background of digital watermarks as there is currently only a limited understanding in the recycling industry of the principles behind this technology, which is already used for long time in digital systems.

1.1 Background and Definition

The urge to hide information is as old as human civilisation and first written reports date back to Herodotus at around 500 BC (O'Toole 1991). It involves either keeping the existence of information secret, called steganography, or making it imperceptible, called watermarks. Latter is dealt with in this article and can be described as imperceptibly altering a cover work, such as images, audio, video, three-dimensional model, executable code, or text, to embed a message about that cover work (Cox et al. 2008). Besides others, motivation may be identifying the source, creator, owner, distributor, or authorised consumer, or even additional information about that cover work (Shih 2017). Whereas the interest of using watermarks for authentication purposes concentrated in the late 1990s in digital systems (Cox et al. 2008), their usage is discussed since the early 2010s in the packaging industry in the context of "smart packaging" (e.g., Simske 2011).

In principle, a watermarking scheme Ω can be defined as the 7-tuple:

$$\Omega = (E, D, R, M, \mathcal{P}_E, \mathcal{P}_D, \mathcal{P}_R) \quad (1)$$

Here, E represents the embedding function, D the detection function, R the recovery function, M the hidden message domain and $\mathcal{P}_E, \mathcal{P}_D, \mathcal{P}_R$ the domains for the parameter settings employed for embedding, detection, and retrieval (Dittmann et al. 2006). Fig. 1 depicts such an information hiding system on a high-level with the main components, an embedder and detector. The embedder's input is the original, unaltered cover work – in this example, a bottle. During the watermark

embedding process, embedding parameters (e.g., a secret key) are applied in combination with a message, forming a digital watermark. Afterwards, the watermarked cover work can be used freely. During this phase, noise or distortion can influence the cover work by adversaries' intent of removing the watermark, deformation of the object, adhesion of dirt, blurring or – during decoding – an attack.

Contrary to traditional communication, when multiple messages are transmitted over a single line and consequently separated using a specific technology such as time-division, frequency-division, or code-division, the two messages are separated by different technologies. On the one hand, the cover work is perceived through the human visual system and on the other hand the watermark detector. While the human should only see the unaltered cover work (in this case, the deformed bottle) with no interference from the watermark, the detector should retrieve the original watermark message without interference from the cover work. The detection process is usually solved in two steps with a combination of optical and digital image processing techniques: First, the presence of a watermark is checked through a recovery function and if detected, the message is decoded through a retrieval function. (Cox et al. 2008) When applied on a physical product, the detection system must first scan the analogue cover work (e.g., the bottle), convert the image into a digital representation, and finally utilise the watermark verification algorithm to check the payload of the embedded watermark. Only if the data between the watermark and the deposited information match, the decoding process is successful, and the product is authenticated (Herrigel et al. 2000). Additionally, it is possible to link the watermark with a database. Hence, additional information (e.g., about the product) can be retrieved during decoding. By storing additional product data in a database, the information can be changed, added, or removed even after the watermark has been embedded (Reed et al. 2015).

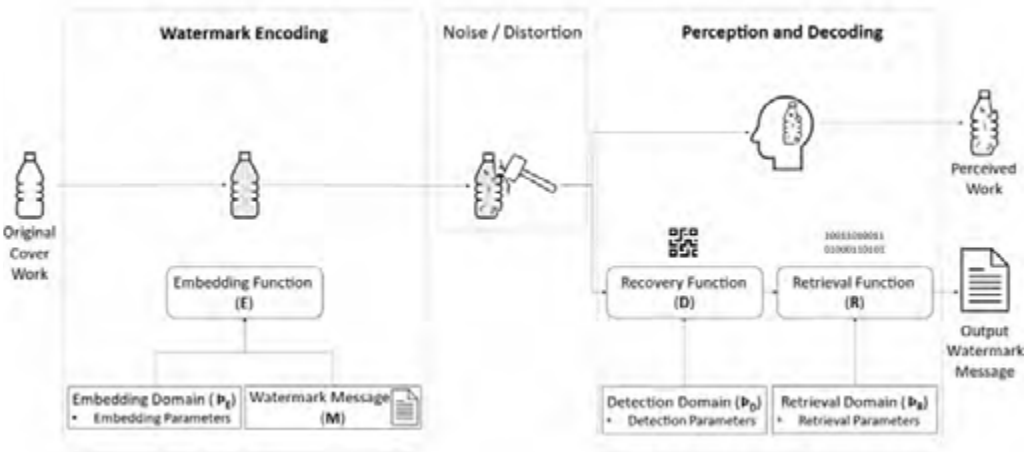


Fig. 1: Working principle of an embedded watermarking system on a physical product which is perceived through the human visual system and a watermark detector system (Own work based on Cox et al. 2008, Shih 2017 and Dittmann et al. 2006)

In the context of a circular economy in the plastics value chain, a digital product passport could be accessed by scanning watermarked products. The watermark could be used to retrieve relevant information such as pureness of polymer type, additives, colour, availability of the recyclate supply, further qualitative aspects and certificates, or results of laboratory tests (Berg et al. 2022). The usage of digital watermarks for marking consumer goods is especially suitable as their imperceptibility does neither detract from the aesthetics nor the haptics of a product. Furthermore, they are inseparable from the products in which they are embedded if the product itself is printed or the label is hard to remove. Lastly, the packaging is even traceable after sale which allows the collection of additional information on the whereabouts of the packaging which could be used to improve the understanding of consumption patterns.

1.2 Characteristics of Digital Watermarks

Besides imperceptibility, an ideal watermarking system should embed a large amount of information perfectly secure. Furthermore, it should be robust in regard to intentional or unintentional attacks. (Shih 2017) For characterising watermarks, Cox et al. (2008) introduced a set of properties which are briefly described below:

- Effectiveness: The likelihood that the embedder's output will be watermarked.
- Fidelity: The perceived similarity of the original and watermarked versions of the cover image.
- Payload: The number of bits encoded by a watermark in a unit of time or work.
- Blind / informed detection: An informed detector requires access to the original, unwatermarked work; blind detectors do not require information about the original.
- False positive behaviour: False positive behaviour is the detection of a watermark in a work that does not actually contain one, as well as the likelihood that the detector will detect that watermark in a work given a fixed watermark and a random selection of works.
- Robustness: The ability to detect the watermark in the presence of common distortion and noise such as blurring or deformation.
- Security: The ability to withstand hostile attacks that are specifically designed to defeat the purpose of the watermark, such as unauthorised removal, embedding, or detection.
- Key: A key is a piece of information required to encode and decode the watermark message. For instance, it may be used to control where the cover work is modified or to restrict access to the watermark message.
- Private / public access: Private watermarking techniques only give authorised users the ability to decode the watermark whereas public watermarking techniques allow decoding to everyone.

1.3 Embedding Digital Watermarks onto Products

To make watermarks perceptually undetectable, the embedding system must account for the characteristics of the human visual system, such as being content adaptive (Herrigel et al. 2000). Watermarks can be embedded in spatial domains and frequency domains. In the spatial domain, pixels are replaced in the host image with pixels in the watermark image. For example, by altering the gray levels of selected pixels in the host image or by transforming a single channel image to a halftone image through pixel swapping (Zhao et al. 2013). Advantages of this approach include simplicity and comparatively easy implementation. However, this approach is less robust to attack as compression and added and may be easily detected using computer analysis.

As an alternative, the watermark can be embedded in the coefficients of a transformed image in the frequency-domain. For this, transformation as discrete Fourier transform, discrete wavelet transform, and discrete cosine transform can be applied. This type of embedded watermark is typically hard to discover. Yet, the image quality will be severely diminished when too much data is incorporated into the frequency domain. As a result, the embedding capacity is comparatively low as excessive data would distort the host image. Furthermore, the watermark needs to be smaller than the host picture. Typically, a host image is sixteen times the size of a watermark. However, it is also possible to combine both approaches and use spatial domain watermarking and frequency domain watermarking for increased robustness while maintaining low complexity. (Shih 2017)

1.4 Decoding Digital Watermarks with Sensor-based Sorting Systems

For decoding digital watermarks, commercially available cameras operating in the visible spectra together with a processing unit are required. Both elements are included in commercially available sensor-based sorting systems. To ensure ideal exposure conditions, additional light sources should be installed. The sorting process itself follows the principles of sensor-based sorting where the objects are separated by an acceleration belt, pass the decoding device, and are finally separated by means of compressed air nozzles. After the watermark has been captured by the camera, the images are transferred to the computer. There, the watermarks are decoded, and the respective metadata is obtained from a database and a sorting decision is derived.

2 CONCLUSION

This work gives a brief introduction into the theoretical background of digital watermarks. It could be shown that digital watermarks may prove a promising tool to increase the quality of recyclates. This is due to their imperceptibility which does not reduce the space available for advertising the product but also gives the possibility to link a plethora of information that can be considered during the sorting process. At the same time, the sorting process could generate new data that can be interesting for the marketing of products. Nevertheless, some barriers still need to be overcome. For one, there is currently no institution that guarantees public access for all stakeholders (e.g., for encoding, decoding, access to external database). Furthermore, data sovereignty must be clarified, since – especially for a digital product passport – partly sensitive information is deposited, over which the respective stakeholders may lose control. Finally, the increasing demand for recyclates could also lead to a shift in quantities and qualities within the sorting fractions in the sorting plants due to the correlation between recovery and purity. As a result, the quality of individual fractions could increase in relative terms, but the quantity of recyclable fractions could decrease in absolute terms.

REFERENCES

- Berg, H., Kulinna, R., Stöcker, C., Guth-Orlowski, S., Thiermann, R., Porepp, N. (2022) Overcoming Information Asymmetry in the Plastics Value Chain with Digital Product Passports. How decentralised identifiers and verifiable credentials can enable a circular economy for plastics. Wuppertal Institute (Wuppertaler Papers, 197). Retrieved from <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7940/file/WP197.pdf>.
- Cox, I. J., Miller, M. L., Bloom, J. A., Fridrich, J., Kalker, T. (2008) Digital Watermarking and Steganography. Second edition. Burlington: Morgan Kaufmann Publishers.
- Dittmann, J., Megías, D., Lang, A., Herrera-Joancomartí, J. (2006) Theoretical Framework for a Practical Evaluation and Comparison of Audio Watermarking Schemes in the Triangle of Robustness, Transparency and Capacity. In: David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M. Kleinberg, Friedemann Mattern, John C. Mitchell et al. (Hg.): Transactions on Data Hiding and Multimedia Security I, Bd. 4300. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Lecture Notes in Computer Science), p. 1–40.
- Herrigel, A., Voloshynovskiy, S. V., Hrytskiv, Z. D. (2000) Optical/digital identification/verification system based on digital watermarking technology. In: Optoelectronic and Hybrid Optical/Digital Systems for Image and Signal Processing 4148, p. 170–176. DOI: 10.1117/12.388440.
- O'Toole, J. M. (1991) Herodotus and the Written Record. In: Archivaria 33 (1), p. 148–160. Retrieved from <https://archivaria.ca/index.php/archivaria/article/view/11806>.
- Reed, A., Filler, T., Falkenstein, K., Bai, Y. (2015) Watermarking spot colors in packaging. In: Adnan M. Alattar, Nasir D. Memon und Chad D. Heitzenrater (Hg.): Media Watermarking, Security, and Forensics 2015. IS&T/SPIE Electronic Imaging. San Francisco, California, United States, Sunday 8 February 2015: SPIE (SPIE Proceedings), p. 940-906.
- Shih, F. Y. (2017) Digital watermarking and steganography. Fundamentals and techniques. Second edition. Boca Raton: Taylor & Francis CRC Press.
- Simske, S. J. (2011) Smart Packaging for Security and Logistics. In: Society for Imaging Science and Technology (Hg.): NIP & Digital Fabrication Conference (2), p. 801–804. Retrieved from <https://www.hpl.hp.com/techreports/2011/HPL-2011-182.pdf>.
- Zhao, X. M., An, Y. C., Li, X., Duan, X. Y. (2013) Application of Digital Watermarking Technology in Anti-Counterfeit Packaging. In: AMM 469, p. 292–295. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.469.292.

AVV-Novelle: Evaluierung der Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen und Ersatzbrennstoffprodukten

A. Tischberger-Aldrian¹ & R. Sarc¹

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Der Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft wurde mit der Evaluierung der Anlagen 8 und 9 der Abfallverbrennungsverordnung (AVV) betraut, wobei neben eigenen Erkenntnissen auch Erfahrungen, Daten und Feedback von den für die AVV relevanten Stakeholdern (Zementwerke, andere Mitverbrennungsanlagen, Ersatzbrennstoffhersteller, Genehmigungsbehörden/Landesregierungen, befugte Fachpersonen/Fachanstalten) einfließen sollten. Neben einer offenen Diskussionsrunde im Zuge einer Impulsveranstaltung wurden Einzelgespräche geführt und umfangreiches Feedback zu mehreren Aspekten der AVV eingeholt (u.a. Probenahme, Grenzwerte, externe Überwachung, Identitätskontrolle). Die AVV wird in der Branche als unverzichtbares Instrument für die Aufrechterhaltung von EBS-Qualitätsstandards wahrgenommen und findet breite Akzeptanz. Die vom AVAW ausgewerteten Praxiserfahrungen und Änderungsvorschläge wurden vom Bundesministerium in der AVV-Novelle (Begutachtungsentwurf) zum Teil berücksichtigt, wesentliche Passagen wurden klarer formuliert, um die Interpretation zu vereinheitlichen und zu erleichtern.

1 VORGEHENSWEISE FÜR DIE EVALUIERUNG DER AVV-ANLAGEN 8 UND 9

Im Zuge der Novellierung der bestehenden Abfallverbrennungsverordnung (AVV, 2002) wurde der Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW) mit einer Evaluierung der Vorgaben für die Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen (EBS) und Ersatzbrennstoffprodukten (Anlagen 8 und 9) betraut. Neben eigenen Erkenntnissen des AVAW sollten Erfahrungen, Daten und Feedback von den für die AVV relevanten Stakeholdern (Zementwerke, andere Mitverbrennungsanlagen, Ersatzbrennstoffhersteller, Genehmigungsbehörden/Landesregierungen, befugte Fachpersonen/Fachanstalten) eingeholt werden und die Rückmeldungen in anonymisierter Form aufbereitet werden. Hierzu fand im Oktober 2019 eine Impulsveranstaltung statt. Die Stakeholder waren über mehrere Wege (persönliche Kontakte, Emailverteiler des ÖWAV und VÖZ) eingeladen worden, an der Veranstaltung teilzunehmen. Die ca. 30 Teilnehmer der Impulsveranstaltung brachten sich aktiv bei der offenen Diskussion ein und berichteten von ihren Erfahrungen aus der Praxis. Im Zeitraum von November 2019 bis Dezember 2020 wurden mit insgesamt 45 an der Mitarbeit interessierten Stakeholdern Einzelgespräche geführt und umfangreiche relevante Daten erhoben. Die erhaltenen Informationen wurden evaluiert, zusammengefasst und flossen in die Novelle der AVV mit ein.

2 ERKENNTNISSE UND EMPFEHLUNGEN

2.1 Allgemeines

Frage 1: Wird das gesetzlich vorgeschriebene System laut AVV überhaupt gelebt?

In seinen Grundsätzen wird das vorgeschriebene System in der Praxis gelebt, wenngleich auch mit kleineren Ausnahmen bzw. Adaptierungen. Die AVV wird als positives Regelwerk wahrgenommen, deren Vorgaben in der Praxis im Großen und Ganzen auch relativ gut umsetzbar – wenngleich auch mit Zeit- und Personalaufwand – sind. Die Vorgaben der AVV werden zum überwiegenden Anteil als sinnvoll wahrgenommen. Sehr positiv wird gesehen, dass die (technischen) Vorgaben für alle Beteiligten in Österreich gelten.

Frage 2: Was hat sich bewährt? Was funktioniert gut?

Als sehr praktikabel wird die Festlegung von Grenzwerten in Form von Median und 80er-Perzentil und die Betrachtung von Ergebnissen über längere Zeiträume gesehen. Ebenso hat sich die heizwertbezogene Angabe von Beurteilungswerten bewährt. Die Regelungen in Anlage 9 zur Ausnahme von der Beprobung sind sehr positiv zu sehen und sollten bleiben. Die Flexibilität, dass Lieferanten als auch die Zementwerke selbst Beurteilungsnachweise erstellen können, wird geschätzt. Die Excel-Tabellen vom Bundesministerium („Vorlagen“) werden als Erleichterung im Alltag wahrgenommen.

Frage 3: Was hat nichts gebracht? Was hat nicht funktioniert? Was wurde in der Praxis nicht umgesetzt?

Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass im Falle des Vorliegens eines externen Beurteilungsnachweises eine durchgeführte Identitätskontrolle stets mit diesem übereinstimmt. Zur Vereinfachung und eine Anpassung an die Praxis könnte somit die Streichung der Identitätskontrolle bei Vorliegen eines externen Beurteilungsnachweises gemäß §6 Abs. (2) Punkt 3 angedacht werden. Bei der Untersuchung von neuen Materialien hat man zu Beginn oft nur geringe Mengen vorliegen (< 5 Messergebnisse). In Anbetracht der gelebten Praxis und um dem Lieferanten die notwendige Zeit zur Optimierung des Materials zu geben wäre es sinnvoll, die Bildung des arithmetischen Mittelwertes zu streichen und stattdessen die Einhaltung der Einzelmessergebnisse auf das jeweilige 80er-Perzentil vorzuschreiben. Die derzeitige Regelung zur Analyse von Rückstellproben, wenn Ergebnisse im grenzwertnahen Bereich liegen (> 80 % des Grenzwertes) ist nicht praxistauglich. Die parallele Probenahme von zwei qualifizierten Stichproben sollte gestrichen und die generelle Analyse von Rückstellproben sollte entfallen.

Frage 4: Gibt es neue sinnvolle Vorschläge, die Berücksichtigung finden sollten?

Wichtig war es vielen Stakeholdern zu betonen, dass auch die Möglichkeit einer Online/Ontime-Messüberwachung („automatisierte Qualitätssicherung“) in Zukunft gegeben ist. Nach derzeitigem Stand der Technik erscheint eine mögliche Berücksichtigung in der derzeitigen Novelle verfrüht, dennoch wird darauf hingewiesen, dass die Fortschritte in der digitale Überwachung von Abfällen nicht außer Acht gelassen werden dürfen.

Die Bestimmung des rohstofflich verwertbaren Anteils (R-Index) sollte in der AVV in Form von Verweisen auf die derzeit in Arbeit befindlichen Prozesse und Normen inkludiert werden.

Der Wunsch nach einer Erhöhung des zulässigen Hg-Grenzwertes für den Input bei entsprechendem Vorliegen einer Hg-Abscheideanlage im Zementwerk (Rauchgasreinigung; z.B. RTO, Ex-Mercury etc.) erscheint nachvollziehbar, es wird jedoch empfohlen, die bestehenden Regelungen aus umwelttechnischer Sicht und in Anbetracht der Umweltrelevanz dieses Parameters nicht zu ändern.

Da die meisten betroffenen Stakeholder mittlerweile Ausnahmeregelungen in Form von Bescheiden für diese Problematik erwirkt haben, besteht auch bei der Formulierung für die Ausnahme von der Beprobung von Altreifen gemäß Punkt 2.6 von Anlage 8 kein Änderungsbedarf (hier lautete ein Vorschlag „Ausnahme für Altreifen und deren Recyclingprodukte“).

Bei EBS-Produkten sollten die strengen Vorgaben grundsätzlich bestehen bleiben, allerdings sollte es möglich sein, 10 Untersuchungen schneller (auch mit weniger Material) bereit zu stellen (ev. „vorläufiger“ Beurteilungsnachweis). Denn viele Betriebe stehen vor dem Problem, dass man theoretisch erst nach Monaten oder Jahren die entsprechenden Mengen für einen Beurteilungsnachweis erreichen würde.

Beurteilungsnachweise ohne Analytik sind theoretisch derzeit unbegrenzt gültig, hier wäre eine zeitliche Begrenzung anzudenken.

Die Aufbewahrung der Rückstellproben soll vereinheitlicht werden, empfohlen wird die Dauer von einem Jahr. Das erscheint aufgrund der eher kleineren Mengen (aufbereitete Proben) umsetzbar und würde im Bedarfsfall eine Analyse ermöglichen.

2.2 Grenzwerte

Frage 1: Gibt es Parameter, deren Regelung nicht sinnvoll erscheint, da sie ohnehin sehr weit unter dem Grenzwert lagen? Können Parameter in Zukunft überhaupt weggelassen werden? Welche Parameter waren im Bereich der jeweiligen Grenzwerte?

Grundsätzlich sollten die Auswahl der zu untersuchenden Parameter und auch die derzeitige Festlegung der Grenzwerte bestehen bleiben.

Bei Antimon ist jedoch eine Anpassung des derzeitigen Grenzwertes anzudenken, da v.a. die Siedlungsabfälle aber auch Gewerbeabfälle in den letzten Jahren vermehrt Antimon (z.B. Flamm-
schutzmittel) enthalten und eine Erhöhung des Grenzwertes hier hilfreich wäre.

Frage 2: Sollte ein Grenzwert für Chlor eingeführt werden? Wird der Chlorgehalt derzeit in jedem Los bestimmt? Wäre eine Aufnahme eines Chlor-Grenzwertes sinnvoll?

In diesem Punkt war man sich über alle Stakeholder hinweg einig, dass die Einführung eines Grenzwertes für den Parameter Chlor nicht zweckmäßig ist, da dieser Parameter prozessspezifisch je nach Werk höher oder niedriger ausfallen kann und ohnehin durch das Eigeninteresse der Zementwerke reguliert wird. Allerdings erscheint – in Anbetracht dessen, dass es in den meisten Fällen ohnehin so gemacht wird – die verpflichtend vorgeschriebene Messung des Chlorgehaltes sinnvoll.

Frage 3: Wird der Heizwert in jedem Lose bestimmt?

Die Herangehensweise zur Bestimmung des Heizwertes ist sehr unterschiedlich und die Freiheit, hier wählen zu dürfen, ist den Befragten sehr wichtig und sollte auch so beibehalten werden.

Frage 4: Derzeit gibt es mehrere Grenzwertsätze (für EBS in Zementwerken, für EBS in Kraftwerksanlagen, für EBS in sonstigen Mitverbrennungsanlagen, für Abfälle, die keine EBS sind). Sind mehrere Grenzwertsätze überhaupt notwendig oder wäre eine Vereinfachung denkbar?

Abweichende Grenzwertsätze für unterschiedliche Anlagen werden als sinnvoll erachtet und sollten auch so beibehalten werden.

Frage 5: Hat es Abfälle, die keine EBS sind und verbrannt werden, überhaupt jemals seit Einführung der AVV gegeben?

Solche Abfälle sind nicht bekannt, von den Befragten konnte kein Beispiel genannt werden. Daher besteht für diese Kategorisierung eigentlich kein Bedarf.

Frage 6: Wurde die Ausnahme für Cd für qualitätsgesicherte Ersatzbrennstoffe in Anspruch genommen und in welchem Ausmaß?

Die Ausnahme für Cd für qualitätsgesicherte Ersatzbrennstoffe wurde sowohl von der Zementindustrie als auch von Lieferanten in unterschiedlichem Ausmaß in Anspruch genommen und sollte beibehalten werden.

Frage 7: Sind eigene Grenzwerte für Cd und Hg für Klärschlämme und Papierfaserschlämme notwendig?

Eigene Grenzwerte für Cd und Hg sind erforderlich, da einzelne Klärschlämme und Papierfaserschlämme sonst nicht eingesetzt werden können. Diese Ausnahmeregelung sollte beibehalten werden.

Frage 8: Sollen die Bewertungskategorien (< 20 % GW, 20-50 % GW, 50-80 % GW, 80 % GW bis GW, > GW) beibehalten werden? Hat diese Kategorisierung etwas gebracht?

Bei den Bewertungskategorien sind zwei wesentliche Punkte zu unterscheiden:

Zum einen waren an die Bewertungskategorien einige wesentliche Konsequenzen oder Vereinfachungen geknüpft. Diese erlaubten zwar Flexibilität, die aber in der Praxis nicht bis kaum genutzt wurde. Dieser Punkt kann daher entfallen.

Zum anderen wurde die Farbcodierung der Bewertungskategorien von vielen zur besseren und übersichtlicheren Überwachung des Materials gern verwendet und diese sollte auch beibehalten werden.

Frage 9: Ist der Verhältnisfaktor (80er-Perzentil zu Median) (vgl. AVV Pkt 2.2.5) für die Einschränkung des Untersuchungsrahmens sinnvoll? Wurde dieser überhaupt in der Praxis verwendet und wie oft? Soll dieser Faktor beibehalten werden oder in anderer Form berücksichtigt werden?

Der überwiegende Anteil der Stakeholder nutzte die Vereinfachungen rund um den Verhältnisfaktor nicht, da Individuallösungen in der alltäglichen Umsetzung zu aufwendig sind. Aus praktischer Sicht kann dieser Verhältnisfaktor daher gänzlich gestrichen werden.

2.3 Probenahme und Bestimmungsmethoden

Frage 1: Wie oft wurde das Beprobungsmodell > 40.000 t tatsächlich in den letzten Jahren angewendet? Wie könnte ein Alternativmodell aussehen, das sich am Modell 1.500 t-Lose orientiert (Anm.: Gemäß dem derzeitigen Stand der Diskussionen beim ISO/TC 300 sollen bei großen Anfallsmengen zumindest zwei Lose pro Monat untersucht werden)?

Grundsätzlich wurden mind. 7 Abfallströme erhoben, bei denen das Beprobungsmodell > 40.000 t zum Einsatz kommt und die betroffenen Stakeholder möchten das Modell auch beibehalten. Da hier aber vor allem die damit verbundenen Erleichterungen hinsichtlich des Beprobungsaufwandes und vor allem des geringeren Analysenaufwandes als Grund genannt werden, ist auch ein generelles Modell auf Basis von 1.500 t mit einer generellen Reduktion der Anzahl an qualifizierten Stichproben und geringerem Analysenaufwand denkbar. In diesem Fall könnte die Bildung von Tagesmischproben gänzlich entfallen.

Frage 2: Für die Beprobung von flüssigen Ersatzbrennstoffen ist noch immer die ÖNORM S 2123-4 angeführt. Wie wird die Probenahme dieser flüssigen EBS in der Praxis umgesetzt? Ist diese Probenahmenorm angemessen? Gibt es sinnvollere Alternativen?

Die Probenahme erfolgt in der Praxis gemäß ÖNORM S 2123-4 oder wird zumindest in Anlehnung an diese Norm gemacht. Es erfolgt im Regelfall eine tiefenhorizontierte Beprobung der Tanks oder Gebinde.

Frage 3: Die Bestimmungsverfahren sind im Wesentlichen vorgegeben und genormt. Wie sollte die Korngröße bei der Probenaufbereitung ausfallen (1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm Aufbereitungsgrad)? Was wird in der Praxis umgesetzt und was ist tatsächlich denkbar?

Für den Aufbereitungsgrad der Abfälle wird die Beibehaltung einer Korngröße von < 0,5 mm empfohlen, wobei diese im Bedarfsfall an < 1 mm angepasst werden darf (z.B. bestimmte Hartkunststoffproben, bei denen eine Aufbereitung < 0,5 mm nicht/kaum möglich ist). Dieser Aufbereitungsgrad wird von den meisten Stakeholdern auch in der Praxis angestrebt und umgesetzt und ist auch für eine nachfolgende RFA-Analyse geeignet.

Frage 4: Wie wird mit Störstoffen in der Praxis umgegangen?

Die Herangehensweise ist auch hier sehr unterschiedlich. Es gibt im Grunde 2 Ansätze, die in der Praxis gelebt werden:

a.) Die Störstoffe werden vor der Probenaufbereitung aussortiert und nicht im Endergebnis berücksichtigt. Man „lebt“ mit höheren Werten, da Störstoffbereinigung von Analysewerten aufwendiger ist, als höhere Werte zu akzeptieren. Störstoffe spielen mehr eine Rolle in der Fördertechnik vor dem Ofen und dort wird mehr auf diese geachtet.

b.) Die Störstoffe werden vor der Probenaufbereitung aussortiert und das Endergebnis rechnerisch korrigiert.

Grundsätzlich wäre eine einheitliche, festgelegte Vorgehensweise erstrebenswert, wobei ersterer Ansatz als praktikabler und umsetzbarer erscheint (auch in Hinblick auf automatisierte Probenaufbereitungssysteme mit Metallabscheider). Jedoch erscheint es wesentlich, die Menge der aussortierten Störstoffe als Massenanteil – wenngleich nicht in den Ergebnissen berücksichtigt – zumindest anzugeben.

2.4 Beurteilungsnachweise, Identitätskontrolle und externe Überwachung

Frage 1: Der Inhalt der Beurteilungsnachweise ist in der AVV detailliert geregelt. Welche in der AVV genannten Punkte und Informationen sollten sinnvollerweise angeführt werden, welche nicht? Haben wichtige Informationen gefehlt?

Der Umfang und die enthaltenen Informationen im Beurteilungsnachweisen sind ausreichend und umfassend und sollten in dieser Form daher beibehalten werden.

Frage 2: Wie wurde die Externe Überwachung in den vergangenen Jahren durchgeführt? Wird das vorgeschriebene System überhaupt gelebt? Welche Adaptierung wäre sinnvoll?

Die Regelungen zur externen Überwachung laut AVV wurden in der Praxis in sehr unterschiedlicher Qualität gelebt. Auch auf Basis eigener Erfahrungen am AVAW ist festzustellen, dass viele Vorgaben nicht in sinnvollen Zeiträumen umgesetzt werden können bzw. auch der eigentliche Grund für die Durchführung der externen Überwachung verloren geht und Nichtkonformitäten konsequenzlos bleiben. In diesem Zusammenhang besteht daher Änderungs- und Optimierungsbedarf.

Auch die Analyse von Rückstellproben im Nachhinein erscheint aus mehreren Gründen (u.a. sind Rückstellproben oft gar nicht mehr vorhanden) nicht sinnvoll, da in der Regel eine Nichtübereinstimmung von Messergebnissen ohnehin ohne Konsequenzen blieb, und sollte daher nicht mehr Teil der externen Überwachung sein.

Auch die Regelungen in Hinblick auf die RFA (z.B. Überwachung der internen Kalibrierung) sollte nicht Bestandteil der externen Überwachung sein, da die Zementwerke erfahrungsgemäß in der Regel in ihrem eigenen Interesse qualitativ hochwertige Analyseergebnisse produzieren und die Erfahrungen aus der Routineanalytik der Zementqualität auch auf das EBS-Monitoring übertragen.

Denkbar wären folgende Überlegungen:

Die Probenahmeplanung für die externe Überwachung ist von einer befugten Fachperson/Fachanstalt zu erbringen, die Probenahme, Probenaufbereitung und Analyse der Proben ebenso. Eine Akkreditierung der befugten Fachperson/Fachanstalt ist hierbei nicht notwendigerweise vorauszusetzen. Diese externe Überwachung hat für eine bestimmte Anzahl (bestimmten Prozentsatz) von Abfallströmen oder auch in einem bestimmten Zeitraum (z.B. 1 x pro Jahr) zu erfolgen.

Wichtig wären aber in diesem Zusammenhang eine möglichst zeitnahe Umsetzung und keine Überprüfung „im Nachhinein“. Das bedeutet in weiterer Folge, dass die externe Überwachung Teil der laufenden Überwachung sein müsste/könnte und die Ergebnisse, die von der befugten Fachperson/Fachanstalt bereitgestellt werden, im laufenden Beurteilungsnachweis inkludiert werden müssten. Damit verbunden wären wesentliche Vorteile:

1. Flexibilität bei der Durchführung,
2. die Anzahl an zu untersuchenden Proben würde sich im Rahmen halten und auch die damit verbundenen Kosten für die externe Überwachung,
3. die Ergebnisse von externen Stellen fließen direkt in die laufende Überwachung mit ein und erlauben einen direkten Vergleich von „intern“ und „extern“ bereitgestellten Ergebnissen und
4. die Ergebnisse solcher externen Überwachungen würden zeitnaher verfügbar sein.

Frage 3: Wie wurde die Identitätskontrolle in den vergangenen Jahren durchgeführt? Wird das vorgeschriebene System überhaupt gelebt? Welche Adaptierung wäre sinnvoll?

Identitätskontrollen im Sinne der AVV wurden in der Praxis kaum bis gar nicht adäquat durchgeführt und funktioniert in dieser Form nicht. Die Identitätskontrolle sollte in der AVV-Novelle daher entfallen und stattdessen indirekt in der externen Überwachung stichprobenartig berücksichtigt werden.

2.5 Abfallinformation und Akkreditierung

Frage 1: Wie laufen die Bereitstellung und Berücksichtigung der Abfallinformation in der Praxis ab? Wie häufig wurde die Abfallinformation zur Verfügung gestellt? Ist diese Regelung überhaupt sinnvoll?

Der überwiegende Anteil der Befragten gab an, dass die Regelungen zur Abfallinformation laut AVV in der Praxis nicht und nur zum Teil umgesetzt werden, auch die Sinnhaftigkeit ist zu

hinterfragen. Es wird daher empfohlen, die bisherigen Anforderungen an die Abfallinformation in diesem Umfang zu reduzieren oder die Abfallinformation gänzlich zu streichen, da die Informationen in dieser Form ohnehin im Beurteilungsnachweis enthalten sind. Stattdessen sollte der Fokus zukünftig vermehrt auf die ordnungsgemäße Ausführung des Beurteilungsnachweises gelegt werden.

Frage 2: Wie viele Labors sind auf die Bestimmungsmethoden der AVV akkreditiert? Wie viele Analysen werden von akkreditierten, wie viele von nicht akkreditierten Labors gemacht? Ist die Vorschreibung von akkreditierten Labors sinnvoll?

Grundsätzlich ist die Vorschreibung einer Akkreditierung für befugte Fachpersonen oder Fachanstalten und auch der werkseigenen Labors von Zementwerken oder EBS-Erzeugern nicht sinnvoll. Auf die Akkreditierung von externen Stellen wird in den meisten Fällen nur deshalb Wert gelegt, weil dann die externe Überwachung entfallen kann.

Es wäre jedoch insgesamt sinnvoller, den Nachweis über die Kompetenz der analysierenden Labors z.B. durch die regelmäßige Teilnahme an Ringversuchen zu erbringen.

3 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im Zuge der Diskussionen und den Gesprächen mit Stakeholdern konnten viele relevante Aspekte im Umgang und mit der Auslegung der AVV in der Praxis erhoben werden. Die Sinnhaftigkeit einiger Regelungen wurden hinterfragt, Vorschläge für mögliche Änderungen eingebracht. Auch für das Bundesministerium war es ein wichtiger Prozess, Erfahrungsberichte jener zu erhalten, die die AVV und ihre Vorgaben im Alltag umsetzen müssen. Für die Novelle der AVV (Begutachtungsentwurf) wurden wesentliche Passagen klarer formuliert, um die Interpretation zu vereinheitlichen und zu erleichtern. Ebenso wurden Erleichterungen in manchen Bereichen geschaffen. Beispiele für entsprechende Änderungen sind beispielsweise:

- Die Identitätskontrolle in ihrer bisherigen Form wurde gänzlich gestrichen. Im Zuge der Eingangskontrolle sind stattdessen neben visueller Kontrolle, der Überprüfung von relevanten Dokumenten stichprobenartige Identitätskontrolle vorgesehen.
- Die Abfallinformation wurde gänzlich gestrichen.
- Die Vorgaben für die externe Überwachung wurden wie folgt angepasst: Diese muss einmal jährlich durch eine befugte Fachperson oder Fachanstalt erfolgen und umfasst:
 1. Die Überprüfung der Beurteilungsnachweise auf Vollständigkeit und Richtigkeit sowie
 2. die Probenahme und Analyse jeder Abfallart (> 1500 t/Jahr), wobei eine Teilmenge von 150 t zufällig ausgewählt wird.
- Bei der Probenahme wurde die Ziehung einer parallelen Stichprobe gestrichen.
- Die derzeit entstehende Norm für den Recycling-Index wird bereits berücksichtigt.

Einiges ist auch gleichgeblieben, alle Wünsche der Stakeholder und Empfehlungen des AVAW konnten nicht umgesetzt werden. Gleichzeitig ist jedoch auch festzuhalten, dass die AVV grundsätzlich sehr breite Akzeptanz in der Branche findet, viele Aspekte als sehr praxisnah (u.a. Median/80-er Perzentil-Grenzwertbetrachtung) und halbwegs flexibel (z.B. Beurteilung der Abfälle sowohl durch Lieferanten als auch Zementwerk möglich) empfunden werden.

Für die gesamte Ersatzbrennstoffbranche ist damit die AVV unverzichtbar geworden und trägt wesentlich zur Festlegung und Aufrechterhaltung von Qualitätsstandards auch wesentlich zur Rechtssicherheit in diesem Bereich bei.

LITERATUR

Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend über die Verbrennung von Abfällen (Abfallverbrennungsverordnung – AVV) StF. BGBl. II Nr. 389/2002 mit der letzten Änderung BGBl. I Nr. 127/2013.

Herstellung von leichten Gesteinskörnungen aus gipshaltigem Mauerwerkbruch im Pilotmaßstab

A. Müller¹ & S. Liebezeit¹

¹⁾ IAB, FB Baustoffe, FaB Baustoffrecycling, Weimar, Deutschland

KURZFASSUNG: Bauabfälle aus Mauerwerkbruch sind in der Regel Gemische aus Ziegeln, mineralisch gebundenen Wandbaustoffen sowie Mörtel und Putz. Sie lassen sich nicht oder erst nach einer aufwändigen mechanischen Aufbereitung, die aber nur für die groben Fraktionen möglich ist, verwerten. Enthält das Gemisch zusätzlich sulfathaltige Baustoffe wie Gipsputze oder Porenbeton ist die Verwertung auch als Verfüllmaterial ausgeschlossen. Es muss deponiert werden, was einerseits hohe Kosten verursacht und andererseits dem Wirtschaftskreislauf wichtige Sekundärrohstoffe entzieht. Das gilt insbesondere für den darin enthaltenen Gips. Durch die Umstellung der Energieerzeugung von fossilen auf regenerative Energieträger steht zukünftig kein Rauchgasentschwefelungsgips mehr zur Verfügung. Die entstehende „Gipslücke“ könnte zumindest teilweise durch Sekundärgips, der aus Bauabfällen zurückgewonnen wird, gefüllt werden. Aufbauend auf Grundlagenuntersuchungen (Müller et al. 2002, Müller et al. 2012) wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem sich aus Mauerwerkbruch mit hohen Gipsgehalten leichte Gesteinskörnungen wie Blähtonen oder Bims herstellen lassen. Nach Untersuchungen im Labormaßstab wurde das Verfahren jetzt in der Pilotanlage erprobt, die an der IAB gGmbH Weimar betrieben wird. Die Laborergebnisse wurden vollumfänglich bestätigt.

1 MERKMALE DER PILOTANLAGE

Im Recycling-Technikum der IAB gGmbH Weimar kann der komplette Ablauf der Herstellung von leichten Gesteinskörnungen aus mineralischen Abfällen aber auch aus Tonen im Pilotmaßstab realisiert werden. Für die Vorbereitung der Ausgangsstoffe stehen Industrietrockenschränke, ein Backenbrecher und eine Kugelmühle zur Verfügung. Die Herstellung der Grüngranulate erfolgt auf einem Granulierteller mit einem Durchmesser von 1,0 m. Optional stehen dafür ein Intensivmischer, eine Matrizenpresse und eine Strangpresse zur Verfügung. Die thermische Behandlung erfolgt in dem mit Erdgas beheizten Drehrohrföfen (Abb. 1). Der Ofen hat einen lichten Innendurchmesser von 0,60 m und ist mit einer 0,15 m starken Feuerfestmörtelschicht ausgekleidet. Aufgrund der baulichen Gegebenheiten ist seine Länge auf 6 m begrenzt. Die Neigung kann in den Stufen 0,5° / 1° / 2° / 3° und die Umdrehungsgeschwindigkeit zwischen 0,3 und 3,0 U/min variiert werden. Der Ofen kann in einem Temperaturbereich von 500 bis 1500 °C betrieben werden. Er ist mit zahlreichen Messeinrichtungen für Temperatur, Druck und Abgaszusammensetzung ausgerüstet (Abb. 2). Das Abgas wird in einem Schlauchfilter unter Zugabe eines Adsorptionsmittels zur Abscheidung des SO₂ gereinigt.



Abb. 1: Ansicht des Drehrohrföfens

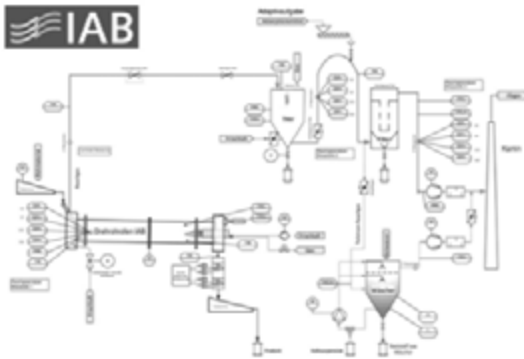


Abb. 2: Mess- und Regeleinrichtung der Pilotanlage

2 UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

In der Pilotanlage wurden von verschiedenen Industriepartnern zur Verfügung gestellte Ausgangsstoffe – wie z.B. eine mit Gipsputz versehene Musterwand (Abb. 3) – zu leichten Gesteinskörnungen verarbeitet. An die chemische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe bestehen bestimmte Anforderungen, die aus den Untersuchungen von Riley (Riley 1951) an blähfähigen Tonen abgeleitet sind. Von Mauerwerkbruch können diese Anforderungen in der Regel erfüllt werden.



Abb. 3: Musterwand aus Hochlochziegeln und Gipsputz

Für die Expansion der Grüngranulate ist die Zugabe eines Blähmittels erforderlich. Besonders geeignet ist Siliciumcarbid, weil es sich im Bereich des pyroplastischen Zustands der Granulate zersetzt und das erforderliche Blähgas freisetzt. Die entstehende Porosität begünstigt den Austritt des SO_2 . Nach thermodynamischen Berechnungen wird bei der SiC -Zersetzung Wärme freigesetzt, die den Energiebedarf des endothermen Prozesses der Calciumsulfatzersetzung direkt "vor Ort" deckt.

Die in der Pilotanlage hergestellten Produkte (Abb. 4) haben folgende Eigenschaften:

- Rohdichten um 600 g/cm^3
- Wasseraufnahme, Einzelkornfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Frost-Tauwechsel-Beständigkeit "konkurrenzfähig" mit herkömmlichen leichten Gesteinskörnungen.

Sie wurden bereits erfolgreich anstelle von Bims für die Herstellung von Leichtbetonsteinen auf einer technischen Anlage eingesetzt.



Abb. 4: In der Pilotanlage hergestellte leichte Gesteinskörnungen aus gipshaltigem Mauerwerkbruch für Anwendungsuntersuchungen

Die mittels Röntgenfluoreszenzanalysen bestimmten Gesamtsulfatgehalte nehmen durch die thermische Behandlung ab. Dabei bestehen deutliche Unterschiede zwischen den Proben, denen kein SiC zugegeben wurde und denen mit SiC . Die Proben ohne SiC wiesen nach dem Brand noch SO_3 -Gehalte bis zu 9 Masse-% auf. Dagegen liegen die SO_3 -Gehalte der Granulate mit SiC unter 0,5 Masse-%. Die oben beschriebene Rolle des SiC wird also bestätigt. Der eluierbare Sulfatgehalt wurde an einem Eluat mit einem Wasser-Feststoff-Verhältnis von 10:1 gemessen. Er geht von 1600 mg/l im Ausgangszustand, was etwa der Konzentration einer gesättigten Gipslösung entspricht, auf Werte unter 50 mg/l zurück. Die ebenfalls gemessenen Schwermetallgehalte liegen unter der Nachweisgrenze. Damit erreichen die leichten Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch trotz der erheblichen Gipsanteile Qualitäten, die den uneingeschränkten Einsatz möglich machen.

3 ZUSAMMENFASSUNG

Aufbauend auf Laborversuchen fanden in der Pilotanlage der IABgGmbH Untersuchungen zur Herstellung von leichten Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch statt. Aus den verwendeten Ausgangsmaterialien mit Gipsgehalten bis zu 15 Masse-% wurden leichte Gesteinskörnungen mit SO_3 -Gehalten zwischen 0,14 und 0,52 Masse-% hergestellt, die damit normenkonform in Bezug auf die Verwendung als leichte Gesteinskörnung für die Herstellung von Betonen sind. Die Gehalte an eluierbarem Sulfat gingen auf Werte unter 50 mg/l zurück, so dass auch von dieser Seite keine Einsatzbeschränkungen bestehen. Anhand der experimentellen Untersuchungen im

Pilotmaßstab konnten erste technologische Aussagen gemacht werden. Danach können energetische Vorteile im Vergleich zu leichten Gesteinskörnungen aus Blähtonen erwartet werden.

LITERATUR

- Müller, A., Reinhold, M. (2002) Lightweight aggregates produced from fine fractions of construction and demolition waste. CIB Task Group 39 – Deconstruction Third Annual Meeting, 9. April 2002, French-German Institute for Environmental Research, University of Karlsruhe.
- Müller, A., Schnell, A., Rübner, K. (2012) Aufbauskörnungen aus Mauerwerkbruch. Chemie Ingenieurtechnik, Vol. 84, Nr. 10, S. 1780-1792, <https://doi.org/10.1002/cite.201200089>.
- Riley, C.M (1951) Relation of Chemical Properties to the Bloating of Clays. J. AM. Ceram. SOC. 34, (1951) 121–128, <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1951.tb11619.x>.

GREEN TECH VALLEY



Hier wachsen
grüne
Innovationen!

#1 Technologie-Hotspot für Klimaschutz & Kreislaufwirtschaft



Gemacht für die Zukunft

M MONTAN
UNIVERSITÄT
LEOBEN



QR-Code scannen und
digitales Erlebnis starten

zukunft.unileoben.ac.at

Die großen gesellschaftlichen Herausforderungen im Bereich Ressourcen, Klima, Energie und Umwelt verlangen nach technischen Lösungen. Die Montanuniversität Leoben sieht ihre Aufgabe darin, durch Exzellenz in Wissenschaft, Forschung und Bildung ihren Beitrag zu leisten.

Die Entwicklung innovativer Lösungen ist unsere Leidenschaft. Der Schutz von Umwelt und Klima unser Anliegen. Die Studienrichtungen der Montanuniversität Leoben erstrecken sich entlang des Wertschöpfungskreislaufs von Rohstoffen, über deren Verarbeitung bis hin zum fertigen Produkt und dem Recycling.

ALLES AUßER GEWÖHNLICH

NETZWERKEN MIT 250 PARTNERN

Der Cleantech-Cluster der oö. Standortagentur Business Upper Austria ist die Plattform der Umwelttechnik- und Energietechnologie-Unternehmen in Oberösterreich.

Gezielt verbinden

Wir sind die Schnittstelle zwischen Unternehmen sowie Forschungs- und Bildungseinrichtungen, Entscheidungsträgern und Anwendern.

Überlegt vermitteln

Wir unterstützen Sie bei der Suche nach geeigneten Kooperationspartnern und passenden Förderschienen – national wie international. Mit unseren Special-Interest-Groups bieten wir Ihnen attraktive Plattformen für spezifische Technologie- und Produktentwicklungen an.

Voneinander lernen

Wir organisieren Fachtagungen, branchenspezifische Schulungen und Workshops, Erfahrungsaustauschrunden und Treffpunkte.

www.cleantech-cluster.at

Sichern Sie sich mit uns den Informationsvorsprung,
auf den es ankommt.



Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH



Wir widmen uns aktuellen verfahrens- und anlagentechnischen sowie politischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Themen, soweit sie die Abfall- und Kreislaufwirtschaft und die Energie- und Rohstoffwirtschaft betreffen. Unsere Aufgabe sehen wir in der Kommunikation zwischen Politik, Verwaltung, Wirtschaft, Technik und Wissenschaft.

Zu wichtigen Themen veranstalten wir Konferenzen und Congresses – dazu geben wir Bücher oder E-Books heraus.

Stets sind wir auf der Suche nach interessanten Referenten, aktuellen Themen und spannenden Projekten, um unser Angebot weiterzuentwickeln. Gern lassen wir uns von neuen Ideen inspirieren und diskutieren deren Realisierbarkeit.

Insgesamt sind bislang bei uns etwa zweitausend Fachbeiträge erschienen, die in ihrer Gesamtheit einen guten Überblick über technische, wirtschaftliche, rechtliche und politische Entwicklungen geben. Seit einiger Zeit stellen wir Ihnen einen großen Teil der Fachbeiträge kostenlos auf unserer Internetseite zur Verfügung.

Wir geben seit vierzig Jahren Fachbücher zu zahlreichen Themen des technischen Umweltschutzes heraus:

- Thermische Abfallbehandlung & energetische Verwertung
- Dokumentation von Abfallverbrennungsanlagen
- MBA & Ersatzbrennstoffe
- Recycling & Rohstoffe
- Mineralische Nebenprodukte & Abfälle
- Abwasser & Klärschlamm
- Strategie & Umweltrecht
- Immissionsschutz
- Biologische Abfallbehandlung

Unsere Konferenzen im Überblick:

- Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz
- Berliner Recycling- und Sekundärrohstoffkonferenz
- Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle
- IRRC – Waste-to-Energy
- Berliner Klärschlammkonferenz

TK Verlag GmbH

Dorfstraße 51
D-16816 Nietzwerder-Neuruppin
Tel. +49 3391-45 45-0 • Fax +49 3391-45 45-10
E-Mail: tkverlag@vivis.de • Web: www.vivis.de

Für Sie auch erreichbar mit unserer Konferenz-App für unterwegs.



Download für Android



Download für iOS

English Abstracts

Characterization of historic tailings from kaolin production

V. Spieß¹, J. Theiss² & H. Flachberger¹

¹) Montanuniversität Leoben, Chair of Mineral Processing, Leoben, Austria

²) KAMIG Österreichische Kaolin- und Montanindustrie Aktiengesellschaft Nfg. KG., Aisthofen, Austria

During mining activities at the sites of KAMIG (Österreichische Kaolin- und Montanindustrie Aktiengesellschaft Nfg. Komm. Ges.) substantial amounts of tailings have been produced over the last century. To use these potential sources of raw material beneficially, KAMIG KG and the Chair of Mineral Processing initiated the strategic research project “Process development for innovative mineral products from anthropogenic deposits”. The aim of this project is to develop a process to transform the Quartz-, K-Feldspar, Kaolinite- as well as rare-earth-containing mineral phases from tailing storage facilities into marketable, high-quality concentrates.

In the framework for developing effective and efficient processing methods, the systematic characterization of the tailings concerning their processability is one of the first steps. This task is undertaken by the method of feature class analysis which combines heavy liquid separation with dry lab magnetic separation using a Frantz-L1 magnetic barrier separator in distinct particle size classes.

The fractions generated by this procedure are then evaluated regarding their mineral composition and liberation using SEM-based methods.

The fractions with the lowest specific gravity ($- 2.72 \text{ g/cm}^3$) are comprised of quartz, potassium feldspar, kaolinite agglomerates as well as organic impurities such as roots. The quartz grains occur well liberated and free of inclusions. The heavy mineral fraction ($+ 2.92 \text{ g/cm}^3$) consists mainly of Ilmenite, Rutile, Zircon, and Monazite.

PFC-Compounds in landfill leachate treatment – Results of research on PFC-Elimination

M. Weissroth¹, L. Hauschel¹ & F. Natau¹

¹⁾ WEHRLE-WERK AG, Environmental Technology, Emmendingen, Germany

Although waste minimization, waste prevention and waste reuse play an increasingly important role in new waste management concepts, landfilling is still the first choice for orderly waste disposal in many countries around the world. Even if in some countries in Western Europe the dumping of waste without thermal pre-treatment is no longer permitted or no longer carried out, domestic waste has also been disposed of here for decades by depositing it in landfills, so that these will also require aftercare in the future.

Many products of modern day life contain PFCs, so even these extremely persistent compounds have been dumped in landfills with household waste for many years since 1950-1960. For this reason, it can be strongly assumed that the PFC compounds were also extracted from the waste over decades and are found in the leachate. However, only in recent years has it really become clear that these compounds are ubiquitous in our environment and, due to their high persistence, have accumulated in a wide variety of environmental areas such as groundwater and soil. Landfill leachate also makes a large contribution to this accumulation of PFCs in the environment.

In order to understand how the PFC compounds can best be eliminated by different leachate treatment processes, the leachate from two household waste landfills in Germany and Australia were examined. During a laboratory investigation and a 4-month pilot operation, the effects for the best possible leachate treatment were checked. The treatment processes consist of a membrane bioreactor system in combination with nanofiltration or reverse osmosis and a subsequent activated carbon stage. The goal was to find out the most effective and economical treatment method for this leachate and to understand where the PFC compounds are ultimately removed from the leachate.

The results show that there is not only one typical behavior for the different PFC compounds, but each individual substance shows an individual behavior. From this it can be deduced that the elimination of the PFC compounds from the leachate is not an easy task and that membrane processes with all their advantages and disadvantages can also be necessary. The treatment of the resulting concentrates is then the next relevant step in order to identify potential sinks or opportunities for the recovery of the PFC compounds.

First experiences with biowindows after removal of the active gas extraction system

M. Hrad¹, V. Wechselberger¹ & M. Huber-Humer¹

¹⁾ University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Department Water-Atmosphere-Environment, Institute of Waste Management, Vienna, Austria

Older municipal waste landfills are characterized by fluctuating gas quality and declining gas production, leading to an inefficient and intricate gas collection or flaring. As an alternative to the active extraction of lean landfill gas, passively loaded methane oxidation windows (biowindows) can be established to mitigate gas emissions. Biowindows, integrated into the existing landfill cover, consist of an adequate gas distribution layer overlain by humic-rich materials (such as mature compost) to support microbial methane oxidation. Due to their higher gas permeability compared to the remaining landfill cover, landfill gas is loaded passively to the biowindows.

At an old municipal solid waste landfill site in Austria, the active gas extraction system (vertical gas wells) will be replaced by passively loaded biowindows. Until now, 4 out of 15 planned biowindows have been installed, each consisting of a 0.5 m thick gas distribution layer combined with a 1.4 m mature compost cover. The base area of the biowindows varies between 36 - 49 m² (2 pilot windows installed in 2014) and 64 m² (2 windows installed in 2021). Ongoing investigations revealed an uneven gas distribution within and methane supply to the individual biowindows forming (temporary) methane emission hotspots in some of the biowindows. However, the currently available biofiltration area seems to be too small to oxidise the landfill gas that is still produced onsite. It is planned to remove further gas wells and to install about 11 additional biowindows (2022 – 2025) with improved technical design according to the lessons learned from the pilot phase and new international scientific recommendations (e.g. matching the compost material to the permeability of the gas distribution layer or the use of a zig-zag shaped gas distribution layer leading infiltrating water laterally to the low points). It is assumed that the specific methane load per square meter will decrease with further installations of biowindows (increase of biofiltration area) and a corresponding (more homogeneous) distribution of the passive gas load.

InnoBLA II: New Design of a Planning Tool for Heating Soils Using Electrically Heated Heat Sources

A. Schönberg¹, C. Spijker² & H. Raupenstrauch²

¹⁾ S-PEC, Graz, Austria

²⁾ Montanuniversität Leoben, Leoben, Austria

The aim of the InnoBLA project is to improve the cost-effectiveness of soil heating using electrically heated heat sources / heating lances (Thermal Conductive Heating, TCH) for thermally assisted soil air extraction. In the project, basic research into heat transfer or heat transport, particularly at the boundary layer between the surface of the heating lance and the soil, and taking into account the high operating temperatures of in section heated lances (up to 800 °C) are used to collect essential parameters that are necessary for the optimal design of a TCH- Remediation.

With regard to heat and mass transfer in soils, thermal phenomena and their influencing factors in soils at TCH, especially at high temperatures on the lance surface, are researched. These parameters are of decisive importance for the planning and design of a TCH remediation. As part of the project a planning tool is developed that quantitatively describes the temperature profile and the associated discharge of pollutants in the remediation zone and thus allows the TCH system to be optimally dimensioned.

The requirements for the tool are useful and sufficiently accurate results with simultaneous user-friendly use and fast delivery of results. The tool contains a heat transport model, which was compared with the results from a test facility. In addition, a pollutant transport model describes the temperature-dependent discharge and provides the predicted pollutant discharge. In this way, different arrangements and heat performance entries can be displayed and efficient approaches to renovation can be found.

The model for the planning tool is based on significant simplifications and should nevertheless deliver useful results. Basically, the model is used to design and better estimate the duration of remediation projects.

A test facility was set up to experimentally collect data on the heat input from the heating lance into the soil. The aim of the construction is to create a replica of the soil on a laboratory scale with the simplest possible geometric structures. The approach consists in a cylindrical structure, in which there is the possibility of placing the radial heat transport in the fore. By setting up the test facility, it is possible to experimentally implement defined boundary conditions. As a result, the applied models for the simulation calculations can be checked very well with acquired measurement data.

To describe the physical processes in the soil, two different numerical models are used. The first model is based on the open source software OpenFOAM 2.4 and depicts all relevant physical and chemical processes in detail using a multi-phase model. This model is primarily used to generate a detailed understanding of the processes. The second model is used in the tool for planning future remediation projects. The focus here is on simple handling and fast computing times. In addition, laboratory tests were carried out to determine the material data relevant for the modelling.

InnoBLA III: Effects of thermal soil treatment on heavy metal mobility and corrosion of heating wells

D. Vollprecht^{1,2}, J. Kern^{1,3}, I. Berrer¹, J. Riedl⁴, G. Mori⁴ & T. Sattler¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

²⁾ University Augsburg, Chair of Resource and Chemical Engineering, Augsburg, Germany

³⁾ VTU Engineering GmbH, Vienna, Austria

⁴⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of General and Analytical Chemistry, Leoben, Austria

Within the project InnoBLA the effect of thermal treatments of soils on the mobility of heavy metals and the corrosion of heating wells was investigated. Five soil samples were thermally treated ($t = 7$ d, $T = 105$ °C, 300 °C, 500 °C) and afterwards subjected to pH-dependent leaching tests. Furthermore, a cladding tube (stainless steel 304) was characterized after application in the field using light and electron microscopy as well as x-ray fluorescence analysis. For optimization of the tube material samples of another 15 alloys were firstly treated thermally under argon atmosphere (24 h, 750 °C), subsequently exposed to an electrolyte solution (120 h, 236 mL H_2SO_4 , 25 g $Fe_2(SO_4)_3$, 400 mL Wasser). Finally, the ablation rate was determined using light microscopy. The leaching tests indicate that thermal treatment of soils tends to decrease the mobility of those heavy metals which may form oxyanions (e.g. Cr). Heavy metals occurring as cations (e.g. Pb and Zn) show the opposite behaviour which can be explained by the observation that thermally treated soils react more alkalically. This observation is in agreement with the modelling results according to which the release of heavy metals is often controlled by adsorption processes. The corrosion studies reveal that heating of the samples leads to the precipitation of Cr-rich carbides and later the electrolyte causes intercrystalline corrosion. In contrast, the alloys X1NiCrMoCu31-27.4, X10CrAl25 and X18CrN28 show an ablation rate of <1 g/(m²a).

Use of existing areas and brownfield recycling vs. greenfield property development – benefits and risk minimisation

C. Kienreich¹, D. Vorraber¹, A. Ragossnig¹ & J. Maier¹
RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Vienna, Austria

Because of the increasing land use in connection with soil sealing more and more arable land area is lost. This greenfield use results on the one hand in the loss of the biological function of soil and its productivity as well as the decline of the dust binding activity. On the other hand, the biological diversity is affected and the danger of flooding increases. Furthermore, the microclimate in affected areas changes, as the reduced evaporative capacity leads to a local increase in temperature. Due to this circumstance, the revitalisation of brownfield land gains in importance. To reduce the greenfield use and preserve our environment, these under-utilised brownfield areas, particularly abandoned industrial and commercial used sites, are to be re-used. Developers building on brownfields can benefit from existing infrastructure or buildings leading to the saving of costs. Besides, the use of existing buildings allows the better integration of new building projects in the local townscape.

But the reuse of brownfields is always fraught with risk, which is why a lot of building project developers are still sceptical when it comes to this issue. The possibility of discovering existing contaminations acts as a deterrent. Only a few of the not used brownfield sites in Austria actually hold contaminations and this risk can even be minimised with a detailed examination of the area in question. For example, environmental assessments with chemical analysis of soil and groundwater or the investigation of pollutants and interfering substances in existing buildings can reduce the risk of time delays or unscheduled costs. Consulting engineers, like the RM UMWELTKONSULENTEN ZT GMBH, conduct such investigations. Based on these previous examinations, the suspicion of contamination can either be eliminated or concretised, making it easier to plan further steps and avoid unexpected costs. To promote brownfield recycling, the federal ministry for climate protection, energy, mobility, innovation and technology in Austria has established the opportunity to receive financial support for actions leading to the reuse of brownfield instead of greenfield. The Kommunalkredit Public Consulting GmbH (KPC) takes over the costs for a multitude of preliminary examinations, raising the attractiveness of brownfield recycling for building project developers.

In-situ soil washing with vegetable oil/water emulsions to remove hydrocarbons

M. Lackner¹, K. Putz², M. Plank³ & A. Loibner⁴

¹⁾ FH Technikum Wien, Fakultät Industrial Engineering, Vienna, Austria

²⁾ ensowa GmbH, Schäffern, Austria

³⁾ Spitzer GesmbH, Voralpe, Austria

⁴⁾ BOKU, Department IFA-Tulln, Institut Umweltbiotechnologie, Geobiotechnologie and Environmental Chemistry, Tulln, Austria

Mineral hydrocarbons (MOIL) pose a problem at numerous old and contaminated sites. Both the saturated and the unsaturated zone can still be heavily contaminated decades after the damage event. Above all there is a relative accumulation of the hydrocarbon fraction that is difficult to degrade, which is branched and cyclic aliphatics and fused aromatics. As part of the "Purification cascade" research project, the example of the contaminated site N77 (Petroleum refinery Drosing, Lower Austria) was used to investigate how such soils can be decontaminated on site at low cost. At the site N77 there are hotspots of contamination with up to 40,000 mg/kg soil MOIL in the saturated and unsaturated zone, and there is also mineral oil in phase floating on the groundwater. In the course of process development, emulsions of 5-10% rapeseed oil in water were prepared and infiltrated into the subsoil. The basic idea of the process is that vegetable oil absorbs hydrocarbons during percolation and that such loaded vegetable oil is withdrawn from the water table. Similarly, vegetable oil introduced into the saturated zone during flotation absorbs MOIL and is also drawn off.

The infiltration tests were carried out with pressures of up to 5 bar. It was shown that the method is suitable for sufficiently permeable soil (gravel). A total of 70 liters of vegetable oil (POIL) were infiltrated into the unsaturated zone in the form of an emulsion, which meant that 31 liters of mineral oil (MOIL) could be removed with a recovery of 25 liters of POIL. 120 L of POIL were introduced into the saturated zone. This removed 7.6 L of MOIL for a recovery of 104 L of POIL. The main results for the unsaturated zone can be summarized as follows:

- 50-85 % of MOIL in the soil can be extracted in one pass with 10 % POIL in water
- The method is suitable for permeable soil: soil permeability coefficient $k_f > 10^{-4}$ m/s
- Max. 15-50 % of the POIL remains in the soil, if washed with water only max. 5-30 %
- The effective area is about 1-5 m² in the unsaturated zone and 5-10 m² in the saturated zone.

In principle, this depends on the respective K_f value, i.e. on the depression funnel that occurs as a result of the pump operation (intermittent mode is best).

For low to poorly permeable soils, the process could also be used on-site as soil washing. In this case, combined treatment steps are conceivable, especially the addition of pollutant-degrading enzymes seems to be promising.

The process developed here allows a quick and easy reduction of pollutants from permeable soils in both the saturated and unsaturated zone. It is also suitable as a pretreatment step for microbial techniques, allowing for a significant reduction in remediation time.

The project „Aufreinigungskaskade“ was supported by BMK, managed by Kommunalkredit Public Consulting, under grant number B820001, which is gratefully acknowledged.

Thermal treatment and modification of metallurgical residues for recycling

K. Doschek-Held¹, A. Krammer¹, F.R. Steindl^{2,3}, P. Eisner¹ & D. Wohlmuth⁴

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Thermal Processing Technology, Leoben, Austria

²⁾ Graz University of Technology and NAWI Graz Geocenter, Institute of Applied Geosciences, Graz, Austria

³⁾ Graz University of Technology, Institute of Technology and Testing of Building Materials, Graz, Austria

⁴⁾ voestalpine Stahl Donawitz GmbH, Resources and Residual Materials Management, Leoben, Austria

During production in the integrated steel mill, different metallurgical residues are produced. Due to a lack of recycling processes, these materials must be temporarily stored or landfilled. To promote the zero-waste circular economy and resource conservation, possibilities for recycling these residues are to be examined. For this purpose, recycling the metal fraction as secondary raw material and utilising the mineral fraction as an alternative cement constituent are evaluated. The residual materials from hot metal desulphurisation and secondary metallurgy/continuous casting were identified as potential material flows for the investigation. In addition, possible correction substances from secondary sources for modification were analysed. Furthermore, a material flow analysis for the potential use as an alternative cement constituent in the province of Styria is also sought.

On the way to the complete decarbonisation of construction production by 2050, CO₂ reduction and resource conservation of mineral building materials are significantly necessary. This goal can be achieved by using suitable residues. Therefore, it is necessary to make previously landfilled metallurgical residues usable through thermal treatment, cooling and processing steps, as well as a chemical modification with other secondary correction substances. For this purpose, the necessary process fundamentals and the mode of action of the binder were determined, and the metal recovery rate was evaluated based on laboratory tests.

The results of the trials showed that the metal fraction fits the quality requirements for re-use in the steelworks. At the same time, the required performance of the mineral fraction was also proven.

In conclusion, the following advantages can be noted from the intended utilisation:

- avoidance of landfilling;
- upcycling of the metal and mineral fraction;
- primary resource conservation and CO₂ emission savings in the steel and cement industry.

Alternative bed material testing for fluidised bed incineration with reuse potential as cement additive

P. Dörfler¹, U. Eggenberger¹ & M. Wolffers¹

¹⁾ Universität Bern, Institute of Geological Sciences, Bern, Switzerland

In this study, different novel types of bed material for fluidised bed incineration of natural and waste wood were evaluated, with the aim to reuse the residual bottom ash as additive for cement production.

Currently, primary quartz sand is used as a bed material in fluidised bed incineration. The resulting bottom ashes consist mainly of the bed material itself, with a coating of residual inorganic compounds originating from the wood. Currently, these bottom ashes are directly deposited on landfill despite their low concentrations in contaminants. Considering their geochemical characteristics, the bottom ashes are a promising material for further use as a cement additive. Additionally, the bottom ashes occur in constant volumes and composition, an important requirement for cement raw materials. A replacement of the quartz sand would significantly improve the ash quality in regard with a reuse as cement additive.

Eight waste materials were initially evaluated for their suitability as alternative bed materials. The test procedure followed an integrative experimental approach using chemical and mineralogical characterisation, fluidisation investigations, and cement and mortar testing techniques. The three most suitable candidates were tested in a bench scale reactor. The ashes generated in those experiments will be used in performance tests to investigate their suitability as cement additive.

This project provides a workflow to investigate new materials for similar thermal applications. It was shown to be applicable to efficiently select the most suitable candidates for experiments that give robust information about the material suitability. Thus, all necessary information relevant for the preparation of industry scale experiments are obtained.

Investigations of the thermochemical recycling of tar-containing road debris

J. Hee¹ & P. Quicker¹

¹⁾ RWTH Aachen University, Teaching and Research Field Technology of Energy Raw Materials, Aachen, Germany

Construction waste containing tar is assigned to the waste codes 17 03 01* ($> 1,000$ mg/kg EPA-16-PAK) and 17 03 02 ($25 > x < 1,000$ mg/kg). Significant amounts of these wastes are expected to be generated in the following years. Currently hardly any concepts for sustainable and economic treatment exist in Germany because of lacking legal framework conditions. The thermal treatment of tar-containing road construction waste represents a possible recycling process. On the basis of laboratory scale trials it could be shown that a treatment temperature of $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ and at least 30 minutes residence time are sufficient to expel EPA-16-PAK from the solid material. $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ should not be exceeded to ensure mechanical stability and subsequent use as a construction material. The oxygen supply in the gas atmosphere plays a subordinate role, but thermal after-burning should be provided to ensure the complete oxidation of the expelled organic components.

Baseline report for IPPC-installations – Experiences from practice

R. Hummel¹, K. Amort¹ & A.M. Ragoßnig¹

¹⁾ RM eco consultants ZT GmbH, Vienna, Austria

The guideline for baseline-reports issued from the Austrian Ministry of Environment gives a comprehensive insight into relevant contents of a baseline report as well as the procedure to assess the relevant hazardous substance inventory to be looked at in detail in the baseline report.

Experience shows that preferentially a “bottom-up” approach should be used to assess the relevant hazardous substances as relevant constituents might also be part of “non-relevant” substances that would not be considered in a “top-down” approach.

Narrowing down relevant substances to also mass wise relevant hazardous substances is done by the means of analysis of safety data sheets and other available information. In some cases, detailed research and clarifications with the producers is advisable to further narrow down the number of relevant hazardous substances that exceed the quantity thresholds of the Industrial Emissions Directive.

After pinning down the special reference area a concept for the preservation of evidence as basis for additionally needed investigations is to be developed. To attribute potential contaminations correctly to the IPPC-process itself or potential external sources such as agriculture or upstream polluters it is also important to include upstream groundwater sampling.

Regarding the extent of investigations done it is advisable for cost reasons to rely on single substance identification only when this is not avoidable. Finally, the evaluation of the analysis results and their plausibility check need to deliver a consistent and comprehensible picture to assess the current state sufficiently.

Based on own experience it can be stated that the creation of a baseline report requires expert knowledge from different areas of expertise (waste management, chemistry, geology, hydrogeology, etc.). Experience also shows that an up-to-date substance inventory is appreciated by the authorities this requires a regular update if the production process, or substances used change over time.

Sensor-based sorting of mineral waste and raw materials

S. Müller¹, A. Müller¹ & S. Liebezeit¹

¹⁾ IAB, FB Baustoffe, FaB Baustoffrecycling, Weimar, Germany

Along with the rapid development of computer technology and the considerable progress in the field of sensor technology, the development of sensor-based sorting processes has been observed since the mid-1980s. In waste processing, the introduction of sensor-based processes for sorting used glass with so-called chute machines began. Since then, the performance of the machines and systems has been continuously expanded. Currently, the detectors used range from visual spectroscopy to X-ray fluorescence spectroscopy. The particle size range in which sensor-based methods are used is also constantly evolving. The lower limit is currently 1 mm for sorting out ceramics, porcelain and stones from used glass. But there are also examples for the optical sorting of large, heavy fragments with masses of up to 2 kg. In the circular economy, sensor-based sorting is indispensable today - e.g. for the recovery of secondary raw materials from mixed plastic fractions or for the separation of recyclable fractions from waste paper mixtures. It forms the basis for the realization of material cycles. On the other hand, it is still very rarely found in construction waste processing, although it is the only process that offers the possibility of separating different mineral building material types from another. As a player in the field of sensor-based sorting, OptoSort GmbH has developed the "Apollo" free-fall sorter. Its performance in terms of sorting construction waste was analyzed by the IAB Weimar gGmbH in a variety of sorting and separating tests. One result presented here refers to the detection of the components of rubble mixtures using near-infrared (NIR) technology and the separation of the mixtures based on this. The sorter is suitable for particle sizes from 8 mm to 75 mm with a maximum grain size ratio of 1:4. For example, fractions 8/32 mm or 16/64 mm can be sorted.

Increasing supply chain transparency and product circularity by the digital product passport - current challenges, necessary information and interfaces within recycling

E. Wagner¹, E. Poppe¹, M. Jaeger-Erben², C. Kitazume³ & T. Ebert³

¹⁾ Technical University Berlin, Berlin, Germany

²⁾ BTU Cottbus, Cottbus, Germany

³⁾ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Germany

The digital product passport is an instrument for storing and permission-based sharing of information including material and recycling characteristics of products. This also includes extended information which supports high-quality recycling and thereby improves the overall circular economy. By evaluating goals and challenges, this paper derives product information that are necessary, optional or of future relevance. Main information demand include material level information as composition (material identity, classification, foreseen application, SVHC-thresholds, etc.) as well as product model related information as target collection stream for a product, sales/market volumes. Electronics and textiles product groups are in focus of the study due to supply chain complexity. Results shall be critically discussed by experts in workshops, interviews and further input.

FAQs: re-use of building components

M. Meissner¹, Th. Romm², I. Schanda³ & R. Borszki¹

¹⁾ pulswerk GmbH, Vienna, Austria

²⁾ ROMM ZT, Vienna, Austria

³⁾ Re-Use und Reparaturnetzwerk, Vienna, Austria

Recovery-oriented demolition is mandatory in Austria as a standard demolition method via the Recycling Building Materials Ordinance and the standard ON 3151. It supports EU-wide and national efforts in several strategic papers. The situation of the implementation of this framework is different: In discussions with various stakeholders in the context of their work on BauKarussell and re-use, the authors repeatedly encounter major gaps in their knowledge of the legal requirements, the opportunities and potentials, and the resulting changes in planning and implementation. The question of how (preparation for) re-use can be integrated into a deconstruction project is of little relevance to building owners. The specialised companies involved (general contractors, architects, pollutant and contaminant inspectors, demolition contractors, construction companies, etc.) have only sporadic knowledge about the assessment of the potential for re-use. In the meantime, individual actors have built up expertise and knowledge out of personal motivation.

Across Europe, a whole range of projects, initiatives and start-ups are simultaneously dealing with the possibilities of re-use in the building sector. These are at the beginning of raising the potentials. Countless conversations with building owners, project developers, architects, state administrations and municipalities show us that neither the knowledge nor the possibilities and opportunities would be widely known among the decision-makers in the sector. Discussions are regularly initiated to explain the importance of the Recycling Building Materials Ordinance. From a social perspective, these efforts contribute to the development of the circular economy. As a result, the need for action is that this knowledge transfer must take place as efficiently as possible.

In the course of more than five years of setting up and developing Social Urban Mining and BauKarussell, the authors were asked in countless conversations with stakeholders the same open questions relevant to the implementation of (preparation for) re-use of building components. The 14 points listed as FAQs are result of a project financed by the Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology. They combine our project experiences with the interview results among Austrian stakeholders in the deconstruction sector:

relevance – potential – increase complexity – delay – costs – quality requirements – liability – market place – pre-demolition audit – call for tender – end of waste – planning process – good practice – role of public sector

In the synopsis, a comprehensive picture of the challenges that arise in the re-use of building components emerges. At the same time, we point out options for action that stakeholders can take directly in project developments (project-oriented) and/or in the general strengthening of the reception of re-use in the system of demolition and new construction (system-oriented).

The FAQs are intended to provide project managers with advice for their own project development. The solution approaches of others serve as guidelines in the decision-making process for their own tasks. Nevertheless, every deconstruction project is unique and faces specific challenges that need to be solved individually. The interview guide and the detailed analysis of the interviews, the presentation of possibilities for implementation based on previous experiences, good practice examples and study results as well as further references and a comprehensive bibliography are listed in the full version of this study, to which we would like to refer here. The compiled know-how is intended to support stakeholders efficiently and effectively in further implementation.

Re-Use activities of the regional government of Styria as a driver for the Circular Economy

U. Kabosch¹, U. Gungl¹ & I. Winter¹

¹⁾ Office of the Regional Government of Styria, Directorate 14 – Waste and Resource Management Department, Graz, Austria

Implementing and promoting re-use is an important step towards circular economy. In the province of Styria, re-use has been a focus of municipal waste management for several years. Numerous initiatives and projects have been carried out in recent years to anchor the ecological and social potential of re-use in the awareness of the population. Since 2019, the Office of the Regional Government of Styria, Directorate 14 – Water Management, Resources and Sustainability has been a partner in the Interreg Europe project SUBTRACT. The aim of the project is to strengthen the re-use sector and the re-use actors (mainly SMEs and social economy enterprises) in Styria on the basis of an exchange of best practices throughout Europe and of a Styrian stakeholder process carried out in the past two years. The following article reports on the measures identified and implemented in the framework of the SUBTRACT project, e.g. the digital re-use map of Styria.

The AHOY-Project: Waste Wood Recycling with X-ray Technology

C. Bauer¹, R. Wagner¹ & J. Leisner¹

¹⁾ Fraunhofer IIS, Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS, Division Development Center X-Ray Technology, Application-specific Methods and Systems, Fuerth, Germany

In the context of circular economy, waste wood is an important resource. However, according to the German waste wood ordinance, sorting into four categories is necessary before recycling. These categories describe the purity of waste wood based on possible contamination, like paint, foreign bodies, or wood preservatives. Only the purest two categories are allowed to be recycled. For categorization, manual sorting is currently used. This is not only time-consuming and expensive, but also relatively inaccurate. An automated, sensor-based solution would lead to cost savings for recycling companies and also support a sustainable use of resources. For this purpose, a non-contact measuring system, which can examine waste wood chips, will be developed within the project AHOY. As a proof of concept, this paper presents dual energy X-ray transmission (DE-XRT) for the discrimination between clean wood and the most common contaminants polyvinyl chloride and white lead paint. The results show that even thin layers of contaminants can be detected. The DE-XRT data are intended for a later fusion with near-infrared spectroscopy, which is sensitive to organic contaminants hard to detect by DE-XRT. Artificial neural networks will be applied to the fused data to achieve a sorting process that yields waste wood chips of the purest two categories.

Closed-loop recycling of packaging waste at the food manufacturer Freiburger

K. Plevová¹, M. Feuchter¹, M. Wellacher², A. Jamnik², N. Wild¹, H. Pichorner³ & K. Resch-Fauster¹

¹) Montanuniversität Leoben, Chair of Materials Science and Testing of Plastics, Leoben, Austria

²) Ingenieurbüro Wellacher e.U., Graz, Austria

³) PrimAs Tiefkühlprodukte BmbH, Oberhofen, Austria

This work describes different approaches which lead to more environmentally-friendly plastic waste management. Plastic waste was analysed using light microscopy, Raman spectroscopy and differential scanning analysis. Afterwards, the waste was sorted by polymer content and mechanically recycled. Recycled material was used to produce films for tertiary packaging (shrinkage films). One possibility is recycling only single-layer films from polyethylene (PE), another possibility is to recycle multilayer films consisting of PE, polyamide 6 and ethylene vinyl alcohol copolymer. Due to mixing films, and thus polymers, in a certain ratio, both approaches lead to recycled films with sufficient mechanical properties even without using any compatibilizers.

Two different kinds of films - (i) lightweight films from PE and (ii) biopolymers films – were tested as a replacement for stretch wraps (quaternary packaging). Due to their design, lightweight films don't fulfil the requirements for the packaging in the company. Out of seven different biopolymer films, three reached the required strength and toughness for the stretch wrap used in the company.

Recycled films can replace films used as tertiary packaging and reduce significantly the amount of plastic waste. Also using biopolymers films instead of conventional films can cut down the amount of non-degradable plastic waste.

The use of digital tools for food waste prevention – an environmental comparison

S. Scherhauser¹, S. Gollnow¹, M. Eriksson², D. Orth³, K. Abeliotis⁴ & G. Obersteiner¹

¹ University of Natural Resources and Life Sciences, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

² SLU Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala, Sweden

³ Austrian Institute for Ecology, Vienna, Austria

⁴ Harokopio University, Kallithea, Greece

Food loss and waste prevention are among the priorities set by the EU. Digital solutions that contribute positively to environmental and climate targets hold a recognized potential for the implementation of the European Green Deal. The aim of this manuscript is the presentation of environmental impacts when using digital tools which target food waste prevention based on the climate change impact category, via means of Life Cycle Assessment.

The analysis is based on the development of a scenario, which includes the prevention of edible food waste via the implication of digital systems, subject to the assumptions made. More specifically, an app is used which offers a home groceries management system focusing on reducing food waste at households. Negative environmental impacts of the action's implementation are compared to the obtained savings in food-production and waste treatment operations. We compare the no action scenario (no food waste is prevented) with the prevention action scenario (food waste is prevented) in different variants (waste prevention potential of 5%, 30% and 50%; app usage of 2 min/day, 5 min/day, 10 min/day). The functional unit of the prevention action system is 1 kg of (edible) food prevented from being wasted.

Results show that the no action scenario results in a total of 3.9 kg CO₂ equivalents (CO₂e) per kg of food waste. The prevention action scenario results in total environmental net savings of -3.2 CO₂e per kg of food waste prevented. The impacts of food waste and food waste prevention respectively have the largest effects in all scenarios. The operation of the user device which runs the app as well as the operation of the data centre including all communication services and networks has only a small contribution (0.3-1.2 kg CO₂e per kg food waste prevented), except for the last scenario. If a waste reduction of only 5% can be achieved by households using the app, environmental net savings can reduce and almost offset the effect of food waste prevention. The impacts of app development and maintenance are – at least with the assumptions by the authors – only of minor contribution (0.1 kg CO₂e per kg food waste prevented).

The preliminary results of our analysis indicate that the impacts of using digital tools – at least when considering climate change as impact category – do not necessarily offset the effect of food waste prevention. Assumptions made by the authors will be underlined with real data collected during the project LOWINFOOD. Also, more environmental impact categories such as resource and water use will be considered in further research.

LOWINFOOD (www.lowinfood.eu) has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 101000439. The views and opinions expressed in this document are the sole responsibility of the author and do not necessarily reflect the views of the European Commission.

Is the European waste management industry ready for bioplastic waste?

N. Mhaddolkar¹ & A. Tischberger-Aldrian¹

¹) Montanuniversitaet Leoben, Waste processing and waste management, Leoben, Austria

European bioplastics defined bioplastics as biobased and or biodegradable; thus, dividing them into three types: bio-based biodegradable plastics, bio-based non-biodegradable plastics, and fossil-based biodegradable plastics. They are envisaged to grow steadily in the future. However, it is crucial to know whether the current waste management systems in Europe can cope with this new type of plastic waste and in what way. The bio-based, non-biodegradable plastics could be recycled in the respective conventional plastics recycling stream. For biodegradable plastics, on the other hand, this is not so easy, as they are seen as possible contaminants of conventional plastics. There are also significant concerns about compostable bioplastics in terms of disposal. In order to answer this question, an extensive literature search was carried out. This search was based on papers containing defined keywords (e.g. bioplastics, recycling), and all papers dealing with bioplastics in the waste sector were included in the review article. This article is a summary of the review article, which will be published in a peer-reviewed journal.

Social Food Transfer from Caterings and other Kinds of Provisioning

C. Pladerer¹ & D. Orth¹

¹⁾ Austrian Institute of Ecology, Resource Management Department, Vienna, Austria

Food waste presents major environmental and social impacts on a global level. The share of total waste produced is distributed almost equally amongst the parties along the whole value chain. In lower developed countries the main part arises in agriculture, storage and transport whereas in industrial countries the main part arises in retailing, gastronomy and private households. Food, that does not reach the customer or is not used for its origin purpose, not only means inefficient use of natural resources but also creates major environmental impact at different stages of the production chain, all in vain. Although accurate estimates of losses and waste in the food system are unavailable, the best evidence to date indicates that globally around one-third of the food produced is lost or wasted along the food chain, from production to consumption (HLPE, 2014). Food losses refer to the decrease in edible food mass throughout the part of the supply chain that specifically leads to edible food for human consumption. Food losses take place at production, postharvest and processing stages in the food supply chain. Food losses occurring at the end of the food chain (retail and final consumption) are rather called “food waste”, which relates to retailers’ and consumers’ behaviour. “Food” waste or loss is measured only for products that are directed to human consumption, excluding feed and parts of products which are not edible (Parfitt et al., 2010). If you discuss the impact of food losses you soon get to the ethical dimension of the problem, because on the one side food is wasted on different grounds and on the other side there are many people living under the subsistence level.

While passing on food items between retailers, producers and charitable institutions has successfully been established in Vienna, there is much potential in gastronomy and catering business. Due to the condition of the processed food and dishes and the associated food security concerns and logistic matters passing on and usage of valuable leftover food has been hampered and thus not widely established so far. Individual behaviour is a major reason for food waste at the consumer level while more organisational and structural reasons account for the share of food waste in gastronomy and other forms of external food provisions and services. Insufficient purchase planning and storage management, over dimensioned offers at caterings or too big serving sizes on the plates and lack of communication as well as information are only some reasons to mention in this respect.

To fill the gap, passing on food from gastronomy or other external provision services like business or care caterings should be fostered by developing a practical service concept for a successful implementation with local actors in Vienna. The potential of food which is suitable for passing on will be identified and the co-developed service concept will be tested and optimized within the established network of partners by performing two pilot actions.

Results of the project

- Knowledge concerning the potential of food suitable for passing on
- Proofed service concept for an optimized course of action and practical instructions concerning communication and logistics
- Established network of catering facilities, gastronomy enterprises, socio-economic organisations and other NGOS which pass on food for people in need
- Reduction of food waste deriving from caterings and gastronomy via food transfer to charitable institutions

Paper or Plastics? Comparison of two pre-collection systems for biogenic waste

P.P.J. Demschar¹ & J. Adam¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

Pre-collection systems for the domestic collection of biogenic waste ensure not only waste management and legal considerations, but also enormous social discussions. In recent years, with the introduction of bio-waste bags made of paper or biodegradable plastics by various waste management associations throughout Austria, two camps have formed. While many waste management associations swearing by paper bags because they can be composted without leaving any residue, others saying, they have found the ideal solution for the domestic collection in the form of compostable plastic bags.

The work of Paul Demschar and Josef Adam is divided into two distinctive points and aims to answer which pre-collection system is more suitable for the pre-collection of biogenic waste in private households.

At the one hand, a trial is conducted in different households, with the focus on gaining insights into consumers' views on the two types of bio-waste bags, such made of paper and such of biodegradable plastics. Results of this investigation are the need for bags, the duration of use and general views on handling and practicality. The aim is to make these parameters dependent on the size of family and to evaluate whether there is a pre-collection system for all cases or a differentiation would already be appropriate at this point.

On the other hand, a practical experiment deals with aspects that affect the municipality and the waste collectors more closely. In a laboratory setup, the evaporation performance of a paper bag is compared to that one of a compostable plastic bag and the resulting weight loss is measured.

In addition, a market research was conducted to determine which pre-collection systems are available in stationary grocery and drug stores. The price structure of pre-collection systems for biogenic waste in those shops was also examined.

How much recycling is in one ton of cement?

M.J. Enengel¹, S.A. Viczek¹ & R. Sarc¹

¹) Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

For the production of cement clinker increasing amounts of wastes or industrial by-products are used as secondary fuels (refuse-derived fuels, RDF and a quality-assured subgroup thereof, namely solid recovered fuels (SRF)) or alternative raw materials. The latter include secondary raw materials (SRM) that enter the clinker burning process as part of the raw meal and secondary supplementary cementitious materials (SCM) that are added to the clinker to produce the final cement products. SRMs have the main purpose of providing the chemical compounds necessary for the production of cement clinker, i.e., CaO , SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 , which are also the main components of municipal waste incineration ash and SRF ash. Because in the cement kiln the fuel ash is incorporated into the cement clinker, from a technical perspective a simultaneous recovery of energy and materials takes place. Consequently, the use of secondary fuels and secondary raw materials results in a certain portion of cement being made of recycled material. In order to estimate this portion, a mass balance of an Austrian cement factory is presented in this article. The mass and chemical assessments of the input and output streams form the basis for this balancing. Furthermore, this mass balance is only related to the oxides necessary for the cement. It is demonstrated that one ton of cement is made up of 322 kg of secondary raw materials.

Development of a method for the unambiguous validation of machine performance

T. Lasch¹, K. Khodier², C. Feyerer³, C. Ragginger² & R. Sarc²

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Chair of Process Technology and Industrial Environmental Protection, Leoben, Austria

²⁾ Montanuniversität Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

³⁾ Komptech GmbH, Product Management and Marketing, Frohnleiten, Austria

Due to their heterogeneous composition and particle size, mixed municipal and commercial waste poses great challenges in waste treatment, which the individual units and the waste treatment plant as a whole have to deal with. Due to the different designs and settings of the aggregates from different manufacturers, there are also differences in terms of their performance and in terms of the nature of the material that is conveyed from this aggregate to the next. Pre-shredders, which are usually the first machines in mechanical processing plants, are of particular importance, as this first process stage has a strong impact on the efficiency of following units, such as sieves, air classifiers, sorters, etc. A method that allows the comparison of different settings of the aggregates and even a comparison of machines from different manufacturers under comparable conditions would significantly facilitate the optimisation of the overall process. The current article describes the approach for the development of an evaluation method for pre-shredders, which is to be extended to other aggregates in the future. The approach pursues the ambitious goal of enabling a standardised process and thus the further development of a Smart Waste Factory through the introduction of internationally recognised testing and assessment methods.

Fundamental drying experiments with processed residual municipal solid waste materials

J. Faitli¹, Z.N. Abdulfattah¹ & N. Yanar¹

¹⁾ University of Miskolc, Institute of Raw Material Preparation and Environmental Processing, Miskolc-Egyetemváros, Hungary

The EU's circular economy concept necessitates the increasing of the recycling ratio of municipal solid wastes. There are many existing mechanical – biological processing plants in Hungary for the preparation of residual municipal solid wastes (RMSW). The two most important products of these plants are the so called bio-fraction and the RDF (refuse derived fuel). Currently there are problems with both of these material streams in Hungary, namely most of the bio-fraction is still landfilled and the local thermal utilisation of the RDF is not solved yet. The high moisture content of the produced bio-fraction and RDF causes difficulties for the downstream operations; therefore drying of these materials has a recent engineering interest to improve. Waste management companies and municipalities in southwestern Hungary aim the fulfillment of the EU's target, namely to decrease landfilling below 10 % and increase recycling above 65 % of municipal solid wastes. However, selective collection is continuously improved there is still high amount of residual MSW is generated. A new mechanical RMSW processing plant (20 t/h) and an experimental RDF pyrolysis plant (200 kg/h) had been built (Faitli et. al. 2020) and now extensive research is being carried out to solve the local utilization of the bio-fraction and the RDF. Authors have carried out a systematic drying experimental series where the effect of the material, material composition, mass (volume or surface) of material and particle size distribution on drying intensity were studied in a 1 m³ oven. The initial slope of the relative moisture loss as function of time was determined. Process engineering design methods of convective hot air drying can be further developed taking into account these research results. The drying tests were performed on samples of 40-120 grams in an oven, and based on them the following findings were made:

- Drying at 105 °C results in about twice the initial drying rate compared to drying at 65 °C.
- If drying of RDF and bio-fraction separately in similar equipment with the same capacity, the initial drying rate of RDF is approx. three times the one of the bio-fraction.
- Samples of 50 to 80 grams had an initial drying rate of approx. 5% larger than samples of 100 to 120 grams under otherwise identical conditions. It validates the known fact, that the width of the material bed on the drying belt strongly affects drying.
- The initial drying rate of the -20mm cutting mill cut stone-metal-glass-depleted bio-fraction is approx. 25% bigger than if we didn't shred it.
- The average moisture content of RDF and bio-fraction mixtures can be easily calculated from the mixing ratio. The initial drying rate of the mixture is between the initial drying rates of the two components separately and is a function of the mixing ratio. This function relationship could not be determined from this measurement.
- The process engineering design method of convective hot air drying is shortly described in Chapter 1. The shown research results validate and fine tune this method especially focusing on the retention time in the drier. So far some actual process design has been made.

Bio Paper Recycling (BiPaRe) Project: Strategic development tool for a recycling-friendly design of bio-based paper coatings

V. Wortmann¹, L. Hamann¹, A. Eisenschmidt¹, S. Genest², M. Jesdinszki³, K. Noller³ & K. Bauer³.

¹⁾ Papiertechnische Stiftung (PTS), Smart and Circular Solutions, Heidenau, Germany

²⁾ Papiertechnische Stiftung (PTS), Functional Surfaces, Heidenau, Germany

³⁾ Fraunhofer Institute for Process Engineering and Packaging (IVV) Materials Development, Freising, Germany

Fibre-based packaging is experiencing a strong increase in demand as it can partially substitute plastic applications. This is driven by consumer awareness and legal requirements, like the Single-Use Plastics Directive. On the other hand, paper provides insufficient barrier properties against water, oxygen, grease, etc, and thus needs to be equipped with barrier coatings to meet the functionality requirements of packaging materials. Some bio-based coatings come from renewable sources and can be an environmentally friendly alternative to the mineral oil-based polymers conventionally applied for paper products. However, upon disintegration in fibre recovery, bio polymers from natural sources like carbohydrates, fats and proteins can dissolve or be suspended in the process water. This in turn can potentially impair the end paper product quality, especially with the trend of narrowing water cycles in paper mills. In this context, laboratory tests are conducted to investigate the influence of natural bio-based coatings on the recyclability of fibre-based products, considering also the contamination of the aqueous phase. After the project finalisation in 2023, a data-based template design considering the barrier properties and recyclability of coated paper will be created to guide product developers. This paper presents the current findings of the project.

Packaging recyclability: Goals, Assessment & Limits

T. Pitschke¹ & W. Rommel¹

¹⁾ bifa environmental Institute, Augsburg, Germany

The complex construction and the variety of materials used in packaging tend to reduce the quantity and quality of end-of-life recycling. The low recyclability of packaging, such as composites made of paper and plastic or small-format, flexible packaging are rising problems for the waste management industry in order to meet recycling quotas. With this under consideration § 21 of the German Packaging Act obliges the dual systems to give preference to recyclable packaging over non-recyclable packaging when it comes to license fees. For the required assessment of packaging, minimum requirements for recyclability in relation to the German recycling situation have been officially specified. The assessment to which extent a packaging complies with this minimum standard is carried out on the basis of the following criteria:

- availability of a sorting and recycling infrastructure for high-quality mechanical recycling
- the sortability of the packaging
- the separability of the packaging into its components
- incompatibilities components or substances contained therein that might render a successful recycling impossible with currently used technology.

With the introduction of the minimum standard, the recyclability of packaging is considered in packaging design more than before. At the same time, recyclability meets with a high response from retailers and consumers. These developments helped to achieve the legal requirements for the material recycling of packaging.

Besides the positive and welcome effects, the limits of a recyclable packaging design must also be considered. Recyclable packaging is not necessarily material-efficient, climate-friendly nor avoids waste. An assessment of packaging in terms of its sustainability that is reduced to just recyclability would be shortened and exposed to conflicting goals.

Green Deal in the Wackersdorf coalfield – how the coal phase-out succeeded 40 years ago

M. Mocker¹, W.P. Bauer² & T. Knoll³

¹⁾ Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Amberg, Germany

²⁾ ia GmbH – Wissensmanagement und Ingenieurleistungen, München, Germany

³⁾ Zweckverband Müllverwertung Schwandorf, Schwandorf, Germany

Towards the end of the 1970s, the Schwandorf area was affected by a dramatic structural change. The remaining lignite of the former second largest mining area in the Federal Republic of Germany could no longer be extracted economically. In addition to the loss of numerous jobs in the mining industry, there was no longer a cost-effective source of fuel for the public power supply and the local energy-intensive industry. This also affected the lignite-fired power plant of the former Vereinigte Aluminiumwerke AG (VAW), in which high-pressure steam was generated for the autoclave digestion of aluminum oxides.

In addition to structural-political difficulties, the municipalities at the time were struggling with the steadily increasing amount of waste. The Bavarian Ministry of the Environment responded to this situation with a far-sighted decision to be the first German state to rely on waste incineration and to put an end to the landfilling of municipal waste. Consequently, the ministry recommended converting the coal-fired power plant into a waste fired cogeneration plant. Surprising at the time, this path can now be seen as a first example of the now established waste-to-energy strategy.

As a result, local authorities joined forces in 1979 and formed an association, which is now called "Zweckverband Müllverwertung Schwandorf" (ZMS). Although the reduction of greenhouse gas emissions was not an issue at the time of foundation, on the occasion of its 40th anniversary the association wanted to demonstrate its ecological advantages and commissioned the authors to draw up a carbon footprint. The climate-relevant emissions caused by the operation of the waste-to-energy plant were determined for each year and compared with the emissions avoided elsewhere as a result.

Emissions from VAW's old lignite-fired power plant amounted to around 240,000 Mg of CO₂ equivalents per year. Replacing lignite with partially renewable waste to cover the energy demand of the successor company, Nabaltec AG, led to a significant reduction of GHG emissions. Together with delivery of heat and power to public grid, the annual reductions from 1982 to 2018 add up to a proud saving of -3.1 million Mg CO_{2eq}.

The largest credit results from the change in disposal path away from landfill to thermal recovery. The avoided landfill gas emissions until the landfill ban came into force 2005 amount to -5.15 million Mg CO_{2eq}. Adding up all the effects leads to calculated savings of -8.25 million Mg CO_{2eq}. Further improvements are expected as a processing plant for improved recycling of metals from bottom ash, a sorting plant to collect recyclables from bulky waste and a sewage sludge dryer were put in operation in recent years.

Despite of some more possible improvement on site, these impressive figures could be multiplied if a repeat of this 40-year success story can be stimulated in an international context. Through its sharing of knowledge, the ZMS would therefore like to contribute to overcome landfilling in Europe and beyond and to achieve sustainable waste-to-energy concepts instead.

Composition of separately collected lightweight packaging in densely populated urban areas – comparison of door-to-door collection and collection points

M. Merstallinger¹, L. Gritsch², J. Lederer², T. Jesacher³, D. Schuch³, I. Binder⁴, V. Kloud⁴, M. Ottersböck⁴ & U. Volk⁴

¹) Technisches Büro Merstallinger, Korneuburg, Austria

²) CD Laboratory for a recycling-based Circular Economy, TU Wien, Vienna, Austria

³) Altstoff Recycling Austria AG, Vienna, Austria

⁴) MA48, Stadt Wien (City Vienna), Vienna, Austria

To achieve the recycling targets of the circular economy package for lightweight packaging wastes (LPW) in urban areas, cities have the option to extend their separate collection system. One option to do so is to shift from collection points and drop-off centers to a system that also includes door-to-door collection. By doing so, the amount of LPW separately collected for recycling is assumed to increase. The question, however, is not only the amount of LPW that can be collected by such an extension, but also whether the extension has an impact on the composition of the separately collected LPW. This article answers these questions by presenting the results of a large-scale one-year experiment in which a separate collection system for LPW based on collection points and drop-off centers was experimental supplemented by a separate door-to-door collection of LPW.

The experiment was carried out from May 2021 to April 2022 in a densely populated neighborhood of 9.500 capita in a large city in Austria. The LPW fractions promoted for separate collection in the city are plastic bottles, lightweight beverage cartons, and metals. Before and throughout the experiment, the amounts of LPW and mixed municipal solid waste (MSW) were recorded. To determine the composition of LPW and mixed MSW, waste sampling campaigns were conducted before (April 2021), in the middle (October 2021), and in the end of the experiment (April 2022). In addition to that, also the impact on the separate collection logistic was assessed. This, however, is not part of this article.

The results show that before the experiment the amount of LPW separately collected in the area was with 2.7 [kg/capita/yr] much lower than the average amount which was achieved in the city of 6.0 [kg/capita/yr]. Even though the amount of LPW collected increased in the experiment to 4.7 [kg/capita/yr], the value was still below the average value of the city. With respect to the composition of the LPW collected, the results show that there was little change of the content of LPW promoted for separate collection throughout the experiment if compared to the previous state. However, with 65-67%, the share of promoted LPW in the area was 6-8% below the average content in the LPW collected in the city. The share of extraneous materials in the LPW containers increased from 9% before the experiment started to 16% in the end of the experiment. This latter value, however, is comparable to the average extraneous material content that can averagely be found in the city. The difference between LPW promoted for separate collection and extraneous materials are wastes not promoted, but from a similar material than the promoted fraction. The share of this fraction, which is slightly higher than the average value in the city, did not change a lot during the experiment in the area.

Based on the results, it can be concluded that the amount of LPW separately collected can be increased by shifting to a door-to-door collection, while the quality in terms of composition did not aggravate significantly. However, the amount of LPW separately collected is still too low to achieve the circular economy recycling targets, suggesting that other measures than solely extending the separate collection are required as well

Refine the circular economy by rethinking it - a holistic approach for the advanced circular economy

M. Nippraschk¹, P. Wallat², S. Lawrenz³, D. Goldmann¹, C. Minke¹ & A. Lohrengel²

¹⁾ TU Clausthal, Institute of Mineral and Waste Processing, Recycling and Circular Economy Systems, Clausthal, Germany

²⁾ TU Clausthal, Institute of Mechanical Engineering, Clausthal, Germany

³⁾ TU Clausthal, Center for Digital Technologies, Goslar, Germany

The Circular Economy is a recent economic approach aiming to transform the linear economy into a sustainable system including the economic, ecological, and social dimensions. The transformation faces various barriers and obstacles, each in a different field inside the value system. Three different (sub-system) approaches were developed independently to address those hurdles and provide solutions to mitigate them. *Design for an Advance Circular Economy (DfACE)* addresses influences from economics and technical restrictions. The *Data and Information Marketplace* will be a legal framework for exchanging data, transforming it into information, and providing knowledge to the different fields and stakeholders. *An Information Flow and Management System* based on the System Dynamics approach will be able to make predictions for the CE operations based on data and information implemented into the advanced circular economy. The paper will briefly describe those approaches, including their strengths and weaknesses. Out of each of the three individual sub-systems, these sub-systems are combined in a holistic approach and presented as the *Advanced Circular Economy*.

The necessary Interfaces between these three sub-systems are described as well as two different flows: The *Physical-Material-Flow* and the *Data-Information-Flow*. Those flows are necessary to further define the interfaces, including their importance for the sub-systems and their corresponding stakeholders. The information is defined into two types: static information and dynamic information – each generated by different stakeholders and is essential for others. The system is developed on a meta-level. Nevertheless, a very crucial example, namely traction batteries for electric vehicles, will be given to show the relevance of the system within the current economic surroundings and explain the overall system of the ACE.

Consumer influenced qualities of multi-component lightweight packaging in municipal solid waste

L. Gritsch¹, M. Merstallinger², D. Schuch³ & J. Lederer¹

¹⁾ TU Wien, CD Laboratory for a recycling-based Circular Economy, Vienna, Austria

²⁾ Technisches Büro Merstallinger, Korneuburg, Austria

³⁾ Altstoff Recycling Austria AG; Vienna, Austria

Achieving the recycling targets of municipal solid waste and particularly light weight packaging waste, like plastic and composite packaging, set in the EU Circular Economy Package, requires comprehensive measures of all parties involved, so packaging producers, consumers as well as waste processors. For that it is necessary not only to enhance the separate collection of light-weight packaging waste, but also to provide material with an appropriate quality for recycling, regarding share of unwanted materials, moisture and dirt content or the recyclability of the packaging itself. Therefore, it is essential to produce recyclable packagings, that can be separated easily, if necessary, before disposal and also to motivate consumers to do so. Hence, the realization of an efficient design for recycling is not only a technical issue but also communicative challenging.

As a first step towards an evaluation of this issue, the present work investigated, the quality of theoretically dismantable and therefore good recyclable multi-component lightweight packagings (MC-LWP), consisting of a thin walled plastic cup with a cardboard wrap and an aluminum foil, in municipal solid waste. Results should allow conclusions regarding consumers behaviour when disposing of such packagings. Data for the present assessment has been collected in the course of a large-scale trial for the separate collection of light weight packagings, that was conducted in a densely populated residential area in an Austrian city. Sampling of the residual waste and the separate collected lightweight packaging waste was performed at three different points in time (05/21, 10/21, 04/22).

Results show, that MC-LWP found in residual waste consist of about 35% plastic, 34% cardboard and 2% aluminum on average, whereas the respective packagings found in the separate collection consist of about 65% plastic, only 21% cardboard and 1% aluminum on average. The moisture and dirt content of the MC-LWP in the residual waste is with about 29% more than two times higher than the moisture and dirt content of the MC-LWP in the separate collection with only about 13% moisture and dirt content. Furthermore results show, that only an average of 2% of the MC-LWP found in the residual waste and 56% of the MC-LWP found in the separate collection for lightweight packaging waste has been dismantled before disposal. It seems as if packagings consisting of a combination of different materials like the MC-LWP impede a clear assignment to the respective collection system by the consumers, and therefore are challenging for the separate collection system. As a consequence, a large part of the raw materials used are lost for a further mechanical recycling. The real dismantling behavior should be considered, when eco modulation of packagings is implemented to provide financial incentives for good recyclable packaging solutions. Also, instructions for disposal could be communicated more emphatically to provide support for the consumers.

Resource conservation through waste avoidance, reuse and material recycling

H.-J. Dornbusch¹

¹⁾ INFA – Institut für Abfall, Abwasser und Infrastruktur-Management GmbH, managing director, Ahlen, Germany

The transformation of our previously linear economy into a circular economy, in which the value of products and the raw materials they contain is retained as optimally as possible at the end of their use phase and in which as little waste as possible is generated, is increasingly regarded as a key strategy for climate and resource protection.

In view of these developments, the concept of the circular economy is attracting growing interest from politicians, industry and civil society. However, current studies show that this transformation is still in its infancy and that the demand for raw materials is only met to a limited extent by secondary raw materials. For ecological and economic reasons, but also for social reasons, it is important to minimize the waste of natural resources.

Cities and municipalities in particular are now increasingly emerging as leaders in comprehensive concepts for reducing waste volumes and protecting the climate and natural resources. In addition to the ongoing optimization and expansion of separate collection systems for the various recyclable materials, many cities are currently developing or implementing re-use strategies and zero-waste concepts.

It is especially these current activities, in conjunction with the existing extensive structures for separate collection, that can make an important contribution to sustainable and future-oriented waste management.

A novel approach to environmental cleanup of inland water courses

N. Rubini¹, S. Carniello² & C. Di Noi³

¹) Mold S.r.L., Business Development, Cassola, Italy

²) metinsi, consulting services for sustainable technologies, Graz, Austria

³) GreenDelta GmbH, Sustainability Consulting, Berlin, Germany

Despite growing awareness and improving practices, about one third of the worlds waste production is ill-disposed. As a consequence, about 2 million tons of plastic waste end up in inland water every year, and from there into the sea, with catastrophic impact on the ecosystem at environmental, economic and social level. Waterways are now considered as plastic litter reservoirs due to the morphological structure of riverbeds, vegetation, and hydrological conditions. Smaller basins appear particularly relevant as plastic reservoirs. Detecting and retrieving this waste when still in rivers is an effective and efficient way to prevent these damages and remediate the environment before the damage spreads over large areas. This study aims at linking the environmental impact of technological solutions with business decisions that will determine commercial scalability, to focus the business development efforts on regions with the highest potential impact. The River Cleaning system developed by Mold s.r.l. is a novel technology able to collect floating waste from water streams, without interfering with navigation and the natural ecosystem. Three case studies with different size and in different contexts have been defined, representing diverse environmental and economic contexts in Europe and Asia. For all chosen locations, the quantity and composition of floating plastic waste is available from literature or from direct observations. The LCA studies provide insightful information for business development decision making processes as they show the best balance between the resources employed in the barriers and the advantages provided by the recycling of captured material. However, it should not be the only factor considered, both because of the inherent limits of LCA (the impact of collecting macroplastics itself is not considered) and because cleanup decisions should consider non-market benefits and carefully coordinate with existing policies. It is important to note that LCA-negative locations should not exclude high-performance macroplastic retention systems: similarly to the Magra case study, the most relevant drivers may be the safeguard of protected areas or the empowerment of social groups.

Comparison and evaluation of different sampling methods for the investigation of microplastics in rivers.

G. Obersteiner¹, S. Lenz¹ & J. Mayerhofer¹

¹) University of Natural Resources and Life Sciences, Institute of Waste Management, Vienna, Austria

Rivers are considered the main input pathway for marine pollution, and more and more microplastic particles (<5 mm) are polluting our environment. Estimates show that so-called primary microplastics (tire abrasion, additives to cosmetic products, fibers of synthetic textiles) account for between 15 and 31% of the microplastics in the oceans. However, a much larger proportion (69 – 81%) is attributed to particles produced by the decomposition of larger plastic objects such as plastic bags or plastic bottles. Despite quite a few studies and different estimates on the occurrence of microplastics in rivers, such analyses are still a young research field with many challenges. One of the main difficulties lies in a reliable representative and thus comparable sampling. Standardized sampling of microplastics in a river system requires consideration of several factors, including hydrological conditions of the water body (e.g., water density, wind, currents, waves) but also temporal and geographic factors determined by river morphology and the meteorological situation. Most research on microplastics focuses on the amount and composition of microplastics, but the complexity of microplastics and the lack of harmonization of sampling methods make it difficult to compare different studies. A standard method for sampling microplastics in rivers is still lacking.

However, the assessment of potential hazards from microplastics requires rapid, reliable and at least representative sampling, sample preparation and detection methods that are eventually harmonized. Only then is it possible to compare results and discuss avoidance strategies or regulatory measures to reduce the unintentional input of plastics into the environment. Therefore, within the Tid(y)Up project, three different sampling methods for microplastics in rivers were tested in parallel for the first time and the results were compared for eight different sampling sites (in Austria, Hungary, Serbia, Romania and Bulgaria) along the Danube and Tisza rivers. A further developed net method was used, which takes into account the depth variance and spatial distribution over the transverse profile, the so-called cascade pumping method (higher resolution for small particle sizes) and a sedimentation box (temporal component by measurement over 2 weeks). The focus of these measurements was on the practicability of these established measurement methods in terms of implementation, ease of use, susceptibility to errors, personnel requirements, etc., depending on the fluvial framework conditions as well as the subsequent sample preparation requirements.

The Loose Product Shelf and the Customers' View of Avoiding Packaging Waste in Supermarkets

U. Gelbmann¹, J. Edlinger¹ & Ch. Holzer²

¹) University of Graz, Institute of Systems Sciences, Innovation and Sustainability Research - SIS, Graz, Austria

²) SPAR Österreichische WarenhandelsAG, Headquarter Graz for Styria and Southern Burgenland, Graz, Austria

Sales packaging in supermarkets serves various purposes, including preventing food waste by extending shelf life. However, sales packaging from supermarkets also causes a considerable amount of waste. The reduction of this waste through packaging-free shopping and the purchase of goods in reusable packaging is the focus of the project 1, 2, 3 - Verpackungsfrei (Packaging-Free), carried out by the University of Graz, SPAR Styria and the Austrian Institute of Ecology.

The main content of 1, 2, 3 is the development and introduction of a "loose product shelf". This shelf consists of dispensers (so-called bins) from which customers can take goods without touching them, and scoops from which goods can be taken with the help of a shovel. The goods sold are either organic or locally grown, or both. Customers either put the loose goods into paper bags provided in situ (which is actually contradictory to packaging-free shopping) or preferably into containers brought by the customers, which can be balanced before packing.

The system has so far been introduced in seven test markets in Styria and was continuously evaluated and further developed within the framework of 1, 2, 3. Intensive accompanying research examines the motives, concerns, and wishes of customers as well as the attitudes and opinions of employees and suppliers.

Our results show that consumers are increasingly interested in sustainable shopping and, in this context, in low-packaging shopping. Some of the offers in this direction, such as the refillable milk bottle, are well adopted, and there is also an increase in unpackaged purchases of fruit and vegetables. Expert opinions and statistical data show that Corona has slowed down this development since pre-packed goods are perceived as more hygienic.

This is probably also true for the loose product shelf for non-perishable food, whose sales in the test period unfortunately did not quite meet the expectations. In general, however, several conclusions can be drawn from project 1, 2, 3 for further action regarding packaging reduction:

People are willing to engage in packaging-reduced shopping, but this requires a longer learning process, both within the environmentally conscious shopper's segment (e.g., "do not forget or learn to bring your own containers"), and increasingly in the segment that is not yet sensitized. Here, we hope for public authorities to provide information and sensitization campaigns and for food retailers to keep up stamina about the range of products offered. In this regard, they should not only offer premium and organic products in their loose product shelves, but also less expensive products that motivate those (not yet) sensitized to buy them.

Resource efficiency of the recovery of indium with chlorine-containing waste on the project "chlorine platform"

M. Peer^{1,2}, M. Bär¹, B. Berninger¹, M. Mocker¹ & W. Kunz³

¹⁾ University of Applied Sciences Amberg-Weiden, Amberg, Germany

²⁾ Fraunhofer UMSICHT, Department Recycling Management, Sulzbach-Rosenberg, Germany

³⁾ University of Regensburg, Institute of Physical and Theoretical Chemistry, Regensburg, Germany

Design and methods of indices and measurement tools for the assessment of resource efficiency can vary as strong as ways for an improved resource efficiency are used in companies. However, in order to publish recommendations for political and business decision processes, comparability of such assessment methods is necessary. In the project NetCYCLE II, the authors are developing a novel method, which on the one hand is utilisable in life cycle assessments (LCA) and on the other hand compromises all aspects of resource depletion in a holistic approach at once. For this purpose, a data base of geological parameters as basement for resource depletion assessment was updated as well as its corresponding equivalent unit was changed to kg iron-equivalent per unit or service. Furthermore, geological parameters as resources availabilities were expanded by anthropogenic stocks and dissipative losses of each non-biotic element. Following the holistic approach, socio economic aspects were considered parallel to geological ones. This is planned for the project "Chlor-Plattform". PVC-containing waste is used to recover critical metals like indium from other waste streams. With the presented technique, an ecological recycling of critical metals is possible. In a first step, PVC-containing plastic waste is thermo-chemically treated in a first reactor to form vapor, rich in HCl. In a second step, this vapor passes a second reactor, which is filled with critical metal containing material like LCD panels. Under these circumstances, metal chlorides are formed and evaporate. In a following condenser, the metal chlorides are condensed and a metal-rich concentrate was generated. This is mixed with water and filtered. The filtrate is then distilled and the indium remains in the distillation bottom. Here it can be recovered by electrolysis. This whole process is evaluated for the global warming potential in an early stadium.

Legal implementation of the waste hierarchy

T. Katalan¹ & M.S. Reitingner¹

¹⁾ E+H Rechtsanwälte GmbH, Public Law Practice Group, Graz/Vienna/Klagenfurt, Austria

In the context of waste hierarchy, numerous regulations are in force and finding the applicable ones can be difficult for several reasons. First, not only national law but also European law requirements might be relevant. One example is the Waste Framework Directive, which specifies the order of priority for national measures. According to the Directive, the following waste hierarchy applies: (1) prevention; (2) preparation for re-use; (3) recycling; (4) other recovery, e.g. energy recovery; and (5) disposal.

Moreover, when it comes to the national legal framework, both federal and state laws must be considered: The "Abfallwirtschaftsgesetz" (AWG; eng: Waste Management Act) constitutes the most important law at the federal level. However, state laws also exist, for example, when it comes to the organization of waste collection.

In addition, there is a Federal Waste Management Plan, which implements the objectives and principles of the AWG. With regard to this Plan, one might also have to apply the "BVT-Merkblätter" and "BVT-Merkblätter". BVT stands for best available techniques and the codes and conclusions describe the techniques used in industrial activities and explain the occurring emissions as well as possible emission reduction measures. The multilevel regulations often lead to difficulties in practice and make clear guidance necessary.

Pack2theLoop – Closing the circle of polyolefin and polystyrene packaging

N. Kremp1¹ & T. Lucyshyn¹

¹) Montanuniversitaet Leoben, Chair of Polymer Processing, Leoben, Austria

The current gap between high amounts of plastic packaging waste in Austria and the comparatively low recycling rate, which is about 26 % since 15 years and needs to be increased to 50 % by 2025, leads to the requirement of new strategies in plastics recycling and waste reduction. Especially the integration of recyclates into the production of new equivalent products, which is still a major challenge, represents a promising approach.

For this purpose, the cross-industry cooperation project **Pack2theLoop** aims to recycle single-use plastic packaging composed of polyolefins and polystyrene with the focus on the development of quality-assured recyclates from post-consumer packaging which are then applied in the production of new packaging, closing the value-added loop. This concept will be demonstrated with two use cases, which encompass **(a)** the blow moulding of bottles made of polypropylene or high-density polyethylene and **(b)** the thermoforming of cups made of polystyrene or polypropylene.

The 5 comprised project innovation goals are:

(1) A definition of the requirements for packaging in the form of design4recycling, which sets the requirements for the material, a circular packaging design, and related optimisation of existing waste management structures as well as design from recycling. The food law requirements for packaging are also taken into account in the form of a risk assessment.

(2) An end-of-life approach to plastic packaging waste in Austria will be carried out by simulating the potential composition of sorting samples. Based on manual sorting, scenario analyses will be used to examine the required sorting depths and qualities of polyolefin and polystyrene packaging waste for effective recycling and a potential food contact approval.

(3) The improvement of the recyclability of packaging products will build the basic prerequisite for mechanical recycling. This includes characterisation techniques for the quality assessment of recycled plastics and the derivation of quality standards.

(4) On the basis of use case **b**, a safety assessment of recyclates in the food context is carried out. The conditions in the individual process steps (collection, sorting, washing, recycling, and production) are worked out. These provide detailed results regarding the quality criteria to be fulfilled in the future under food law.

(5) Finally, the processability of recyclates is investigated, including the definition of material parameters, the use of online quality control in the process step, and the development of a catalogue of measures for the material groups of the two use cases.

At the end of the project, a handbook summarising scientifically founded basic knowledge about (a) qualitative processing of post-consumer recycled materials and (b) the establishment of a "design for/from recycling" for sustainable and recyclable packaging, will be provided to the plastics industry. This handbook considers the goals of the European Union regarding plastic packaging recycling in the short term and will contribute to the UN sustainable development goals in the long term. From an environmental perspective, Pack2theLoop will contribute to the determination of an optimal recycling rate for hollow body packaging. The recycling of this packaging will maximise the benefits for different environmental aspects. The fact- and method-based approach will help to further objectify the social and political discussion on recycling quotas and provide a scientifically documented strategy for packaging recycling to the industry.

Characterisations of Material Streams Containing Valuables from a Waste Sorting Plant in Austria

A.-M. Lipp^{1,2}, D. Blasenbauer^{1,2} & J. Lederer^{1,2}

¹⁾ Christian Doppler Laboratory for a Recycling-based Circular Economy, Vienna University of Technology (TU Wien), Vienna, Austria

²⁾ Institute of Chemical, Environmental and Bioscience Engineering, Vienna University of Technology (TU Wien), Vienna, Austria

The EU Circular Economy Package sets new standards for waste management, particularly regarding ambitious recycling target rates for plastic packaging waste. As of today, most member states rank below the 2025 target rate, Austria included. To achieve these challenging targets, new and innovative technologies need to be investigated, developed and used. One of these options is the recovery of valuable materials from mixed municipal waste by upgrading existing mechanical waste treatment (MT) plants. A fundamental prerequisite for this is the precise characterisation of the outputs and material flows of existing MTs. Therefore, a sampling campaign over the duration of a year in an Austrian MT has been conducted, and all considerations focus on seasonal analyses in regular operation. The plant has an annual capacity of about 80,000 tonnes from a catchment area of almost 400,000 inhabitants and processes mixed municipal waste combined with bulky waste. The processing steps include shredding, screening, removal of impurities, metal and ballistic separation and baling. Currently, all outputs besides metals are being transferred to thermal valorisation. Sampling was carried out from the falling material stream at the respective discharge conveyor. All samples were then hand-sorted on a 50 mm screen. In total, 13 fractions were distinguished in the first level, including plastics and non-plastic fractions. In the second level, plastic films were differentiated according to material, surface (imprint) and colour. Plastic packaging and rigid plastics were divided into resins. The valuable material content of the outputs was close to 50%, with considerable potential for plastics and paper. 25% of the 3D fraction is present as rigid mono-material plastics, especially polypropylene and polyethylenetherphthalate. Paper and cardboard represent around 26% of the 2D fraction, and plastic film about 8%. Metals and glass only occur in very small quantities, which indicates firstly a good separation performance of the metal separation and secondly the well-established separate collection system for both materials. The potential contribution of the investigated plant to the recycling rates was estimated in the lower percentage range. By characterising the valuable outputs of a mechanical waste treatment plant, it was possible to identify the potential for recovery of recyclables. Since there are other MTs for mixed municipal waste within Austria, the aggregate increase can bring about more significant growth. Not only for the achievement of recycling rates, but more generally for the development towards a circular economy, it is necessary to exploit all technological possibilities and take smaller material flows into account.

Determination of microplastics in the Danube River

S. Lenz¹, J. Mayerhofer¹ & G. Obersteiner¹

¹) University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Department of Water-Atmosphere-Environment, Institute of Waste Management, Vienna, Austria

Plastic waste that enters the environment hardly biodegrades, but instead breaks down into smaller and smaller plastic particles and accumulates there. Once microplastic particles are in flowing waters, they are either deposited in the sediment (riverbed, riverbank) or drift with the water downstream to the sea. Scientists are increasingly concerned with microplastic pollution in rivers. Nevertheless, valid data on the extent of pollution are inadequate. A comparison of the existing study results is often not possible because no standardized methods for sampling, processing and detection of microplastics exist so far.

The aim of the project Tid(y)Up is to determine the plastic load by means of standardized methods, to enable future monitoring and to provide an overview of the pollution situation along the Danube, from Vienna to the Black Sea. For this purpose, different microplastic sampling methods are compared along the Danube and Tisza and tested under different boundary conditions. A further developed net method (consideration of depth variance and spatial distribution over the transverse profile), the so-called cascade pumping method (higher resolution with small particle sizes) and the sedimentation box (temporal component by measurement over 2 weeks) were used in parallel. Sampling as well as preparation and analysis method have a great influence on the quality and significance of the results. Especially the isolation of microplastic particles from the sample matrix of environmental samples before detection is very complex and currently insufficiently researched. In river samples, comparatively few microplastic particles are found in a heterogeneous and complex matrix of organic and inorganic bycatch of different particle sizes, which are separated and analyzed by different processing steps such as sieving, density separation, Fenton reaction or enzymation. While mainly organic contaminants (leaf debris, stems, biota, etc.) have to be removed from net samples, it is inorganic sediments (sands and clays) in the sedimentation box sample. Based on net samples but also sedimentation box samples from the Danube, protocols for the processing and analysis of microplastic samples from rivers will be developed within the Tid(y)Up project, considering quality assurance and control. Samples along the Danube and Tisza will be investigated to assess the pollution situation along the Danube to the Black Sea and to compare the quality of different sampling methods. Results of different sampling methods as well as varying load situations within the water column (depth variance) are compared. A practicable preparation and analysis protocol for reproducible comparable results will be provided.

Acknowledgement

Tid(y)Up is co-funded by the EU under the Danube Transnational Programme of the ERDF and supported by the Federal Ministry for Climate Protection, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology (BMK), the Federal Ministry of Agriculture, Regions and Tourism (BMLRT) and by viadonau as associated partners.

On the road to 2050: The path to achieving a circular economy for mobility and renewable energy

M.T. Kügerl¹, J. Betz² & S. Degreif²

¹) Montanuniversität Leoben, Chair for Mining Engineering and Mineral Economics, Leoben, Austria

²) Oeko Institut, Division Resources & Transport, Darmstadt, Germany

Climate change is the biggest crisis humanity is facing at this time. Two of the largest emitters of greenhouse gases are mobility and the energy sector. For this reason, a major shift from a fossil fuel-based to a renewable energy-based economy is taking place, but it comes with its own challenges, in particular a partly increased resource intensity.

To address the social and environmental challenges associated with this shift towards a carbon neutral mobility and a renewable energy sector, the Horizon 2020 project RE-SOURCING aims at developing responsible sourcing practices along the entire mineral value chain. The project does this through roadmaps for the individual sectors, providing guidance on clearly stated targets that need to be achieved in the timeframe up to 2050, as well as defining the paths that can lead to achievement of these targets, by stakeholder groups.

The focus in the mobility sector is on the lithium-ion battery (LIB), as this technology will be crucial for the transition to a carbon-neutral future. The renewable energy sector focuses on wind turbines and solar photovoltaic (PV) panels. A special focus in both sectors is placed on the circular economy and recycling. To achieve a lower carbon and resource footprint and to manage the emerging waste streams from these technologies, recycling and an increased resource efficiency are crucial. However, each sector is dealing with a set of challenges hindering the successful implementation of circular economy targets by the European Union.

Mobility: The electric battery itself is very expensive to produce, but the materials themselves are often not valuable enough to offset the cost of recycling. Topics such as transport, the different cell chemistries and their impact on the safety and recyclability of LIBs add to the obstacles for a circular economy in the mobility sector.

Renewable Energy: While both wind turbines and solar PV panels generally show a high recyclability, low waste streams currently hinder the implementation of appropriate collection and treatment systems. Additionally, regulation can have a negative effect on companies' recycling efforts, as the technologies at their end of life are classified as waste, making import and export difficult in many countries.

The roadmaps are based on a multi-stakeholder consultation process, including an analysis of the current state of play and the presentation of examples of best practice. The path to achieving the targets will be outlined with ambitious but realistic milestones and recommendations for industry, policy makers and civil society. Policy options such as mandatory collection targets, material-specific recycling efficiencies and quotas for the recycling share are debated, which are also part of the new Battery Regulation proposed by the European Commission at the end of last year.

Experimental Methods to Assess the Thermal Stability of Reactive Chemical Waste stored in Large Waste Tanks

R. Obermüller^{1*}, G. Schoppel¹ & M. Prochaska¹

¹⁾ Thermo Fisher Scientific, Linz, Austria

The storage of a reactive chemical waste in large storage tanks can lead to a thermal explosion, as was the case recently in July 2021 at Currenta in Leverkusen-Bürrig (Germany). In addition to considerable property damage, 7 people were killed and 31 injured. Therefore, the thermal risk for the storage of reactive waste must be assessed in advance and appropriate risk-minimizing measures must be taken.

First, so-called desktop methods are applied to obtain a quick overview for possible thermal hazards that may arise during uncontrolled mixing and storage of reactive substances. These methods are based on theoretical considerations in combination with chemical expertise and require only information about the chemical composition of the different waste streams. However, they do not replace experimental testing in the safety laboratory.

The data for a systematic risk assessment can be determined easily by applying experimental methods, which are already used for the thermal process safety of chemical manufacturing processes. The method of choice for the determination of the heat release caused by mixing of different (reactive) material streams is the Reaction Calorimetry (RC1). The thermal stability of reactive wastes can be determined using Differential Scanning Calorimetry (DSC). Accelerating Rate Calorimetry (ARC) and testing in the Vent Sizing Package 2 (VSP2) is required if the pressure build-up in case of a thermal runaway reaction must be known. Assessment criteria for the recorded data are those which are used for the evaluation of the thermal risk of a chemical manufacturing process.

What is the most critical safety issue in combination with this large waste tanks?

Storage tanks of this size are considered adiabatic and can no longer dissipate even the smallest amounts of heat via the jacket. As a result, the tank content heats up, which can lead to a self-accelerating reaction (runaway reaction).

A decision tree will be presented, which allows a comprehensive and economic assessment of heat confinement situations at industrial scale. For these considerations, however, additional measurements are required using the Thermal Activity Monitor (TAM), a highly sensitive calorimeter that can determine the heat output of exothermic decomposition reactions very accurately even at room temperature.

Treatment concept and cost estimation for the mechanical separation of photovoltaic modules

H.M. Menapace¹, B. Schmuck¹, G. Schneeberger¹, A. Brugger¹ & P. Seppel¹

¹⁾ Peter Seppel Gesellschaft m.b.H., Feistritz/Drau, Austria

Although the amount of currently generated waste of PV panels is low (nowadays approx. 0.02 w.% of collected on waste electrical and electronic equipment), waste prognosis models show a strong increase in the amount of waste PV panels in the next few years.

There are still no treatment and recycling concepts for a larger volume of these modules in waste management. Within the scope of this contribution, a possible procedure for the takeover, manual pre-treatment and mechanical separation of crystalline PV panels is described.

The basis for concept is formed by disassembly tests, which were carried out as part of a multi-year research project. An attempt is made to make a monetary assessment of this process concept based on the mechanical separation effort and taking into account the achieved qualities of the output fractions aluminium, glass and a mixed fraction of plastic and circuit board residues, and recycling options are highlighted.

When considering the development of a treatment process for crystalline PV modules a waste water free treatment was defined as a requirement. On the one hand, this should facilitate the integration into an existing infrastructure of a waste collector and treatment facility (plant technology, personnel) and at the same time also have a positive effect on emissions from the treatment process (e.g. the elimination of aggressive chemicals such as acids and/or solvent for compound separation).

To estimate the time and money required to separate the assembly, time recordings were used for manual dismantling (removal of aluminium frames and connection boxes). In a next step, milling tests were made with lab scale PV modules to separate a mixed fraction of backsheet and encapsulant with cell and ribbon material from the front glass.

Based on the costs for treatment equipment (CNC milling machine, chip extraction system, tools), personnel and possible revenues from the separated fractions (e.g. aluminium, glass) a cost-benefit-analysis was made.

Stop Littering - Situation analysis of littering waste in the INTERREG V-A Austria-Czech Republic assisted area and development of recommendations for action to reduce littering waste as an important contribution to circular economy

P. Hietler¹ & C. Pladerer¹

¹⁾ pulswerk GmbH, Resource Management, Vienna, Austria

Littering means the careless leaving and discarding of waste (packaging, newspapers, cigarette butts, etc.) at their place of origin in public space, without using the free disposal facilities provided for this purpose (public waste bins). The term littering comes from English: "Litter" means remains or waste, "to litter" means throw away, scatter. It is clearly different from the illegal disposal of household waste or bulky waste, as this waste is generated in the household and is only later transported to the public space and deposited there. Typical littering waste goes hand in hand with very short-lived consumer goods or with take-away products. These are consumed (usually on the road) and the remaining packaging or cigarette butts are thrown away on the spot or from the vehicle. Of course, the littering of nature happens not only through careless discarding and leaving waste lying around, but also through intended waste deposits. This waste is also collected in the course of corridor cleaning campaigns. The aim of the present study is to determine the composition and quantity of the waste collected or emptied from the corridor cleaning campaigns in Upper Austria. In the course of the land consolidation campaigns in Upper Austria in 2021, four rural and urban communities from two districts in Upper Austria were analyzed. The accuracy at the federal state level should be a maximum of $\pm 2.5\%$ with a safety of 95 % on the leading fraction of beverage packaging.

The overall results of the analysis of the land consolidation campaigns in Upper Austria in 2021 show:

- Beverage packaging (GVP) with approx. 26.7 % by mass ($\pm 2.1\%$) and with approx. 37.3 % by volume ($\pm 2.3\%$)
- Other waste (residual waste) with approx. 22.9% by mass ($\pm 2.0\%$) and 10.4% by volume ($\pm 1.4\%$),
- Plastic Non-packaging (such as agricultural films or toys) with approx. 10.6% by mass ($\pm 1.4\%$) and 17.6% by volume ($\pm 1.8\%$)
- Other lightweight packaging (LVP, such as plastic packaging or plastic carrier bags) with approx. 5.6% by mass ($\pm 1.1\%$) and approx. 13.8% by volume ($\pm 1.6\%$).

The fractions of the typical littering waste were counted in addition to the weighing and the volume estimation (e.g. via the filling degree of the standardized waste containers), since the discarded quantities in littering are often more meaningful than the mass and volume. It is quite clear that cigarette butts are by far the most thrown into nature or public space after each piece with approx. 48.8% ($\pm 2.3\%$), followed by beverage packaging with approx. 17.7% ($\pm 1.8\%$) and other lightweight packaging (LVP) with approx. 15.3% ($\pm 1.7\%$). In the case of beverage packaging, disposable glass bottles are the most frequently emptied with approx. 13.3 % ($\pm 1.6\%$), followed by beverage cans with 4.5 % ($\pm 1.0\%$) and PET bottles with approx. 4.3 % ($\pm 0.9\%$). When looking at the fluttered volume per beverage packaging, the PET bottle is in first place with approx. 17.6% by volume ($\pm 1.8\%$), followed by beverage cans with approx. 13.3% by volume ($\pm 1.6\%$). The results according to the leased quantities show that the beverage can with approx. 9.6 piece% ($\pm 1.4\%$) and the PET bottle with approx. 5.0 pieces ($\pm 1.0\%$) have the largest share of the emptied beverage packaging.

Circular Economy Concepts in European Cities

M. Samhaber¹ & W. Hauer²

¹⁾ wpa Beratende Ingenieure GmbH, Vienna, Austria

²⁾ Technisches Büro HAUER Umweltwirtschaft GmbH, Korneuburg, Austria

The European Union's circular economy package will necessitate considerable changes in the collection and treatment of municipal waste. Depending on the settlement structure, different requirements will arise. The present study, commissioned by the City of Vienna, serves to exchange experiences and to collect successful measures and strategies in diverse urban structures.

In the 26 cities considered, measures to avoid landfilling of untreated waste have largely been implemented. In order to achieve recycling rates, the focus is largely on reducing the biogenic content of residual waste. The biogenic fraction is usually in the range of one third of the mixed municipal waste and thus represents by far the largest potential for separate collection and recycling.

While most cities aim to intensify the separate collection of paper, metals, light packaging and biogenic waste, the city of Amsterdam considers the achievement of sufficiently high collection rates unrealistic and failed despite intensive efforts. It has changed tack, discontinuing the separate collection of plastic packaging and metals and relying on sorting from mixed municipal waste (residual waste).

For plastic and metal beverage packaging, the focus is basically on deposit systems and take-back by retailers.

Of particular importance among biogenic waste is the moist kitchen waste produced in every household. In Milan, in particular, measures have been taken for the separate collection of kitchen waste from the property. The waste is collected once or twice a week in small containers. The collection is supported by the distribution of pre-collection bags.

In addition to the regional measures, more and more European cities are participating in transnational networks or movements dedicated to the circular economy. Becoming a "C-40 City" or "Zero Waste City" means, on the one hand, setting certain targets or fulfilling conditions and, on the other hand, actively launching projects and exchanging ideas with other cities.

From Linear Waste Management to the Circular Economy in Brazil

C. Buchenberger¹, K. Schmidt¹ & T.S. Spengler¹

¹) Technische Universität Braunschweig, Institute of Automotive Management and Industrial Production, Chair of Production and Logistics, Braunschweig, Germany

The increasing amount of municipal waste is a major challenge worldwide. The World Bank (Kaza et al. 2018) forecasts an increase in waste volumes of around 50% by 2050 for the group of "upper middle income countries" (which include Brazil, China, Russia, among others), as well as a similar increase in GHG emissions from the waste sector (Kaza et al. 2018). In Brazil, the waste sector is the fifth largest greenhouse gas (GHG) emitter after energy, land use change, agriculture, and industry (SEEG 2018) and showed high growth rates of around 23% between the years 2010 and 2020 (ABRELPE 2021). The National Waste Policy (Política Nacional de Resíduos Sólidos, PNRS) was adopted in 2010 (Presidência da República 2010) and stated as one of its goals ending improper landfilling by 2014. However, still today, about 40% of the municipal solid waste waste is currently disposed of in open and covered dumps (ABRELPE 2021).

In early 2022, the legal framework for sustainable waste management in Brazil was tightened through the publication of the PLANARES (Plano Nacional de Resíduos Sólidos, National Solid Waste Plan). This implementation plan supplements the national waste policy with concrete, ambitious recycling quotas. The plan calls for 20% of recyclables and 13.5% of organic waste to be recycled by 2040 (Ministério do Meio Ambiente 2022). By comparison, recycling rates currently range from 2 to 5 %, depending on the source (Ministério do Meio Ambiente 2022), (ABRELPE 2021). This results in a great need for action on the part of the municipalities which are responsible for waste disposal.

Motivated by the stricter legal requirements, sustainable waste management concepts at the regional level represent a solution approach on the way to the circular economy. Regional sustainable waste management concepts are understood as a combination of technical processes of waste treatment that are adapted to the respective framework conditions in the implementation area, i.e., to local waste flows and demand for secondary products (Bilitewski & Härdtle 2013). By emphasizing the demand for secondary products, a future recycling of materials in the sense of a circular economy is made possible.

In order to plan and develop such regional, sustainable waste management concepts, it is crucial to have a comprehensive understanding of both the stakeholders involved and the barriers that exist. This article presents the most important stakeholders and barriers but emphasizes that each region is different and must be considered specifically. To overcome the presented barriers and to reach the ambitious recycling goals, the article focuses on technical concepts, i.e., different combinations of technologies, adapted to the specific local conditions and demand. For the planning of technical concepts, three measures are being discussed which play a decisive role for the success of waste recycling: i) The degree of mechanization & modular structure; ii) Locations; and iii) Dynamic development. Deciding on the optimal waste management concept is a complex task. To take advantageous decisions in terms of sustainability, decision-makers are to be supported in further research, with the help of quantitative methods. This gives decision-makers an overview of the consequences of certain measures and enables them to make informed decisions.

Reaching CO₂ neutrality in the Austrian cement industry by 2050

C. Bauer¹, C. Dankl¹, R. Friedle¹, F. Papsch¹ & S. Spaun¹

¹⁾ Association of the Austrian Cement Industry, Vienna, Austria

The Austrian cement industry has committed itself to contribute to the climate protection targets of the Paris agreement and its respective limitations to the increase of the global warming. With its roadmap, the Austrian cement industry paves the way towards CO₂ neutrality by 2050 along the value chain of cement in Austria. In order to reach this target, a wide range of measures is necessary. Especially the cement industry faces a huge challenge due the fact the 2/3 of the direct emissions from the production of cement clinker arise from the decarbonatization of lime stone. This mineralogical process for the conversion of calcium carbonate (CaCO₃) into calcium oxide (CaO) with the release of carbon dioxide (CO₂) takes place via the following chemical formula:



The Austrian cement industry undertakes joint efforts to reach CO₂ neutrality with a wide spectrum of different measures. This includes a further optimization of the existing production processes, a deep transformation of the product portfolio through the development of new low carbon cement types and the deployment of new breakthrough technologies. The Austrian cement industry is proactively accepting this challenge as one of the hardest to abate sectors. In order to be successful, a reliable framework especially from political and societal side is needed.

Performance of European biogas plants towards methane emissions

V. Wechselberger¹, M. Hrad¹ & M. Huber-Humer¹

¹) University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Department of Water-Atmosphere-Environment, Institute of Waste Management, Vienna, Austria

As flexible renewable energy carrier, biogas and biomethane can play a crucial role in a fossil-fuel-free energy mix, provided that process-related methane (CH₄) emissions are minimized. As there is still a lack of representative emission data, this study aimed to provide CH₄ emission factors (EFs) of various European biogas plants. In total, 36 anaerobic digestion (AD) plants in Austria, Germany, Sweden and Switzerland were investigated (including agricultural, biowaste and wastewater treating facilities). For the first time, harmonized ground-based remote sensing and on-site methods were used to determine CH₄ losses from overall biogas plants as well as from individual emission sources. Depending on the implemented technologies (for substrate receiving and storage, digestate storage, biogas utilization) as well as on the occurrence of unintended leakages, plant average CH₄ losses ranged from 0.4 to 11.3 % of the total CH₄ production. Individual on-site sources released between <0.01 and 5.6%. Both, remote sensing and on-site measurements confirmed the potential for emission reduction through the implementation of low-emission technologies in combination with regular leak detection.

The mechanical short-term and long-term properties of PP recycle blends

J. Hinczica¹, J. Geier¹, U. Kirschnick², C. Holzer³, A. Frank⁴ & G. Pinter⁵

¹⁾ Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, Austria

²⁾ Montanuniversitaet Leoben, Institute of Processing of Composites, Leoben, Austria

³⁾ Montanuniversitaet Leoben, Institute of Polymer Processing, Leoben, Austria

⁴⁾ Staatliche VA-tgm, Kunststoff- und Umwelttechnik, Vienna, Austria

⁵⁾ Montanuniversitaet Leoben, Institute of Polymer Engineering and Science, Leoben, Austria

Recently, the recycling of polymers in particular gained increasing attention in the scientific, industrial and commercial community as well as the wider public. On the one hand, due to the materials economic and technical relevance, and on the other hand to the environmental and social challenges connected with the waste perspective and circular economy of plastic products. Currently, only 13 % of all plastic waste in is processed into recyclates and used in new products, the highest amount of 46 % of the recyclates are used in the building and construction sector. By adding virgin material, the mechanical properties of the recycle can be improved and higher amount of recyclates can be processed into new products. In this work, several virgin polypropylene (PP) materials, which are commonly used in the building and construction sector and recyclates, especially post-consumer recyclates, were compounded with different weight fractions of 10 %, 25 % and 50 % of recyclates. Different virgin grades, which are used in the common processing methods like injections moulding, blow moulding or extrusions process were analysed and compounded. Afterwards, the rheological, mechanical and long-term properties of the different blends were evaluated. The melt flow rate (MFR), which is often used in quality control, was used to determine the rheological properties. The flow behaviour of the pure materials (virgin and recycle) has an influence on the MFR of the blends. For the identification of the mechanical properties, tensile tests and Charpy impact test were performed to determine the strength and the deformation behaviour as well as the impact strength. All mechanical measurements demonstrate the similar trend, as high recycle content yields to a lower mechanical performance. Linear Elastic Fracture Mechanics was used to analyse the slow crack growth (SCG) resistance of the blends. In this case, the for polyethylene and polypropylene established crack round bar test (CRB-Test) was applied. There is a non-linear correlation between the SCG resistance and the recycle content. These applied measurements are able to identify the influence of the recyclates on virgin materials. The determined results indicate that final properties of virgin/recycle PP blends can be assessed by the knowledge of initial material parameters of the single materials. Especially for long-term relevant material properties a highly non-linear dependency of the recycle content must be considered.

Zn Removal from Metallurgical Dusts with sulfur-oxidizing Bacteria

S. Thallner¹, A. Sasiain Conde¹, S.A. Haneschläger¹, L. Birklbauer², S. Spiess¹ & M. Haberbauer¹

¹) K1-MET GmbH, Linz, Austria

²) voestalpine Stahl Linz GmbH, Linz, Austria

Steel production generates metallurgical dusts that cannot be recycled within any given process step in an integrated steel plant due to heavy metal impurities such as zinc (Zn). The Zn concentration in the blast furnace burden is limited, as the low melting point influences the material flow and causes problems.

One sort of metallurgical dusts, the so-called cast house dust, usually contains more than 3 % Zn and over 50 % iron (Fe). For successful internal recycling, it would be beneficial if the iron content in the residue remains as high as possible, as it is needed for the crude iron production. The aim of the project is to use sulfur-oxidizing bacteria to leach Zn from the cast house dust, while the Fe should be kept in the residue, to increase internal recycling rates in the steel industry. At the same time, a high amount of unused sulfur in the residue is undesirable as it increases emissions (such as SO₂ and H₂S) during the sintering process.

Preliminary tests in shake flasks have shown that leaching with *A. ferrooxidans* and reduced sulfur concentrations, 5 and 7.5 g/L instead of 10 g/L, are best suited to achieve the project aim. Two continuous stirred tank reactors, each with a working volume of 3 L, were set up to test the leaching ability with stepwise increased substrate concentrations. After pre-cultivation 10 g/L cast house dust was added. Every two weeks, 2 L of the reactor volume was removed and re-filled with fresh medium, elemental sulfur, and increased dust concentrations. The leaching conditions were as follows: 30 °C, 160 rpm stirring speed and 75 L/h aeration. Bacterial activity, pH and metal concentrations were measured weekly.

Estimation of Recycling Potential of Multilayer Films in Austria

B. Rutrecht¹ & G. Koinig²

¹⁾ K1-MET GmbH, Area Recycling and Raw Materials, Leoben, Austria

²⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Management and Waste Processing, Leoben, Austria

It is impossible to imagine today's society and economy without plastic and plastic packaging. Worldwide, 368 million tons of plastic were produced in 2019, of which 57.9 million tons in Europe. They account for more than a third of all plastic products in Europe and are particularly conspicuous because of their short lifespan and ubiquitous distribution in the environment worldwide. Regulations on the European level already address this issue. Due to limits of physical properties of single material packaging, multilayer films are on the rise. These complex stacked structures of up to nine thin different layers pose a new challenge to waste management systems, especially when sorting post-consumer plastic packaging. Their share in plastic packaging is still under vivid scientific discussion.

There is evidence that a significant share of the waste plastic packaging stream consists of multilayer film packaging. A hand-sorting analysis of a two-dimensional plastic packaging fraction with consecutive FTIR analysis gave a 6 w-% share of multilayer films in the Austrian plastic packaging stream of separately collected waste.

Currently, the Austrian plastic packaging recycling efficiency is 25.7 w-%, whereof 171,000 tons of plastic packaging were collected in 2020 by the separately collected waste collection. Combining these numbers with the finding of 6 w-% share of multilayer films results in a total untapped recycling potential of 10,260 tons of multilayer films per year.

Therefore, the detection and ejection of multilayer films needs more research. It is necessary to develop new technologies to detect, eject and recycle multilayer films on an industrial scale to avoid negative interference in downstream processes. In the future, the research of recycling technologies of multilayer film and improvement of legacy plastic sorting technologies can help to further refine the sorting performance and tap unlocked recycling potential in the fraction of flexible plastic packaging waste to thus pave the way for a circular plastics economy away from mere use in industrial incineration. As a result, a new, value-added source of secondary resources is created which contributes to a sustainable recycling of plastics and additionally enhances the Austrian plastic recycling efficiency.

Assessment of the recyclability of WEEE: A practice related Model

E. Kodon¹, T. Mayer¹ & T. Nigl²

¹⁾ ERA Elektro Recycling Austria GmbH, Vienna, Austria

²⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

Promoting circularity and closing the loop is substantial to achieve the long-term goal of climate neutrality in the European Union (EU). This aspect is important to consider from the very beginning, in the design phase, in order to maximize the impact. Therefore, furthering Design-for-Recycling is crucial. This can be achieved by using the recyclability as an eco-modulator for disposal-tariffs. In this paper a model for calculating the recyclability of waste electric and electronic equipment (WEEE) is introduced. Existing models are evaluated and an underlying method is established. Factors influencing the recyclability of WEEE are investigated and implemented into the method. The legal framework and Austrian WEEE recycling plants are analysed to create a reference process for WEEE recycling in Austria. The resulting model considers all steps of the end-of-life-processes and covers the theoretical, technical and real recyclability. The promoted model aims to calculate the recyclability in a holistic, transparent, quantitative and comparative way. This is essential for applying the recyclability as a key factor for sustainable product design.

Accidents and Fires with Electric Vehicles - A Statistical

T. Nigl¹ & M. Altendorfer¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

The rapid transformation toward electric mobility in recent years is creating new challenges for emergency services in the area of accidents and vehicle fires. On the one hand, the topic is not new for conventional powertrains, on the other hand, a bias in media coverage is visible. This article examines the extent to which literature data allow a quantitative statistical comparison between the fire risks and hazards of electric vehicles and vehicles with internal combustion engines. The results show that electric vehicles are considerably less often involved in fire incidents. However, the results are clouded by the current scarcity of data and the resulting limited validity of the data.

Analysis of different polypropylene waste bales – evaluation of the source material for polypropylene recycling

J. Geier¹, M. Bredács¹, A. Witschnigg², D. Vollprecht³ & G. Oreski¹

¹⁾ Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, Austria

²⁾ PreZero Polymers Austria GmbH, Haimburg, Austria

³⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

Polypropylene (PP) accounted for almost 20% of plastic consumption in Europe in 2020, making it the second most widely used plastic (Plastics Europe 2021). Since PP is mainly used in short-life packaging systems, large amounts of PP waste are generated every year, which makes its mechanical recycling essential. However, the use of the thereof obtained recyclates in more demanding applications is still restricted by their lower quality compared to virgin materials.

To determine possible reasons for low and inconsistent qualities of recyclates originating from the source material, the aim of this work was to investigate different PP waste bales (“pure”, mixed with other polymers), commercially available at different sorting centres. The goal was to examine the amount of PP, other polymers and impurities in the bales. The obtained PP fractions were further analysed according to the amount of differently processed PP products (injection moulded, extrusion blow moulded, thermoformed, films/flexibles), since this is an indicator of the processing properties during reprocessing in recycling. To account for seasonal fluctuations, the whole procedure was carried out four times a year.

The results show that the “pure” PP bales contain up to 13 % of polyethylene. In some bales, considerable levels of polymeric and foreign impurities were found. Sorting of the obtained PP fraction by processing methods indicated seasonal fluctuation, which may be one reason for inconsistent recyclate quality. These results highlight the importance of proper sorting and treatment of PP waste bales before reprocessing. This work will serve as a starting point for a comparison of recyclates processed from mixed PP fractions and from PP fractions sorted by processing method. In addition, the bale analysis will be continued to determine whether the seasonal variations of the proportions of the processing methods were random or are reproducible.

The new VDI Standard No. 4095 represents state-of-the-art in plastic recycling technology

R. Brüning¹, J. Wolf¹, R. Maletz²

¹⁾ Dr. Brüning Engineering UG, Brake, Germany

²⁾ Technische Universität Dresden, Institute of Waste Management and Circular Economy, Pirna, Germany

The standard 4095 „Assessment of Plastic Resources in a Circular Economy” aims to support actors in the field of plastic production and recycling. It shall help to initiate the harmonization between waste management and production legislation which follows still different targets. For the presented standard a group of experts from production and recycling industry, science and national administration are working together to increase the share of recyclate application in plastic production.

Plastic production worldwide sums up to 360 million tons for the year 2018. Thereof 62 million tons were produced in Europe. Plastic waste generation in the same year was estimated to be 29 million tons, which were recorded in official statistics. Besides that, there is a high number of plastic waste which enters the environment illegally. The overall recovery rate of collected plastic waste is 33 %, the rest is incinerated (43 %) or landfilled (25 %). Big amounts of plastic wastes are not treated in Europe. There is a high demand for taking action and the share of secondary materials in plastic production has to be increased drastically.

The mentioned challenges are well known to the European Commission, which set up a program in 2018 called Green Deal within the EU Circular Economy package, leading to more application of post-consumer recyclate material in plastic products.

While there is a clear understanding among politics and the economy that recyclate usage has to be increased, limitations exist considering the comprehensive requirements for health safety and hazardous compounds accumulation in material cycles. For instance, old flame retardants which are prohibited nowadays have to be taken out from production cycles. There are restrictions, limitations or bans for introducing them back into the cycle.

The standard VDI 4095 will help to overcome these challenges for increased plastic recycling. In a first part the standard committee presents the current situation in the whole plastic material process chain including the end of life processes. Additionally, methods for environmental assessment applicable for the considered materials are introduced. The standard will contain a comprehensive set of definitions of terms in the field of plastic recycling with the goal to establish a harmonized language and set of terms to avoid unwanted discussions and misunderstanding in the sector.

For production and usage phase of plastic materials the important fields of application are described as well as the characteristics of the used polymers.

Strong focus of the standard will be the connection between production and waste management. Today there is a big gap of information and knowledge exchange between these two sectors in the plastic circle. Here, recommendation for legislation are made to clarify end-of-waste determination among others. The overarching goal of the standards is to strengthen the market for secondary plastic material and to emphasize the holistic advantages of recycling plastic in comparison to using primary feedstock. Follow-up sheets of the standard 4095 will define technical aspects and processes in more detail.

Concentration measurements for quality assurance of jet grouting remediations

P. Freitag¹, K. Kljajic² & T.G. Reichenauer³

¹⁾ Keller Grundbau Ges.mbH, Engineering, Vienna, Austria

²⁾ University of Natural Resources and Life Sciences, Institute of Soil Research, Vienna, Austria

³⁾ AIT Austrian Institute of Technology, Bioresources, Tulln / Donau, Austria

Soils contaminated with mineral oil hydrocarbons, pose a common problem. This can be aged heavily contaminated sites up to recent accident-caused releases. In situ immobilization using cement slurries is a widespread and often used technique of remediation in both cases. Depending on the drilling method used, contaminated slurries may incur as waste, which must be treated i.e., deposited on a landfill site.

At a site in Upper Austria a broken heating oil pipe led to a contamination of the subsoil which had to be treated during the construction of a new building. Jet grouting was selected to immobilize the mineral oil hydrocarbons.

In an accompanying master thesis, the effects of the addition of the oxidizing agent, potassium permanganate (KMnO_4) was examined. Emphasis was placed on two questions:

- Can the concentration of the contaminant be lowered to such a degree as to allow the site to be classified as decontaminated instead of encapsulated?
- What is the influence on the waste material produced during the treatment?

Material from the site was used but had to be spiked with diesel fuel due to low mineral oil concentrations. Batch- and column experiments were set up to answer these questions. The results of the first indicated that in the long term no significant difference could be seen.

On the other hand, the column experiments indicated an improvement in waste quality (i.e., lower required land fill site class). During the first days after installation the concentration in the efflux of the columns was significantly less.

Furthermore, the acquired time series could be used as a means of quality assurance, assuming the availability of a robust groundwater flow model. Relating the concentration to the overflow surface in the column, one could compare this to *in situ* concentration measurements. If this measured concentration is higher than the expected value, based on the actual treated subsoil volume, this would give a strong indication for an unidentified and untreated hot spot. This assumption is valid as the treated area can be seen as impermeable.

In conclusion we can state that performance of column experiments is a feasible way of acquiring valuable additional information when working on an immobilization project.

Determination of elemental carbon in solid samples for assessment according to the Landfill Directive - a proposed solution

O. Mann¹, S. Coskuner¹, T. Klinger¹, F. Maringer¹, L. Sappl¹, M. Sappl¹, M. Gazetovici¹, K. Wruss¹, W. Wruss¹ & G. Sigmund²

¹⁾ ESW Consulting Wruss ZT GesmbH, Vienna, Austria

²⁾ Department of Environmental Geosciences, Universität Wien, Vienna, Austria

According to the Landfill Directive 2008, it is prohibited to landfill waste that contains more than five percent by mass of total organic carbon (TOC). Excluded are wastes whose carbon content results from elemental carbon, coal or coke fractions, unless it is loaded activated carbon or loaded activated coke, if these wastes are deposited in a landfill for non-hazardous wastes.

For the determination of elemental carbon in waste samples, DIN EN 19539 is being used more and more frequently. This standard describes a temperature-dependent differentiation of the total carbon into three fractions, the TOC400, the ROC and the TIC900. The elemental carbon is to be found in the ROC fraction. However, since the pyrogenic carbon, which is to be determined for the exemption of the Landfill Directive, is distributed over the entire temperature range, this method should not be used to assess the elemental carbon according to the Landfill Directive. In the present work, an adapted pyrolysis method is presented, which is better suited for this assessment.

To differentiate the EC from the TOC-content, sample preparation steps are required to remove the organic carbon from the sample in advance. The differentiation between degradable organic carbon (AOC) and EC in bottom ash using the pyrolysis technique has been studied and optimised several times. Following these methods, the homogeneous sample was thermally pre-treated at 980°C for 5 minutes under a nitrogen atmosphere to remove the TOC. Afterwards, the remaining EC was released during a subsequent combustion of the sample in an oxygen stream and measured with the temperature-controlled screening method according to DIN EN 19539.

During pyrolysis, most EC species remain in the sample, but higher contents of organic matter, such as humic acids and cellulose, are only incompletely removed and/or partially converted into EC (coking). The carbonates are also only incompletely converted during pyrolysis, which leads to poor reproducibility overall. Within the scope of this work, the accuracy of the pyrolysis technique could be significantly improved with a combination of pyrolysis and temperature-controlled screening methods according to DIN EN 19539, as well as an adapted calculation. However, to assess the elemental carbon in the sense of the Landfill Directive, it is advisable to additionally use the loss on ignition. Waste samples with a TOC:LOI ratio < 0.5 can be expected to have high organic and low EC contents. A TOC:LOI ratio > 0.7 indicates the presence of relevant amounts of elemental carbon, which makes the adapted pyrolysis method very applicable. This method was validated with 26 mix-standards and 118 real samples to show its applicability for practical use.

Oil-binding non-wovens for removing mineral and vegetable oil from water

M. Lackner¹, K. Putz², M. Plank³ & A. Loibner⁴

¹⁾ FH Technikum Wien, Faculty Industrial Engineering, Vienna, Austria

²⁾ ensowa GmbH, Schäffern, Austria

³⁾ Spitzer GesmbH, Vornau, Austria

⁴⁾ BOKU, Department IFA-Tulln, Institut Umweltbiotechnologie, Geobiotechnology and Environmental Chemistry, Tulln, Austria

There are a number of options for oil/water separation, but these cannot always be used directly in the field. As part of the present research project, it was investigated to what extent a robust, cost-effective process for separating mineral oil or vegetable oil and mixtures of both from water can be developed with oil-binding nonwovens. The motivation for this study was the need to separate large quantities of water-oil mixtures resulting from *in-situ* soil washing operations, where some of the withdrawn liquid is still emulsified. Different embodiments of a non-woven based oil/water separator, some in batch and some in continuous operation, were implemented and tested in the field after initial laboratory tests. Nonwovens made of polyolefins and polyesters were used, with a weight of 220 to 400 g/m² and an oil-binding capacity of 5-15 times their weight. When separating mineral oil hydrocarbons (MOIL) and vegetable oil (POIL) from water, both in phase and emulsified, residual oil contents in the water of 0.5 to 1.5 mg/l and a water content in the oil of max. 2% were found. On the basis of contaminated site N77 (Petroleum refinery Drosing, Lower Austria), it was also investigated how groundwater contaminated with mineral oil can be purified. In the processed groundwater, the following residual oil contents were measured:

- Standard oil separator (OS): 0.8 mg/l
- OS + nonwoven inclined bed filter (NF): 0.3 mg/l
- NF: 0.4 mg/l

When the emulsion was removed from the soil (10% POIL in water, contaminated with MOIL), the following residual oil contents resulted (total):

- OS: 0.8 mg/l
- OS + NF: 0.7 mg/l
- NF: 0.6 mg/l

The feasibility of groundwater purification was demonstrated with 530m³ of contaminated groundwater. The nonwoven inclined bed filter allows continuous operation. According to laboratory tests, the loading capacity of the nonwovens decreased by less than 5% after 20 cycles. This was also confirmed in the field tests.

Especially in combination with an upstream mineral oil separator, a nonwoven-based, inclined bed filter with oil-absorbing nonwovens, which runs as an endless belt and is regularly squeezed out, offers advantages in that the residual oil content in the outlet is 0.1 to 0.2 mg/l lower than in a process with an oil separator alone. The process is robust against sand contamination and can help to simplify and efficiently organize oil/water separation in the field in the future.

The project „Aufreinigungskaskade“ was supported by BMK, managed by Kommunalkredit Public Consulting, under grant number B820001, which is gratefully acknowledged.

Recycling potential of recycled carbon fibers used in textile concrete from a technical and environmental point of view

B. Bayram¹, V. Overhage², K. Raulf¹, K. Greiff¹ & T. Gries²

¹⁾ RWTH Aachen University, Institute of Anthropogenic Material Cycles, Aachen, Germany

²⁾ RWTH Aachen University, Institut fuer Textiltechnik, Aachen, Germany

The application of carbon fibers has been increasing in the construction industry as they allow production of lightweight concrete structures. Aside from many advantages, the end-of-life management of carbon fiber reinforced concrete remains challenging. Through this study, we aimed to assess the recycling potential of recycled carbon fibers (rCF) that were used in concrete considering the technical and environmental aspects. To identify the separation potential of carbon fibers from concrete, mechanical processing by means of hammer mill with different machine settings was conducted. In addition, a life cycle assessment was performed evaluating two life cycles of carbon fibers and identifying the hotspots. Within the life cycle assessment, we also included a comparison of global warming potential impact of virgin carbon fibers and recycled carbon fibers produced by pyrolysis. From the results of mechanical processing, it is seen that with the increased weight percentage of separated carbon fibers, the fine portion, which is a mix of carbon fibers and concrete, also increased. In addition, two assessed parameters, the total mass and length division of separated carbon fibers were observed to have the greatest value in two different machine settings. From an environmental point of view, virgin carbon fibers and concrete production were the highest contributors to environmental impacts. Furthermore, recycling through pyrolysis was found to be environmentally advantageous compared to virgin carbon fiber production. Further research can assess if it is possible to use the comminuted rCF fractions in yarn or in concrete as short fibers. In terms of LCA, it will be interesting to further include the quality aspect of rCFs in the assessment.

Model-based Tool for the Quantitative Risk Assessment of Waste Storage Fires

M. Hohenberger¹, M. Grimm¹ & R. Raupenstrauch¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Thermal Processing Technology, Leoben, Austria

With the aim of further developing the waste industry-specific fire safety guidelines a methodology for the quantitative assessment of fire risks in waste storage areas is presented. A systematic and objective risk assessment according to ÖNORM ISO 31000 is therefore used. The sub-steps of risk identification, analysis and assessment are carried out on the basis of relevant literature studies. Ignition probability and fire impact define the risk concept, which are further divided into self and external ignition sources as well as heat release and smoke production. The parameters on the other hand are divided into material specific and system specific ones. The material specific influence parameters are collected in a data base for easily available substance values. For that reason, waste materials are characterized by comparative materials. The user-input parameters of the system-specific or bulk storage specific quantities are prepared for evaluation by means of simple calculations. The influences of these parameters are given in different curve shapes.

Subsequently, all parameters are compared with a worst-case, yet credible case and evaluated by literature-based factors to assess each parameter. The representation of ignition probability and fire impact in values between 0 and 1 in a risk matrix allows quantitative hazard assessment as well as the effects of fire protection measures. The results show that the correlations based on the parameters fit the real data. However, the selection of parameters, their influence and overall assessment is still not validated enough, which needs to be done in further work. A continuous improvement cycle is needed to be installed for the practical use of this risk assessment tool.

Metrology for the Recycling of Technology Critical Elements to Support Europe's Circular Economy

S.T. Lancaster¹, A. Walch¹, M. Eberhard¹, A. Rachetti¹, T. Prohaska^{1,2} & J. Irrgeher^{1,2}

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Chair of General and Analytical Chemistry, Leoben, Austria

²⁾ University of Calgary, Department of Physics and Astronomy, Calgary, Canada

Technology critical elements (TCEs) are vastly used throughout society; including phones, computers, and renewable energy products, such as solar panels and wind turbines. However, dwindling supplies of TCEs threaten to disrupt such technology production worldwide, which is especially concerning given a recent drive for more renewable energy sources. In 2017, the European Commission issued new targets for recycling TCE containing waste, however progress towards this goal is limited due to low availability of materials and methods used to accurately measure these elements in electronic waste products. Such accurate measurements are critical in determining the economic value of the waste and to decide on the correct recycling routes.

As such, the aim of this project is to develop new, SI-traceable reference materials and methodology for accurate quantification of TCEs in urban mine waste to support industry in developing new and improved recycling strategies. This Europe-wide project belongs to the European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) initiative, which is co-funded by European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating states. The project is led by the Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) in France, and involving collaborations between 15 different institutions across the continent, including leading national metrology institutes. At the Chair of General and Analytical Chemistry, Montanuniversität Leoben, our primary aim is to explore the use of various sample preparation strategies and measurement techniques to find the most optimal and simplest procedures for determining the quantity of each desired TCE in urban mine waste. In addition, imaging techniques will be employed to further improve recycling strategies by determining the location of each element in whole electronic scrap material.

The accurate determination of elemental concentrations in electronic waste is incredibly challenging due to the difficulties of obtaining a representative sample (due to the vastly heterogeneous sample composition), preparation of samples, and the analysis. While many digestion and analysis procedures exist, these current methods are often time consuming and can use dangerous chemicals, such as hydrofluoric acid. The work presented here will detail new, faster, and effective strategies for the analysis of technology critical elements in electronic waste.

Processing of compost oversize fraction from biowaste treatment into residual biofuels

V. Scheff¹, G. Dürl¹ & D. Laner¹

¹) University of Kassel, Research Center for Resource Management and Solid Waste Engineering, Kassel, Germany

Against the background of increasing quantities of compost oversize fraction from biowaste treatment in Germany, more efficient and cost-effective utilization paths are currently investigated for this residual material flow. Compost oversize is mainly composed of woody materials and substantial shares of foreign matter (such as metals, plastic, glass) and fines. Because of the woody materials in compost oversize, an energetic utilization in biomass combined heat and power (CHP) plants after mechanical treatment can represent an alternative utilization path to the currently dominant incineration in Waste-to-Energy plants, which is more energy-efficient and cost-effective. Therefore, the BioRestFuel research project is investigating the extent to which compost oversize from biowaste treatment, as one among several residual waste streams, can be used as residual biofuel in biomass CHP plants. A main focus within the project is put on the ash melting behavior, as low ash softening temperatures lead to slagging and corrosion in incineration plants, which in turn lead to lower energy efficiency, plant damage and increased emissions.

Based on three treatment campaigns for the compost oversize, extensive investigations and analyses of the input and output flows are performed. By the end of 2021, two treatment campaigns have already been completed at a biowaste treatment plant. The input and output flows of the implemented treatment chains were characterized, and the treatment success of the campaigns was evaluated using material flow analyses to determine yields and purities of the generated target materials. Furthermore, fuel analyses according to the DIN ISO standards known for solid biofuels are carried out to evaluate the fuel quality in comparison to conventional biomass fuels. Currently, the combustion behavior and in particular the slagging in the combustion chamber are analyzed via pilot scale (40 kW) combustion experiments. The resulting database from the fuel analyses and combustion experiments will eventually be developed statistically based models on the relationship between fuel properties and slagging and ash melting behavior.

Overall, the two treatment campaigns carried out showed that relatively simple mechanical treatment processes can be effective to concentrate target materials in specific outputs and reduce the share of foreign matter in the generated residual biofuel. For instance, an additional screening of the compost oversize at 10 mm could reduce the total mass of compost oversize by up to 1/3, which on the one hand saves costs and on the other hand generates more compost to be put on the market. The reference material, screen overflow wood (named as SÜH in the German article of the conference proceedings), generated by manual sorting, exhibits good combustion properties in the form of a low ash content and high calorific value, but relatively low softening temperatures. The latter is probably due to high contents of chlorine, sodium and potassium and results in an increased risk of slag formation during combustion. This was confirmed by the first combustion experiments carried out with the residual fuels, which indicate a tendency towards higher emissions and increased slagging. Therefore, wet treatment steps to reduce the critical element contents are planned as a part of the third treatment campaign. As a final step of the project, the various processing and recycling options for compost oversize will be environmentally and economically evaluated and optimal configurations will be identified.

Integration of regional socio-economic LCA and environmental LCA for the assessment of industrial bioeconomy networks

A. Bezama¹, W. Zeug¹, J. Hildebrandt^{1,2} & D. Thrän^{1,3}

¹⁾ Helmholtz Centre for Environmental Research, Department of Bioenergy, Leipzig, Germany

²⁾ Zittau/Görlitz University of Applied Sciences, Institute for Process Development, Peat and Natural Materials Research, Zittau, Germany

³⁾ Deutsches Biomasseforschungszentrum GmbH – DBFZ, Leipzig, Germany

The current geopolitical situation in Europe has led to revisit the evaluation of energetic independence of countries and of regions. In this sense, previous works have shown the advantages of implementing regional integration schemes for bio-based production systems to promote the internal exchange of heat and by-products.

This work, therefore, presents the socio-economic and environmental life cycle evaluation of alternative defossilization pathways for a bio-based industrial network in the Central Germany region. The pathways were defined considering the potential energy utilization of regionally available biomass residual streams. The evaluation has been made using an integrated approach, i.e. using a traditional life cycle assessment methodology, complemented by a regionalized socio-economic life cycle assessment, utilizing the “RESPONSA” framework developed at UFZ.

It has been shown that the environmental advantages of the defossilization of the value chain add up to 5% of the reduction of the overall impacts, which was somehow expected due to the already existing integration and optimization in the value chain. The socio-economic results, however, show that the path to defossilization can provide a clear enhancement of the regional socio-economic impacts, which can be of great value to the bioeconomy sector.

From the obtained results and from their analysis, it is possible to suggest that a combination of life cycle approaches as the ones presented in this work can allow to identify a wider range of hotspots and opportunities for the implementation of technological alternatives. This can therefore provide with a more solid decision basis for regional authorities and investors when deciding on the implementation of technological alternatives.

On the other hand, it is important to mention, that at this point these results must be considered as preliminary ones. It is expected first, that these potential results can be further refined by the implementation of further primary data coming from the regional organizations that can be potential actors of the value chains involved in this case study. Another important issue is the need to include further socio-economic stakeholder groups in the discussion. Thus far the regional socio-economic life cycle assessment has been carried out by considering three stakeholder groups (i.e. workers, as well as local and national community) in the assessment. In order to align the analysis to the current sLCA guidelines, it would be needed to incorporate the analysis of the stakeholder groups government and value chain actors, which is currently a work in progress.

The market aspects and the constraints on the resources' availability and their associated prices, as well as the energy availability are not included in this analysis, for which it will be taken into consideration in future studies.

Food waste generated by Austrian households

G. Obersteiner¹, S. Luck¹, L. Ortega Menjivar¹, M. Pamperl¹ & E. Schmied¹

¹⁾ University of Natural Resources and Life Sciences, Institute of Waste Management, Vienna, Austria

In the European Union about 88 million tons of food waste are generated annually; this corresponds to a monetary value of about 143 billion euros (Stenmarck et al. 2016). Avoidable food waste is generated along the entire value chain - at every processing step and at every level. Overall, figures for Austria, Germany and the European Union show that households are responsible for around 50 % of all food waste. The avoidable food waste generated by Austrian households is currently estimated at around 521,000 tons per year (Obersteiner & Luck 2020).

The reasons for food waste are manifold and cannot be reduced to individual behaviours or influencing factors. In principle, numerous measures to avoid food waste in households are already known and are also communicated in a wide variety of ways. Nevertheless, despite numerous measures, it has not yet been possible to achieve any relevant effect in terms of a reduction in food waste, particularly in the household sector.

By means of surveys, several attempts have already been made to analyse the reasons that promote and hinder food waste avoidance and the background to food waste disposal behaviour. However, a targeted development of measures for different consumers or food waste producer groups is missing so far. The same is true for the underlying knowledge base on obstacles and resistances to the avoidance of food waste in Austrian households. With the help of a representative survey carried out within the framework of the ERDF-funded project CEWA (Circular Economy of Waste), consumer groups have now been identified for Austria in order to be able to offer targeted measures for food waste prevention.

The questionnaire included questions on shopping behaviour, environmental attitudes, attitudes towards food waste, knowledge and handling of food at home as well as food waste generation. In cooperation with the "market" research institute, a nationwide, meaningful representative study of 1002 households was carried out in the early summer of 2021. The representative quota of the sample includes factors such as age (5-step), gender, province and education, based on the current microcensus data from Statistics Austria.

After cleaning the data material, the most suitable variables were selected for clustering. The interviewees were divided into consumer groups using k-medians clustering. The preferred clustering solution with four clusters allows the distinction into two groups with low waste generation and two with high waste generation. The group of "ignorant wasters" (with a lot of waste and little knowledge about food waste) was identified as the focal group.

Overall, more than a quarter of respondents (28 %) reported throwing away food at least once a week. Only 12 % do not throw away any food according to their own assessment. Depending on the product group, different reasons for disposal were given. For frozen products, the cause for more than 50 % of respondents is an expired best-before date, generally for cooked food, but especially for rice and pasta, "too much cooked" could be identified as the main reason. Overall, however, is mostly visible spoilage that leads to the disposal of food.

Acknowledgements:

The analyses were made possible by funding from the INTERREG V-A Austria - Czech Republic program.

Comparative analysis of the use of dust in composites efficiency use as a filler in building composite materials

E.V. Zelinskaia¹, O.V. Ulanova¹, V.V. Barakhtenko¹ & A.E. Burdonov¹

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk region, Irkutsk, Russian Federation

The issues of processing industrial mineral waste from gas cleaning systems are given attention both by production managers and research scientists.

The problem is most acute in regions with high agglomeration and interconnection of industrial enterprises, the composition and properties of waste vary depending on the industry. For each type of waste, it is necessary to select methods and technologies for handling. In the modern world, when dealing with waste, two principal areas of their disposal can be distinguished: recycling and disposal. The choice of method often depends on the cost: in states with a vast territory, burial is cheaper.

Currently, in the Russian Federation, as in other large countries, industrial waste disposal is the most widespread. But due to the tightening of legislation, the overflow of existing industrial waste disposal facilities, leading to the costly construction of new landfills for disposal with the withdrawal of new areas, large industrial companies are actively searching for an alternative to simple disposal.

As an example, we can cite generating companies that have coal-fired thermal power plants in their composition, which have accumulated over 2 billion tons of ash and slag waste over the years of operation, which occupy more than 20,000 hectares of area. The same applies to enterprises in other industries.

The paper considers mineral dispersed wastes of the metallurgical and thermal power industries, formed as a result of the operation of gas cleaning systems, as well as dust from the aspiration system for processing slags from waste incineration plants. These dusts are mostly inert, have different dispersity, different material composition and properties, and most of them do not have hazardous properties. Dust from the processing of incineration ash and slag requires a thorough study of the material composition to determine possible hazardous properties.

The main ways of processing such waste can be distinguished: use as man-made soil, as a raw material for building materials, in road construction, as well as for the extraction of valuable components. Each of the methods has its advantages and disadvantages, depending on the characteristics of the waste.

The article presents a method for recycling waste from the production of refined silicon, ash and slag from coal-fired thermal power plants with the production of polymer composites based on thermoplastics. The characteristics of industrial dispersed mineral wastes as thermoplastic fillers are compared. The analysis of the composition and characteristics of dusts and their influence on the quality indicators of the obtained composites was carried out. As a result of the research, it was determined that the studied dusts have a wide particle size distribution from 0.1 to 600 microns. The value of the specific surface area of dusts is comparable to that of the widely used calcium carbonate filler (560 m²/kg) and amounted to 592.108 m²/kg for coal ash and slag, 441.298 m²/kg of MSW incineration dust, somewhat less for silicon dust - 189 m²/kg. All indicators determined by calculation show that the studied wastes meet the criteria for their applicability in composite materials.

Aluminum Scrap Sorting Based on Dual Energy X-Ray Images Using Deep Learning Methods

S. Rüger¹, J. Goschenhofer^{1,2}, A. Nath¹, M. Firsching¹, A. Ennen¹ & B. Bischl^{1,2}

¹⁾ Fraunhofer IIS, Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS, Erlangen, Germany

²⁾ Ludwig-Maximilians-University Munich, Department of Statistics, Munich, Germany

The availability of raw materials for the manufacturing industries and the increasing scarcity of raw materials reinforce the goals and the need of the circular economy. One integral part of the circular economy is the recycling industry, which enables efficient and sustainable processing of end-of-life materials for reuse. This requires robust and accurate sorting systems that can distinguish between different materials. In this paper, we propose a Deep Learning based sorting system that allows learning relevant features for sorting decisions from scratch. For this, a representative database is crucial to learn correct sorting decisions and train models accordingly. We focus on an application-oriented task from the recycling industry: the sorting of end-of-life aluminum scrap into a high-grade pure aluminum fraction and a low-grade residual fraction. We use dual energy X-ray transmission data acquired from crushed end-of-life major household appliances.

The preparation of an appropriate database is crucial for training Deep Learning models. We therefore discuss the preprocessing steps for generating the input data as well as a multi-rater annotation scheme to mine the corresponding data annotations required for model training.

Furthermore, we evaluate different machine learning methods from the unsupervised, semi-supervised and supervised learning paradigms with respect to the sorting task. An evaluation strategy tailored to the data situation as well as performance metrics that apply to the recycling context are presented.

Within a series of experiments, we investigate models of varying complexity and design. In addition, we experiment with the use of appropriate data augmentation methods and the handling of annotation noise. Finally, in addition to sufficiently strong model performance, we address explainable AI methods to foster the final deployment of such Deep Learning approaches.

Our work shows promising results for automatic aluminum sorting, achieving an F_β of 91.74 % and a resulting precision of 93.08 %.

Distillation as a recycling method for metallic raw materials

D. Böhm^{1,2,3}, D. Weißbach^{1,2,3}, S. Gottlieb^{1,2,4}, G. Ruprecht^{1,2}, A. Huke^{1,2} & K. Czerski^{1,2,3}

¹⁾ Dual Fluid Energy Inc., Vancouver, Canada

²⁾ Institute for Solid-State Nuclear Physics (Institut für Festkörper-Kernphysik), Berlin, Germany

³⁾ University of Szczecin, Szczecin, Poland

⁴⁾ University of applied science and arts (Fachhochschule Dortmund), Dortmund, Germany

Rare earths and numerous other valuable metallic raw materials from alloys are still recycled far too rarely today or only under *downrecycling* conditions. In this study, a newly developed, simple recycling process based on chlorination, flash evaporation and distillation is presented here, which is suitable for the recovery of rare earths and other metallic valuable materials such as titanium or lithium. In addition to chlorination, this separation concept is based on only two separation units: a primary flash evaporation for pre-fractionation and a subsequent high-temperature distillation unit as an industrial distillation column under very high reflux rates. The most important simulation results for some selected distillation examples under simplified process and phase equilibrium conditions are summarized in Tab. (1).

Tab. 1: Summarized separation results for distillation

Separation example ¹⁾	Required separation stages	Required temperature range in °C	Low boiler distillation products	Heavy boiler distillation products	Inpurified Residuals
NdFeB-magnets	12-14	1029-1594	Mixture of iron & cobalt chlorides	Mixture of neodymium & dysprosium chlorides	Copper chlorides
FeNiCr-alloys	18	137-316	Titanium tetrachloride	Iron chlorides	Mainly niobium pentachloride
TiAlV-alloys	8	136-316	Mixture of Titanium & Vanadium tetrachloride	Iron chlorides & Yttrium trichloride (separately)	Iron chlorides

¹⁾ Column operated at 1 atm

The simulation results show that for the NdFeB magnetic separation example, neodymium and dysprosium as trichlorides can be excellently separated as heavy boiling products of high purity from the non-rare earth components, in a small 12- to 14-stage separation column. All volatile components can be completely removed in flash evaporation. The only disadvantage of this separation option is the higher temperatures at 1029-1594°C, so suitable temperature and corrosion resistant materials such as SiC or ZrC must be used.

Titanium can be separated from various alloys by distillation as a high boiling tetrachloride (at 136-316°C with high purity). Depending on the consideration of the alloy examples for separation, the number of separation stages varies from 8 to 18. Thus, for an eight-stage separation column, a low column height of only approximately 1.6 to a maximum of 3.3 m is required. With a higher separation effort, even a high-purity separation of yttrium as a heavy-boiling trichloride product is possible in the example of the TiAlV alloy recycling. The simulation results suggest that distillation could be a lucrative separation process alternative for all the recycling examples mentioned. Metallic *recyclables* could be recovered in this way in a sustainable and nature-friendly way, while important raw material resources would be conserved.

Sorting Based on Bits – The Technical Background of Digital Markers in the Context of High-Quality Recyclate Generation

N. Kuhn¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

The entire plastics value chain is currently looking for new processes to produce high-quality recyclates. One measure is to add relevant product-specific information that can be retrieved during the sorting process. Digital watermarks are currently being discussed for this purpose. However, the basics of this technology are currently only known to a limited extent in the recycling industry. Through the usage of digital watermarks, additional information about a product can be imperceptibly added onto a product. From a high-level view, a digital watermarking system consists of an embedder and detector. The embedder's input is the original, unaltered cover work, like a bottle. During the watermark embedding process, embedding parameters (e.g., a secret key) are applied in combination with a message, forming a digital watermark. Afterwards, the watermarked cover work can be used freely. During this phase, noise or distortion can influence the cover work by adversaries' intent of removing the watermark, deformation of the object, adhesion of dirt, blurring or – during decoding – an attack.

Once such a digital watermark is embedded, the cover work can be perceived through the human visual system and a watermark detector. While the human should only see the unaltered cover work with no interference from the watermark, the detector should retrieve the original watermark message without interference from the cover work. The detection process is usually solved in two steps with a combination of optical and digital image processing techniques: First, the presence of a watermark is checked through a recovery function and if detected, the message is decoded through a retrieval function. Only if the data between the watermark and the deposited information match, the decoding process is successful, and the product is authenticated. Hence, additional information (e.g., about the product) can be retrieved during decoding. In the context of a circular economy in the plastics value chain, a digital product passport could be accessed by scanning watermarked products. The watermark could be used to retrieve relevant information such as pureness of polymer type, additives, colour, availability of the recyclate supply, further qualitative aspects and certificates, or results of laboratory tests.

For decoding digital watermarks, commercially available cameras operating in the visible spectra together with a processing unit are required. Both elements are included in commercially available sensor-based sorting systems. To ensure ideal exposure conditions, additional light sources should be installed. The sorting process itself follows the principles of sensor-based sorting where the objects are separated by an acceleration belt, pass the decoding device, and are finally separated by means of compressed air nozzles. After the watermark has been captured by the camera, the images are transferred to the computer. There, the watermarks are decoded, and the respective metadata is obtained from a database and a sorting decision is derived.

Nevertheless, there are still some obstacles to overcome before digital watermarking can be widely adopted. For one, there is currently no institution that guarantees public access for all stakeholders (e.g., for encoding, decoding, access to external database). Furthermore, data sovereignty must be clarified, since – especially for a digital product passport – partly sensitive information is deposited, over which the respective stakeholders may lose control. Finally, the increasing demand for recyclates could also lead to a shift in quantities and qualities within the sorting fractions in the sorting plants due to the correlation between recovery and purity. As a result, the quality of individual fractions could increase in relative terms, but the quantity of recyclable fractions could decrease in absolute terms.

Amendment of the AVV: Evaluation of the quality assurance of refuse derived fuels and refuse derived fuel products

A. Tischberger-Aldrian¹ & R. Sarc¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

In the course of the amendment of the existing Waste Incineration Ordinance the Chair of Waste Processing Technology and Waste Management (AVAW) was entrusted with an evaluation of the specifications for the quality assurance of refuse derived fuels (RDF) and RDF products (Annex 8 and 9). In addition to the AVAW's own findings, experiences, data and feedback should be obtained from the stakeholders relevant to the AVV (cement plants, other co-incineration plants, RDF manufacturers, authorities/state governments, authorized persons/technical institutes) and the feedback should be processed in an anonymous form. An impulse event took place in October 2019. The stakeholders were invited to take part in the event in a number of ways (personal contacts, e-mail distribution lists via ÖWAV and VÖZ). The approx. 30 participants of the impulse event took part actively in the open discussion and contributed important practical experiences. In the period from November 2019 to December 2020, a total of 45 one-on-one meetings were held with stakeholders interested in working together and extensive relevant data was collected.

Subject areas such as sampling, limit values, proof of assessment, waste information, identity control, external monitoring, analysis, sample preparation were considered. The information received was evaluated, summarized and incorporated into the amendment of the AVV.

In the course of the discussions and talks with stakeholders, many relevant aspects of handling and interpreting the AVV in practice were raised. The usefulness of some regulations was questioned and suggestions for possible changes were made. It was also an important process for the Federal Ministry to receive reports on the experiences of those who deal with the AVV and its specifications on a day-to-day basis. For the amendment of the AVV (draft assessment), essential passages were formulated more clearly in order to standardize and simplify interpretation. Easements have also been made in some areas.

Some things have also remained the same, all the wishes of the stakeholders and recommendations of the AVAW could not be implemented. At the same time, however, it should also be noted that the AVV is fundamentally very widely accepted in the industry, many aspects are perceived as very practical (e.g. median/80th percentile limit value consideration) and reasonably flexible (e.g. assessment of waste both by supplier as well as cement works possible). The AVV has thus become indispensable for the entire RDF industry and, by setting quality standards, also makes a significant contribution to legal certainty in this area.

Pilot-scale production of lightweight aggregates from gypsum-containing masonry rubble

A. Mueller¹ & S. Liebezeit¹

¹⁾ IAB, FB Baustoffe, FaB Baustoffrecycling, Weimar, Germany

Construction demolition waste from masonry structures is usually a mixture of bricks, mineral-bonded wall-building materials, mortar and plaster. It either cannot be recycled at all or only after extensive mechanical processing, which is only possible for the coarse fractions. If the mixture also includes sulfate-containing building materials such as gypsum plaster or aerated concrete, it cannot be used as backfill material. It has to be landfilled, which on the one hand causes high costs and on the other hand takes away important secondary raw materials from the economic cycle. This is especially true for the gypsum. Due to the conversion of energy production from fossil fuels to renewable energy sources, flue gas desulphurisation gypsum will no longer be available in the future. The resulting "gypsum gap" could be at least partially filled by secondary gypsum recovered from construction waste. Based on first investigations, a process was developed with which lightweight aggregates such as expanded clays or pumice can be produced from masonry rubble with high gypsum contents in a thermal process. After laboratory-scale tests, the process has now been tested in the pilot plant operated at IAB gGmbH Weimar. The thermal treatment takes place in the rotary kiln heated with natural gas. The kiln has an inside diameter of 0.60 m and is lined with a 0.15 m thick layer of refractory mortar. Its length is 6 m. The inclination and the speed of rotation can be adjusted. The furnace can be operated in a temperature range from 500 to 1500 °C. It is equipped with numerous measuring devices for temperature, pressure and exhaust gas composition. The exhaust gas is cleaned in a bag filter with the addition of an adsorbent to separate the SO₂.

By the experiments in the pilot plant the laboratory results were fully confirmed. Lightweight aggregates with SO₃ contents between 0.14 and 0.52 mass % were produced from the starting materials with gypsum contents of up to 15 mass %, which thus conform to standards with regard to use as lightweight aggregates for the production of lightweight concretes. The contents of elutable sulfat decreased to values below 50 mg/l, so that there are also no restrictions of use from this side. On the basis of the experimental investigations in the pilot scale, initial technological statements could be made. According to these, energetic advantages can be expected in comparison to light aggregates made of expanded clays.



Verein zur Verleihung
des Zertifikates eines
Entsorgungsfachbetriebes



Lothningerstraße 12
1030 Wien
Tel: +43(0)1 532 62 83
Mail: office@vefb.at



www.vefb.at

Das Zertifikat Entsorgungsfachbetrieb:

- Anerkanntes und bewährtes Zertifizierungssystem für Unternehmen der Entsorgungs- und Ressourcenwirtschaft
- Qualitätsmanagementsysteme (ISO 9001) und Umweltmanagementsysteme (ISO 14001) sind größtenteils abgedeckt und werden durch den EFB fachspezifisch ergänzt
- Nationale gesetzliche Gleichstellung zur EMAS (EFB+ Zertifikat)

Was garantiert eine EFB Zertifizierung?

- Überprüfung der Rechtskonformität (Legal Compliance)
- Leichte, unkomplizierte Umsetzung im Betrieb durch eine Prüfliste, die einen Fragenkatalog der EFB Umsetzung darstellt und jährlich extern durch eine/n EMAS-Gutachterin überprüft wird
- Ausreichender, auf die Branche angepasster, Versicherungsschutz sowie Risikoabschätzungen
- Zuverlässigkeit und Fachkunde der verantwortlichen Personen (Zuverlässigkeitserklärung, Strafregisterbescheinigung, Unbedenklichkeitsbescheinigung, Finanzamt sowie Gebietskrankenkasse und Schulungsnachweise)
- Plausibilitätsüberprüfung von Abfallbilanzen und Mengenströmen
- Überprüfung der Dokumente der Betriebsorganisation (Firmenbuchauszug, Firmenbeschreibung, Verfahrensfleißbild, Organigramm, Stellenbeschreibungen)
- Verwaltungsvereinfachungen für zertifizierte Betriebe
- Vorteile bei Ausschreibungen und Behördenüberprüfungen: Abdeckung vieler Punkte bei behördlichen Vor-Ort-Überprüfungen durch die EFB-Zertifizierung
- Schulung: In der Regel findet mindestens einmal im Jahr eine Schulung der V.EFB Gremien statt. EFB Erfahrungsaustausch, Gutachter Round Table sowie weitere Veranstaltungen dienen der Weiterentwicklung und Verbesserung
- Dynamisches Zertifizierungssystem: Das Regelwerk des V.EFBs wird in kurzen Abständen von 2-3 Jahren an den Stand der Technik angepasst.

KC
KUNSTSTOFF
CLUSTER

CTC
CLEANTECH
CLUSTER

Autorenverzeichnis

A

Abdulfattah, Z.N.	161
Abeliotis, K.	133
Adam, J.	147
Altendorfer, M.	293
Amort, K.	95

B

Bär, M.	217
Barakhtenko, V.V.	343
Bauer, C.	121, 267
Bauer, K.	167
Bauer, W.P.	177
Baumgärtel, D.	105
Bayram, B.	317
Berninger, B.	217
Berrer, I.	63
Betz, J.	233
Bezama, A.	335
Binder, I.	183
Birklbauer, L.	277
Bischi, B.	349
Blasenbauer, D.	227
Böhm, D.	355
Borszki, R.	111
Bredács, M.	297
Brugger, A.	245
Brüning, R.	301
Buchenberger, C.	261
Budde, I.	105
Burdonov, A.E.	343

C

Carniello, S.	203
Coskuner, S.	307
Czerski, K.	355

D

Dankl, C.	267
Degreif, S.	233
Demschar, P.P.J.	147
Di Noi, C.	203
Dörfler, P.	85
Dornbusch, H.-J.	199
Doschek-Held, K.	79

Dürl, G.	331
---------------	-----

E

Eberhard, M.	329
Edlinger, J.	211
Eggenberger, U.	85
Eisenschmidt, A.	167
Eisner, P.	79
Enengel, M.J.	151
Ennen, A.	349
Eriksson, M.	133

F

Faitli, J.	161
Feuchter, M.	127
Feyerer, C.	157
Firsching, M.	349
Flachberger, H.	41
Frank, A.	275
Freitag, P.	305
Friedle, R.	267

G

Gazetovici, M.	307
Geier, J.	275, 297
Gelbmann, U.	211
Genest, S.	167
Goldmann, D.	187
Gollnow, S.	133
Goschenhofer, J.	349
Gottlieb, S.	355
Greiff, K.	317
Gries, T.	317
Grimm, M.	323
Gritsch, L.	183, 193
Gungl, U.	115

H

Haberbauer, M.	277
Hamann, L.	167
Haneschläger, S.A.	277
Hauer, W.	257
Hauschel, L.	43
Hee, J.	89
Hietler, P.	251
Hildebrandt, J.	335
Hinczica, J.	275
Hohenberger, M.	323

Holzer, C.....	275
Holzer, Ch.....	211
Hrad, M.....	51, 273
Huber-Humer, M.....	51, 273
Huke, A.....	355
Hummel, R.....	95

I	
Irrgeher, J.	329

J	
Jaeger-Erben, M.	105
Jamnik, A.....	127
Jesacher, T.....	183
Jesdinski, M.	167

K	
Kabosch, U.....	115
Katalan, T.....	221
Kern, J.....	63
Khodier, K.....	157
Kienreich, C.....	67
Kirschnick, U.....	275
Klinger, T.....	307
Kljajic, K.....	305
Kloud, V.....	183
Knoll, T.....	177
Kodon, E.....	287
Koinig, G.....	281
Krammer, A.....	79
Krempl, N.....	225
Kügerl, M.T.....	233
Kuhn, N.....	361
Kunz, W.....	217

L	
Lackner, M.....	73, 313
Lancaster, S.T.....	329
Laner, D.....	331
Lasch, T.....	157
Lawrenz, S.....	187
Lederer, J.....	183, 193, 227
Leisner, J.....	121
Lenz, S.....	209, 231
Liebezeit, S.....	101, 371
Lipp, A.-M.....	227
Lohrengel, A.....	187
Loibner, A.....	73, 313

Luck, S.....	341
Lucyshyn, T.	225

M

Maier, J.....	67
Maletz, R.....	301
Malzacher, M.	105
Mann, O.	307
Maringer, F.	307
Mayer, T.....	287
Mayerhofer, J.....	209, 231
Meissner, M.	111
Menapace, H.M.	245
Merstallinger, M.	183, 193
Mhaddolkar, N.	139
Minke, C.....	187
Mocker, M.	177, 217
Mori, G.	63
Müller, A.....	101, 371
Müller, S.....	101

N

Natau, F.....	43
Nath, A.....	349
Nigl, T.	287, 293
Nippraschk, M.....	187
Noller, K.	167

O

Obermüller, R.	239
Obersteiner, G.	133, 209, 231, 341
Oreski, G.....	297
Ortega Menjivar, L.	341
Orth, D.	133, 143
Ottersböck, M.	183
Ottner, R.	273
Overhage, V.....	317

P

Pamperl, M.	341
Papsch, F.....	267
Peer, M.	217
Pichorner, H.....	127
Pinter, G.....	275
Pitschke, T.....	173
Pladerer, C.....	143, 251
Plank, M.....	73, 313
Plevová, K.....	127

Poppe, E.	105
Prochaska, M.	239
Prohaska, T.	329
Putz, K.	73, 313

Q

Quicker, P.	89
------------------	----

R

Rachetti, A.	329
Ragginger, C.	157
Ragossnig, A.	67, 95
Raulf, K.	317
Raupenstrauch, H.	55
Raupenstrauch, R.	323
Reichenauer, T.G.	305
Reitinger, M.S.	221
Resch-Fauster, K.	127
Riedl, J.	63
Romm, T.	111
Rommel, W.	173
Rubini, N.	203
Rüger, S.	349
Ruprecht, G.	355
Rutrecht, B.	281

S

Samhaber, M.	257
Sappl, L.	307
Sappl, M.	307
Sarc, R.	151, 157, 365
Sasiain Conde, A.	277
Sattler, T.	63
Schanda, I.	111
Scheff, V.	331
Scherhauser, S.	133
Schmidt, K.	261
Schmied, E.	341
Schmuck, B.	245
Schneeberger, G.	245
Schönberg, A.	55
Schoppel, G.	239
Schuch, D.	183, 193
Seppel, P.	245
Sigmund, G.	307
Spaun, S.	267
Spengler, T.S.	261
Spiess, S.	277
Spieß, V.	41
Spijker, C.	55

Steindl, F.R.	79
--------------------	----

T

Thallner, S.	277
Theiss, J.	41
Thrän, D.	335
Tischberger-Aldrian, A.	139, 365

U

Ulanova, O.V.	343
--------------------	-----

V

Viczek, S.A.	151
Volk, U.	183
Vollprecht, D.	63, 297
Vorraber, D.	67

W

Wagner, E.	105
Wagner, R.	121
Walch, A.	329
Wallat, P.	187
Wechselberger, V.	51, 273
Weißbach, D.	355
Weissroth, M.	43
Wellacher, M.	127
Wild, N.	127
Winter, I.	115
Witschnigg, A.	297
Wohlmuth, D.	79
Wolf, J.	301
Wolffers, M.	85
Wortmann, V.	167
Wruss, K.	307
Wruss, W.	307

Y

Yanar, N.	161
----------------	-----

Z

Zelinskaia, E.V.	343
Zeug, W.	335



EU Recycling
Das Fachmagazin für den europäischen Recyclingmarkt
eu-recycling.com

GLOBAL RECYCLING
The Magazine for Business Opportunities & International Markets
global-recycling.info

RecyclingPortal
Das Fachportal für Abfall, Entsorgung, Recycling, Kreislaufwirtschaft und Märkte
recyclingportal.eu

eREC
Die digitale Messe für die Recyclingbranche
erec.info

40 ¹⁹⁸²⁻²⁰²² **VOEB**

VERBAND ÖSTERREICHISCHER
ENTSORGUNGSBETRIEBE

*Gemeinsam
Ressourcen sichern*

EVT ENERGIEVERBUNDTECHNIK

Der Lehrstuhl für Energieverbundtechnik unter der Leitung von Herrn Prof. Thomas Kienberger beschäftigt sich in Forschung und Lehre schwerpunktmäßig mit Fragestellungen, die darauf abzielen mittels interdisziplinären, systemischen Ansätzen die Energieeffizienz von öffentlichen Energiesystemen und Gesamtsystemen entlang der Wertschöpfungskette der produzierenden Industrie zu optimieren.

Nähere Informationen zu unseren aktuellen Forschungsprojekten finden Sie unter <http://evt-uniloeben.ac.at>



Kontakt
Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben
evt@uniloeben.ac.at
+43 3842 402 5401



Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband



Das österreichische **Kompetenzzentrum** für
Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft



zukunft
SEIT 1909
denken

www.oewav.at

Sachregister

A

Abbaubare Kunststoffsäcke	147
Abfall	251
Abfallanalysen	183
Abfallbrände	323
Abfallrahmenrichtlinie	221
Abfallverbrennungsverordnung	365
Abfallvermeidung	115, 133, 143, 199, 211, 257
Abfallwirtschaftsgesetz	221
Aktivkohle	43
Alternative zu Ölabscheiden	313
Altlast	67
Altlastensanierung	63
Altlastensanierungsgesetz	221
Anaerobic digestion	273
Antriebswende	293
App	133
Ascheschmelzverhalten	331
Ausgangszustandsbericht	95
Auslaugbarkeit	63

B

Bahnbrechende Technologie	267
Bale analysis	297
Barrier properties	167
Baseline-Report	95
Basis material decomposition	121
Batteries	233
Becher	193
Best practice	329
Bestandsbauten	67
Beton	101
Beweissicherungskonzept	95
Bewusstseinsbildung	211
Bio-Abfall	147
Bio-based polymers	167
Biobasiert	139
Bioeconomy	335
Bio-fraction drying	161
Biogas production	273
Biogene Rest- und Abfallstoffe	331
Bioleaching	277
Biologisch abbaubar	139
Biopolymers films	127
Biorestbrennstoff	331
Bodenwäsche	313
Brandauswirkung	323
Brandbewertung	323
Brandschutzmaßnahmen	323

Brownfield	67
Building materials	343
Bundes-Abfallwirtschaftsplan	221
BVT-Merkblätter	221
BVT-Schlussfolgerungen	221

C

Carbon fiber	317
Carbonatisierung	267
Carbothermische Reduktion	79
CCUS	267
CDW	101
CFD	55
Chemical reaction class	239
Chemisches Recycling	217
Circular Economy	105, 203, 317, 361
Climate goals	233
Climate neutrality	335
Clusteranalyse	341
CO ₂ -Abscheidung	267
CO ₂ -Einsparung	225
CO ₂ -Reduktion	217
Concrete	317
Construction Demolition Waste	101
Convection drying	161
Cracked round bar test	275

D

Data and Information Marketplace	187
Database for recycling technologies	187
Daten	105
Datenlücken	105
Decision tree	239
Deep Learning	349
Defossilizing process energy provisioning	335
Dekarbonisierung	267
Design for Recycling	193, 287
Desktop methods	239
DE-XRT	349
Differential scanning calorimetry	127
Digital Product Passport	361
Digital Watermarks	361
Digitaler Produktpass	105
Drop-in-Plastik	139
Dual energy X-ray transmission	121
Düsenstrahlverfahren	305

E

EBS	365
Eisen- und Stahlproduktion	277

Electronic waste.....	329
Elektroaltgeräte.....	245
Elektromobilität	293
Emission factors	273
Energy transition.....	233
Engineering Design	187
Entzündungswahrscheinlichkeit.....	323
EPA-16-PAK	89
Erfahrungen.....	365
Erklärbare Künstliche Intelligenz.....	349
Ersatzbrennstoffe.....	151
EU.....	257
EU-Kreislaufwirtschaftspaket.....	183
Explosophores	239

F

Farbsortierung	101
Fehlwurfanteil	183
Feldspat.....	41
FeNiCr-Legierungen	355
Fibre-based packaging	167
Filler.....	343
Fluss	209
Fräsen.....	245
Freifallsortierung	101
FTIR.....	281

G

Gemischter Mauerwerkbruch.....	371
Gesetzgebung	105
Getrennte Sammlung.....	193
Getrennterfassung	199
Gewerbeabfälle.....	157
Gewichtseinsparung	147
Gips	101
Gipsrückgewinnung	371
Glas	245
Glassand.....	41
Greenhouse gases	273
Ground-based remote sensing measurements.....	273

H

Hand sorting analysis	281
Heat accumulation.....	239
Heat confinement.....	239
High-quality recyclates.....	297
Hohe Gipsgehalte	371
Hydrogeochemische Modellierung.....	63

I	
Immobilienentwicklung.....	67
In situ Sanierung.....	305
Industrial waste.....	343
Industriebrache.....	67
Informationsbedürfnisse.....	105
Inputmaterial.....	157
Integrated LCA.....	335
Interkristalline Korrosion	63
Interreg Europe SUBTRACT.....	115
ISCO.....	305

K	
Kaliumpermanganat.....	305
Kf-Wert.....	73
Klärschlamm Trocknung	177
Klima- und Ressourcenschutz	199
Klimakrise	293
Klimaschutz	267
KMnO4.....	305
Kohle	307
Kompostierung.....	139
Korngrößenverteilung	157
Kostenersparnis.....	73, 313
Kreislaufführung.....	301
Kreislaufwirtschaft.....	85, 217, 221, 225, 227, 251, 261, 287, 301
Kreislaufwirtschaftspaket	257
Kritische Metalle	217
Kunststoff.....	227, 245, 301
Kunststoffverschmutzung in Flüssen	231

L	
LCA.....	133, 203
Lebensmittelabfall.....	143, 211, 341
Lebensmittelmanagement.....	133
Lebensmittelweitergabe.....	143
Leichte Gesteinskörnungen	371
Leichte Seltene Erden	355
Leichtverpackungen.....	173
Leitfaden.....	95
Life Cycle Assessment	133, 317
Lithium	355
Lithium-Ion Battery.....	187
Logistik.....	143

M	
Marktrecherche.....	147
Maschine Learning	349
Massenbilanz.....	151
Material Flow Analysis	187

Materialcharakterisierung.....	85
Mauerwerkbruch.....	101
Mechanical recycling	127
Mechanical testing.....	127
Mechanisches Kunststoffrecycling.....	225
Mehrkomponentenverpackung	193
Membranbioreaktor.....	43
Metallurgische Stäube	277
Methanemission.....	51
Methanoxidation	51
MetroCycleEU.....	329
Mikroplastik.....	209, 231
Mindeststandard	173
Mineralölschaden.....	305
Monitoring Deponiegas.....	51
Müllverbrennung.....	177
Müllverwertung	177
Multilayer films	127

N

Nachhaltigkeit	173
Nahinfrarotsortierung	101
Nanofiltration.....	43
NdFeB-Magnete	355
Netzproben	231

O

Ökobilanz.....	133
Ökomodulation.....	287
On-site measurements	273
Optimierung	55
Organischer Kohlenstoff (TOC)	307
Oven dried moisture content.....	161

P

PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe)	73, 313
Paper recyclability.....	167
Papiersäcke	147
Passive Schwachgasbehandlung	51
Petroleum	73, 313
PFAS	43
Planung.....	261
Planungstool.....	55
Plastic packaging.....	281
Plastic Recycling.....	361
Plastics	203
Polymer composites	343
Polypropylene grades	297
Polypropylene	275
Polyvinyl chloride	121

Post-consumer plastics.....	281
Praxis.....	365
Probenahme	209, 365
Probenaufbereitung und -analyse.....	231
Process safety	239
Process water	167
Processing methods	297
Prozessenergie.....	177
Psychrometric chart.....	161
PVC-Abfälle	217
Pyrolyse	89, 307

Q

Quarz	41
-------------	----

R

Raffinerie	73, 313
Raman spectroscopy	127
Räumlicher Bezugsbereich	95
Recycling	101, 121, 139, 227, 233, 245, 261, 277, 317, 343, 349, 371
Recyclinganteil.....	151
Recyclingfähigkeit.....	193
Recyclingquote	257
Recyclingziele	183
Regional life cycle assessment.....	335
Relevanter gefährlicher Inhaltsstoff	95
Resource efficiency	233
Ressourcen.....	251
Ressourceneffizienzsteigerung.....	79
Ressourcenschonung	115, 143, 225
Restlich oxidierbarer Kohlenstoff (ROC).....	307
Restmüll.....	227
Restmüllsplitting.....	227
Reststoffe.....	85
Re-Use Shop	115
Re-Use.....	199, 257
Re-Use-Bauteil	111
Re-Use-Herbst Steiermark.....	115
Re-Use-Landkarte Steiermark	115
Revitalisierung	67
Rezyklat	301
Risikomatrix	323
Riverine pollution	203
Röntgentechnik.....	349
Rückbau Gasbrunnen.....	51

S

Sammelsysteme	257
Sanierungserfolg.....	55
Schwellenländer	261

Sedimentationsbox	231
Sekundärrohstoff	41, 151
Sekundärzumahlstoff	79
Selbstentzündung	323
Self-reactive functional groups.....	239
Seltene Erden	41
Sensor-based Sorting	361
Separately collected waste	281
Sickerwasserbehandlung.....	43
Siedlungsabfall	157, 261
Slow crack growth resistance	275
Social LCA.....	335
Social Urban Mining.....	111
Sortierbarkeit	173
Sortierung	349
Sorting	121, 297
Standardisierung.....	301
Standardmaterial	157
Standortkontamination.....	67
Stoffinventar.....	95
Stoffliche Verwertung.....	151
Stufenmodell Recyclingfähigkeit.....	287
Sustainability.....	233
System Dynamics	187

T

Tailings	41
TCE	329
Technologie	261
TGA-DTA.....	89
Thermal Conduction Heating	63
Thermal runaway	239
Thermische Altlastensanierung.....	55
Thermische Verwertung.....	151, 331
Thermisches Verfahren	371
TiAlV-Legierungen.....	355
TOC	89
Total-reflux Destillationskolonne	355
Treibhausgasbilanz.....	177
Treibhauspotential	217

U

Übereinkommen von Paris.....	267
Umfrage	341
Umkehrosmose.....	43
Umweltinspektion.....	95
Umweltschutz	251
Unverpackt.....	211
Upcycling	85, 225

V

Verbrauchergruppen	341
Verbrennung	89
Verdunstungsleistung	147
Verhaltensänderung	133
Vermeidung	341
Vermüllung	251
Verpackungen	227
Verpackungsabfälle	183
Verpackungsdesign	173
Verpackungsgesetz	173
Verpackungsvermeidung	211
Verschlackung	331
Verwertung	85, 245, 301
Verwertungsorientierter Rückbau	111
Vorbereitung zur Wiederverwendung	111
Vorzerkleinerer	157

W

Waste management	203
Waste wood	121
Wertmetallrückgewinnung	79
White lead paint	121
Wiedernutzung	67
Wiederverwendung	111, 115, 199
Wind and solar energy	233

Z

Zementindustrie	151
Zementzusatzstoff	79
Zero Waste Konzepte	199
Ziegel	101



Bereits zum sechszehnten Mal trifft sich im November 2022 die abfallwirtschaftliche Community – endlich wieder persönlich – in Leoben. Die Recy & DepoTech ist einer der Fixpunkte im Reigen der wissenschaftlichen Konferenzen zu den Themen der 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, innovative Recyclingtechnologien und der Einsatz digitaler Methoden in der Abfallwirtschaft 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 2022 umfasst 140 Vorträge und 75 Poster. In diesem Konferenzband sind die qualitativ hochwertigen, redigierten, wissenschaftlichen Fachbeiträge der **POSTER** inklusive englischem Abstract zusammengefasst.