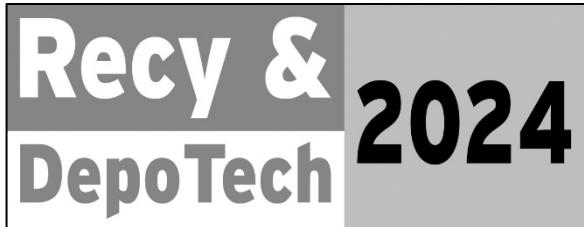


POSTER-Konferenzband
zur 17. Recy & DepoTech-Konferenz

13. - 15. November 2024
Montanuniversität Leoben, Österreich



Herausgeber

Roland Pomberger, Julian Aberger, Josef Adam, Ferozan Azizi, Therese Bouvier-Schwarz, Paul Demschar, Maximilian Enengel, Florian Feucht, Martin Findl, Elias Grath, Lisa Kandlbauer, Karim Khodier, Gerald Koinig, Thomas Kremlcka, Nikolai Kuhn, Tatjana Lasch, Karl E. Lorber, Thomas Nigl, Richard Nti, Bettina Ratz, Susanne Roßkogler, Cornelia Rutkowski, Bettina Rutrecht, Renato Sarc, Klaus Philipp Sedlazeck, Hana Stipanovic, Alexia Tischberger-Aldrian und Alena Vydrenkova



*Abfallverwertungstechnik
& Abfallwirtschaft*

EIGENVERLAG

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

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

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

© Copyright 2024

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
Hardeggasse 69, 1220 Wien, Österreich
Oktober 2024



ISBN: 978-3-200-09989-0

Inhalt

Vorwort Bundesministerin Leonore Gewessler	5
Vorwort Landeshauptmann Christopher Drexler	6
Vorwort Landesrätin Simone Schmiedtbauer	7
Vorwort Sektionschef Christian Holzer	8
Vorwort Bürgermeister Kurt Wallner	9
Vorwort Magnifizenz Peter Moser	10
Vorwort Ingrid Winter	11
Vorwort ÖWAV-Geschäftsführer Daniel Resch	12
Vorwort VOEB-Präsidentin Gabriele Jüly	13
Vorwort GTV-Geschäftsführer Bernhard Puttinger	14
Vorwort ISWA-Präsident Arne Ragossnig	15
Editorial Roland Pomberger	18
Organisation & Redaktion	21
Kooperationspartner	21
Wissenschaftliches Komitee	22
Ehrungen	24
Ehrenschutz	25
Förderungen & Firmenpartnerschaften	26
Inhaltsverzeichnis Poster	29
Index English abstracts of posters	33
Poster	37
English abstracts	255
Autorenverzeichnis	299
Sachregister	306



© BMK/Cajetan Perwein

Vorwort

Bundesministerin Leonore Gewessler

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

Die Montanuniversität Leoben hat mit der Recy & DepoTech eine beeindruckende Konferenz geschaffen.

In einer Zeit, in der die Auswirkungen des Klimawandels immer deutlicher spürbar werden, ist es unerlässlich, dass wir unsere Wirtschaft grundlegend neu denken. Die Kreislaufwirtschaft bietet dabei einen vielversprechenden Ansatz, um unsere Abhängigkeit von begrenzten Ressourcen zu reduzieren und gleichzeitig die Umweltauswirkungen unserer Produktions- und Konsummuster zu minimieren. So können wir nicht nur wertvolle Rohstoffe einsparen, sondern auch erhebliche Mengen an Treibhausgasemissionen vermeiden. Veränderung bedeutet aber auch den Mut aufzubringen, vertraute Wege zu verlassen und über den Tellerrand zu blicken. Die Recy & DepoTech fungiert hier seit Jahrzehnten als verlässliche Wegbegleiterin, die weit über die nächste Tagesetappe hinaus die richtigen Schritte aufzeigt. Eine effiziente Kreislaufwirtschaft, die diesen Namen wirklich verdient, geht weit über die Vorstellung von Abfallwirtschaft mit „ein bissel mehr Recycling“ hinaus. Das gesamtheitliche Kreislaufdenken und –handeln soll daher auf allen Ebenen mehr ins Bewusstsein gerückt werden, denn die Zukunft liegt in unserer Hand.

Das Programm der Recy & DepoTech beinhaltet die neuesten Forschungsergebnisse, holt Best Practice Beispiele vor den Vorhang und widerspiegelt einen Großteil der Herausforderungen, die es jetzt und künftig gemeinsam zu lösen gilt.

In diesem Sinne wünsche ich der Recy & DepoTech gutes Gelingen mit einem regen Austausch sowie folgend einen signifikanten Niederschlag bei allen Stakeholdern in der Kreislaufwirtschaft bis hin zu interessierten Bürger:innen.

Mit freundlichen Grüßen und einem herzlichen Glück Auf

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Leonore Gewessler".



© Maria Kanizai

Vorwort

Landeshauptmann Mag. Christopher Drexler
Steiermärkische Landesregierung

Sehr geehrte Damen und Herren!

Von 13. bis 15. November 2024 findet in Leoben mit der Recy & DepoTech bereits zum 17. Mal die größte Abfallwirtschafts- und Recyclingkonferenz Österreichs statt, bei der sich wieder drei Tage lang alles um Ressourcenschonung, Wiederverwertung und Abfallentsorgung dreht. Es freut mich daher sehr, Sie zur Recy & DepoTech in der Steiermark willkommen zu heißen.

Denn in der Steiermark wird der Forschung und dem technologischen Fortschritt ein ganz hoher Stellenwert eingeräumt. Als österreichisches Forschungsland Nummer 1 und eine der Regionen Europas mit der höchsten Forschungs- und Entwicklungsquote sind wir stolz darauf, dass immer wieder neue wissenschaftliche Erkenntnisse und Errungenschaften in der Steiermark begründet werden und regelmäßig Expertinnen und Experten aus den verschiedensten Bereichen in der Steiermark vereint werden, und den Ideenaustausch zwischen Wissenschaft und Wirtschaft voranzutreiben.

Gerade im Bereich des Umweltschutzes konnten in den letzten Jahren viele wissenschaftliche Fortschritte erzielt werden – zu dem auch die Recy & DepoTech immer wieder Wesentliches beigetragen hat. Ich möchte mich daher beim Organisationsteam rund um Univ.-Prof. Roland Pomberger und Konferenzorganisatorin Tanja Trieb recht herzlich für die erneute Initiative zur Ausrichtung der Recy & DepoTech bedanken. Mein Dank gilt aber auch allen Konferenzteilnehmerinnen und –teilnehmern, die Leoben drei Tage lang zum Innovationszentrum für Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement machen und wünsche erfolgreiche und erkenntnisreiche Tage in der Steiermark!

Ein steirisches „Glück auf“!

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Christopher Drexler". The signature is fluid and cursive, with a large, stylized 'C' at the beginning.



© Lebensressort

Vorwort

Landesrätin für Ressourcenmanagement und
Nachhaltigkeit Simone Schmiedtbauer
Steiermärkische Landesregierung

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

Als Vertreterin des Landes Steiermark freut es mich, sie zur diesjährigen „Recy & Depo Tech-Konferenz an der Montanuniversität Leoben begrüßen zu dürfen. Diese Veranstaltung ist ein wichtiger Meilenstein in unserer gemeinsamen Anstrengung, eine nachhaltigere Zukunft zu gestalten.

Die Montanuniversität Leoben hat seit jeher eine führende Rolle in der Entwicklung innovativer Technologien für die Rohstoffgewinnung und -verarbeitung inne. Mit der heutigen Konferenz unterstreichen wir einmal mehr unser Engagement für eine Kreislaufwirtschaft, in der Ressourcen effizient genutzt und Wertstoffe wiedergewonnen werden. Das Thema Recycling und Deponierung gewinnt angesichts der zunehmenden Ressourcenknappheit und der dringenden Notwendigkeit, unseren ökologischen Fußabdruck zu verringern, immer mehr an Bedeutung. Die Herausforderungen, denen wir uns stellen müssen, sind komplex und erfordern interdisziplinäre Lösungsansätze. Die Recy & Depo Tech Konferenz bietet eine hervorragende Plattform für den Austausch von Wissen und Erfahrungen zwischen Wissenschaftlern, Ingenieuren, Politikern und Vertretern der Industrie. Durch die Präsentation neuester Forschungsergebnisse und die Diskussion aktueller Trends können wir gemeinsam nach innovativen Lösungen suchen und Synergien schaffen. Besonders hervorheben möchte ich die Bedeutung der Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie. Nur durch eine enge Vernetzung können wir die Ergebnisse der Grundlagenforschung schnell in marktreife Produkte und Verfahren überführen.

Ich bin überzeugt, dass diese Konferenz einen wichtigen Beitrag dazu leisten wird, die Recycling- und Deponietechnologien weiterzuentwickeln und ihre Anwendung in der Praxis zu fördern. Ich wünsche Ihnen allen eine erfolgreiche Konferenz und ermutige Sie, die zahlreichen Möglichkeiten zum Networking und zum Austausch von Ideen zu nutzen!

Mit besten Grüßen

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Simone Schmiedtbauer".



Vorwort

Sektionschef Dipl.-Ing. Christian Holzer

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

Die weit über die Landesgrenzen hinaus wirkende "Schwerkraft" der Recy & DepoTech 2024 zieht wiederum mit einem breit angelegten Programm die gesamte Community an die Montanuniversität - quasi das temporäre "Schwarze Loch" der Circular Economy. Die enorme Dichte an hochkarätigen Vorträgen lässt einen intensiven Austausch von Wissenschaft und Praxis erwarten und knüpft damit nahtlos an den Mythos der Recy & DepoTech an - für akute Herausforderungen stets veritable Lösungsansätze zu liefern. Die Österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie rechtzeitig mit Leben zu erfüllen gilt als oberste Prämisse zur Erreichung der engagierten Klimaziele. Dieser gesamtwirtschaftliche Auftrag, der nur im Zusammenwirken aller Beteiligten erreicht werden kann, benötigt auch offene Plattformen auf höchstem Niveau, wie sie die Recy & DepoTech repräsentiert.

Sämtliche Schritte im Wertschöpfungskreislauf, beginnend bei der Produktion, über den Ressourceneinsatz, die Sicherung einer langen Gebrauchsfähigkeit, die Reparierbarkeit bis hin zur finalen Abfallbehandlung müssen zusammenspielen, um die hochgesteckten Ziele erreichen zu können. Am vorläufigen Ende wird jedenfalls auch mitentscheidend sein, wie mit ausgeklügelter Verfahrenstechnik als Schlüssel aus heterogenen Abfällen verwertbare Sekundärrohstoffe gewonnen werden können.

Neben den altbekannten Herausforderungen der Abfallwirtschaft drängen auch immer wieder akute Themen in das Rampenlicht. Der zunehmende Bodenverbrauch mit Verlust von lebensnotwendigem Ackerland, Versiegelung und Brachflächenthematik hat bereits zu veritablen Anstrengungen im BMK geführt, diesem negativen Trend entgegenzuwirken – mehrere Förderschienen wurden dazu etabliert. Daneben hat der PFAS-Hype unsere Alpenrepublik erreicht und gelangt zunehmend ins mediale Interesse. Die Challenge der "Ewigkeitschemikalien" wird uns aufgrund des universellen Einsatzes – gleich dem seinerzeitigen "Wundermaterial" Asbest – sicher noch geraume Zeit beschäftigen. Das sichere Ausschleusen von PFAS aus Grundwasser, Boden sowie aus dem Materialkreislauf steht im Fokus neuester Forschungsprojekte, die die Sünden von Vergangenheit und Gegenwart wieder in den Griff bekommen.

Die gesicherte Expertise dazu sowie zu allen anderen Fragen der Kreislaufwirtschaft bietet die Recy & DepoTech 2024. Ich wünsche der Veranstaltung einen fruchtbaren Wissentransfer und starke Impulse für eine erfolgreiche Kreislaufwirtschaft.

Mit freundlichen Grüßen sowie einem kräftigen Glück Auf



© Freisinger

Vorwort

Kurt Wallner

Bürgermeister der Stadt Leoben

Sehr geehrte Damen und Herren,
geschätzte Tagungsteilnehmer:innen!

Vor einigen Jahren erhielten viele der Themen, die im Rahmen der *Recy & Depo Tech* behandelt werden, nur wenig Aufmerksamkeit. Heute jedoch steht nachhaltiges und wirtschaftliches Handeln im Mittelpunkt und Abfälle werden als wertvolle Ressource betrachtet. Dies setzt jedoch voraus, dass sie effizient und korrekt gesammelt, aufbereitet und wiederverwertet werden. Die 17. Auflage der *Recy & Depo Tech* setzt sich mit Kreislaufwirtschaft und dem Beitrag der Abfallwirtschaft dazu sowie Künstlicher Intelligenz (KI) und Digitalen Methoden in der Abfall- und Recyclingtechnologie auseinander und leistet somit einen wertvollen Beitrag zur Verwirklichung abfallwirtschaftlicher Ziele.

Es freut mich besonders, dass Leoben erneut Gastgeber für mehr als 500 Kongressteilnehmer:innen sein darf. Die Vielzahl an internationalen Fachleuten unterstreicht nicht nur die Bedeutung der Veranstaltung, sondern spiegelt auch die Vorreiterrolle der Montanuniversität in den Bereichen Umweltschutz, Abfallverwertungstechnik und Recycling wider. 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 2024* einen erfolgreichen Verlauf und spannende Diskussionen.

Ein Leobener Glück auf!



Vorwort

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

Rektor der Montanuniversität Leoben

Sehr geehrte Teilnehmer:innen und Gäste der Recy & DepoTech 2024!

Auf den Punkt gebracht geht es in der Kreislaufwirtschaft darum: „Möglichst viel Material so lange wie möglich im Kreislauf halten“ oder anders ausgedrückt: „Die Rohstoffe in unseren Produkten so lange wie möglich zu nutzen!“

Bei der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft haben Forschung und Lehre an der Montanuniversität eine bedeutende Rolle erlangt. Wir arbeiten daran, Technologien zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft zu entwickeln. Es geht dabei um Zirkularitätstechnologien, also um technische Lösungen für nachhaltige Produkte zu entwickeln, z.B. auf Basis von Hochleistungswerkstoffen und effizienten und umweltschonenden Produktionsverfahren, in denen die Rohstoffe in unseren Produkten möglichst lange genutzt werden können.

Und doch wird am Ende jedes Produkt zu Abfall. Und dann brauchen wir umweltschonende Recyclingverfahren um aus unseren Abfällen Sekundärrohstoffe zu gewinnen, die wieder in den Kreislauf gehen und dort primäre Rohstoffe ersetzen können. Recycling ist an der Montanuniversität nicht an einem Lehrstuhl angesiedelt, sondern hat sich zu einer Querschnittsmaterie entwickelt. Es laufen aktuell etwa 100 Forschungsprojekte, die dem Bereich der Kreislaufwirtschaft zugeordnet werden können. Ja ich kann feststellen: Die Montanuniversität ist auch zu einer Recyclinguniversität geworden.

Mehrere Studienrichtungen wurden eingerichtet, die Ingenieure ausbilden sollen, die Technologien und technische Lösungen für die Kreislaufwirtschaft entwickeln und betreiben können. Unsere Studenten der Studienrichtungen „Umwelt und Klimaschutztechnik“, „Recyclingtechnik“ sowie der englisch sprachigen Studien „Circular Engineering“ und „Responsible Consumption and Production“ werden auf die Aufgaben in der Kreislaufwirtschaft bestens vorbereitet. Auf den ingenieursspezifischen Grundlagen bauen wir eine spezialisierte Ausbildung auf, die unsere Absolventen zu innovativen Problemlösern in der Kreislaufwirtschaft machen wird.

In diesem Sinne ist die Recy & DepoTech an der Montanuniversität zu einem Kristallisierungspunkt für Recycling, Abfall- und Kreislaufwirtschaft geworden.

Ich wünsche Ihnen erfolgreiche und inspirierende Tage an der Montanuniversität Leoben

Ein herzliches Glückauf

Peter Moser



Vorwort

Mag.ret.nat. Dr.techn. Ingrid Winter

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

Dass die rasche Umsetzung einer ressourceneffizienten und schadstofffreien Kreislaufwirtschaft unter Anwendung der Abfallhierarchie dringend notwendig ist, wie beispielsweise auch im aktuellen, achten Umweltaktionsprogramm der Europäischen Union betont wird, steht für das Fachpublikum außer Zweifel. Die Erreichung dieses Ziels erfordert innovative, kooperative und bereichsübergreifende Ansätze unter Einbindung aller Bereiche, von der Wissenschaft und Forschung über die Wirtschaft in allen Facetten bis hin zur Gesellschaft und Verwaltung.

Die Fachtagung Recy & DepoTech beweist seit vielen Jahren, dass sie die Plattform für jenen fachlichen Austausch ist, der als wesentliche Grundlage für das Generieren zukunftsweisender Ansätze gilt. Die Recy & DepoTech beindruckt auch heuer wieder mit einer Vielzahl an topaktuellen Themen aus den unterschiedlichen Blickwinkeln der Abfall- und Kreislaufwirtschaft; neben dem Fokus auf Forschungsergebnisse werden Praxiserfahrungen, Rahmenbedingungen und Zukunftstechnologien diskutiert. Von besonderer Bedeutung aus Sicht der öffentlichen Verwaltung sind die Chancen und Potenziale, die sich aus den Ergebnissen der Konferenzbeiträge für eine beschleunigte Umsetzung der Kreislaufwirtschaft ableiten lassen und zur Weiterentwicklung der bestehenden Strategien und Umsetzungspläne beitragen können.

Ich bedanke mich herzlichst bei Herrn Prof. Pomberger und seinem Team für das große Engagement, die professionelle Abwicklung und die ansprechende Rahmengestaltung der heurigen Konferenz und wünsche allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern interessante Einblicke und anregende Fachgespräche.



Vorwort

Herr GF DI Dr. Daniel Resch

Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
(ÖWAV)

Bereits Anfang April haben wir in Österreich den Earth Overshoot Day erreicht. Der Earth Overshoot Day ist der Tag, an dem die Ressourcen, die eigentlich bis Ende des Jahres reichen sollten, aufgebraucht sind. Auch global betrachtet verbrauchen wir viel zu viele Ressourcen. Trotzdem steigt der globale Ressourcenverbrauch weiter. Unverändert ist auch der Wandel des Verbrauches von erneuerbaren zu nicht-erneuerbaren Rohstoffen.

Einen wichtigen Beitrag dieser Entwicklung entgegenzuwirken kann dabei die Abfallwirtschaft leisten. Durch Recycling von Abfällen können Sekundärrohstoffe gewonnen und dadurch der Verbrauch von Primärrohstoffen verringert werden. Gleichzeitig ist es auch erforderlich unser derzeitig linear ausgerichtetes Wirtschaftssystem hin zu einer Kreislaufwirtschaft umzubauen. Bestehende Materialien und Produkte sollen dabei so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt werden. Auch hierbei ist die Abfallwirtschaft ein wichtiger Bestandteil der Umsetzung.

Soll die Umgestaltung unseres Wirtschaftssystems hin zu einer Kreislaufwirtschaft gelingen ist eine verstärkte Zusammenarbeit aller Stakeholder unbedingt erforderlich. Grundlage hierfür bilden auch Forschungsinitiativen sowie Veranstaltungen wie die Recy & DepoTech.

Auch wir als Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV) wollen hier als Netzwerkplattform für den Informations- und Wissensaustausch unseren Beitrag leisten.

Ich diesem Sinne danke ich dem Organisationsteam um Prof. Pomberger für die langjährige, großartige Arbeit und wünsche allen Teilnehmern eine spannende Veranstaltung mit vielen interessanten Diskussionen.

Glückauf!

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Daniel Resch". The signature is fluid and cursive, with a large, stylized "D" at the beginning.



Vorwort

Präsidentin Gabriele Jüly

VOEB – Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe

Unsere Abfall- und Ressourcenbranche hat sich in den letzten Jahrzehnten von einer reinen Entsorgungswirtschaft zu einer umfassenden Ressourcenwirtschaft entwickelt. Früher lag der Schwerpunkt auf der Beseitigung von Abfällen, heute hingegen erzeugen Unternehmen der Ressourcenwirtschaft wertvolle Sekundärrohstoffe aus Abfällen, die wiederum die Industrie beliefern. Verlässliche Rahmenbedingungen und das Einbeziehen der Abfall- und Ressourcenwirtschaft sind daher unabdingbar, damit die Branche auch weiterhin die zentrale Rolle in der Erreichung der EU Recycling- und Klimaziele erfüllen kann.

Seit 1990 verzeichnet die Abfallwirtschaft den größten sektoriellen Rückgang an CO₂-Emissionen. Die Branche hat die von ihr verursachten Treibhausgasemissionen um die Hälfte reduziert, nämlich von 4,7 auf 2,2 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent. Hinsichtlich Sammlung & Verwertung von Abfällen ist Österreich im internationalen Vergleich führend und erreicht bereits heute die für 2025 gesetzten EU-Ziele beim Recycling von Papier, Metallen, Glas und Verpackungen.

Nicht nur der Übergang von einer linearen zu einer zirkulären Wirtschaft ist von Bedeutung, sondern auch die Menschen, die diese Transformation ermöglichen. Seit einigen Jahren ist der Ruf nach zukünftigem Fachpersonal in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft immer lauter geworden. Es ist daher entscheidend, Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten anzubieten und zu fördern, um dem Fach- & Arbeitskräftemangel frühzeitig entgegenzuwirken. Gemeinsam mit wichtigen Stakeholdern wurde der Lehrberuf "Entsorgungs- und Recyclingfachkraft" etabliert, um eine Grundlage zu schaffen. Darüber hinaus hat der VOEB mit seinem Circular Economy Traineeprogramm eine weitere Möglichkeit geschaffen, Menschen für die Abfall- und Ressourcenbranche zu begeistern. Auch die VOEB Umweltwochen, bei der Mitgliedsunternehmen ihre Türen für Schulklassen öffnen, tragen dazu bei, Jugendlichen die Kreislaufwirtschaft näherzubringen. Es ist essenziell, das Bewusstsein bereits in jungen Jahren zu fördern. Eine enge Zusammenarbeit aller Akteure ist dabei unerlässlich – nur so kann Österreich eine funktionierende Kreislaufwirtschaft sicherstellen, die für das Erreichen der Klimaziele unabdingbar ist.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Gabriele Jüly".



Vorwort

Geschäftsführer Bernhard Puttinger

Green Tech Valley Cluster GmbH

Die Umwelttechnik-Branche steht derzeit gleichermaßen vor Herausforderungen, und Chancen: geopolitischen Verschiebungen, weniger wachsender Konjunktur und hohen Energiekosten stehen Chancen wie Transformation hin zur Kreislaufwirtschaft, quantitativen Zielen und Strategien sowie enorme Potenziale für Sekundärrohstoffe in Primärqualität gegenüber.

Die Branche reagiert mit Innovation. Digitalisierung und künstliche Intelligenz spielen eine immer größere Rolle bei der Optimierung von Recyclingprozessen. Neue Technologien verbessern die Effizienz und Genauigkeit in der Abfallverwertung und sind gerade in Zeiten hoher Energiepreise und zunehmender regulatorischer Anforderungen von großer Bedeutung.

Im Green Tech Valley, dem Süden Österreichs, arbeiten über 300 Unternehmen und Forschungseinrichtungen intensiv daran, zukunftsweisende Lösungen für diese Herausforderungen zu entwickeln. Ihre Arbeit reicht von der effizienten Sammellogistik über fortschrittliche Sortier- und Aufbereitungstechnologien bis hin zur Produktion hochwertiger Recycling-Rohstoffe. Diese Bemühungen sind essenziell, um den Übergang zu einer kreislauforientierten Wirtschaft zu beschleunigen.

Die Recy & DepoTech bietet eine einzigartige Plattform, um diese innovativen Ansätze zu präsentieren und den Austausch zwischen führenden Köpfen der Branche zu fördern. Dank des Engagements des Teams rund um Roland Pomberger wird diese Konferenz jedes Jahr zu einem Ort des Wissens, der Inspiration und der Zusammenarbeit.

Lasst uns diese Gelegenheit nutzen, um gemeinsam neue Ideen zu entwickeln und die Transformation weiter zu beschleunigen. Mit Innovationen diese Chancen realisieren und Herausforderungen meistern. Gemeinsam wachsen grüne und kreislauffähige Innovationen.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "je Puttner".



Vorwort

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

Mit dem Thema Kreislaufwirtschaft und der neuen Dynamik, die sich hier ergibt, gewinnen Plattformen des Austausches zwischen unterschiedlichen Stakeholdern in der Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft zunehmend an Bedeutung.

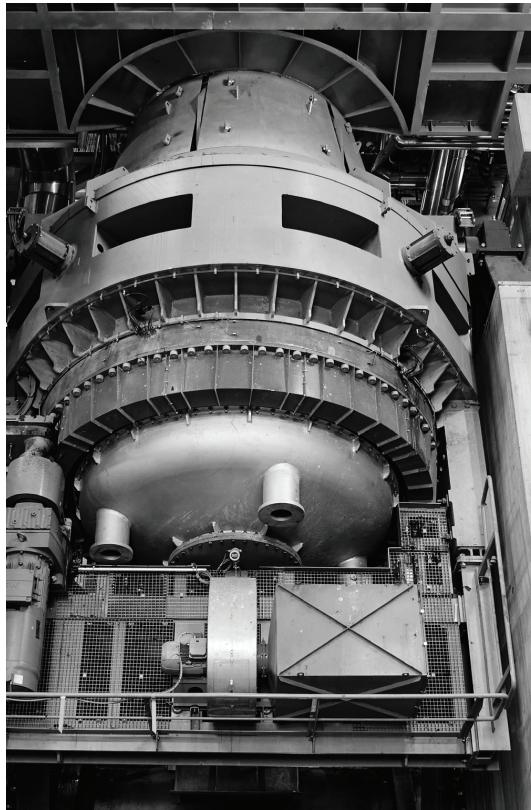
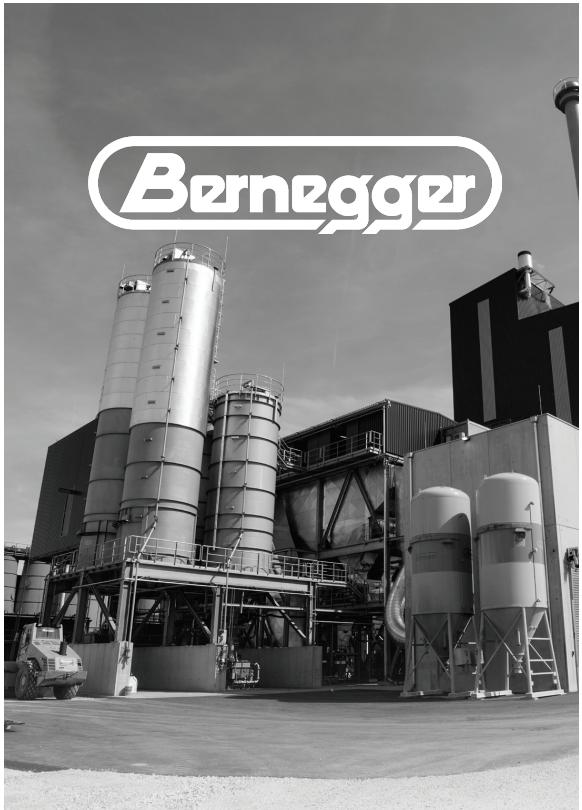
Kreislaufwirtschaft braucht den Austausch zwischen Akteuren des produzierenden Sektors, der Logistik, der Wissenschaft und des Vollzugs sowie von Akteuren der Abfall- und Ressourcenwirtschaft um technisch mögliche, wirtschaftlich machbare und rechtskonforme Kreislaufwirtschaftslösungen unter Berücksichtigung internationaler völkerrechtlicher Verpflichtungen auf den Weg zu bringen.

Eine wesentliche Herausforderung in diesem Zusammenhang besteht unter anderem auch im Finetuning unterschiedlicher Rechtsmaterien, die oft isoliert voneinander in den letzten Jahrzehnten entstanden sind, und sich heute teilweise widersprechen und somit einer sinnvollen und für die beteiligten Akteure rechtskonformen Umsetzung der Kreislaufwirtschaft entgegenstehen. Verbesserungen und Weiterentwicklungen des wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmens für derartige Lösungen erfordern zu allererst die Bereitschaft sich auf die teils schwierigen Details einzulassen und den übrigen Stakeholdern zuzuhören um gemeinsam Ansätze für eine praktikable Umsetzung der Kreislaufwirtschaft zu erarbeiten.

Sowohl ISWA als auch die Recy & DepoTech haben sich in den letzten Jahrzehnten bereits als effektive Plattformen für den diesbezüglichen Austausch etabliert und insofern freut es uns in diesem Jahr besonders, dass wir als ISWA bzw. ISWA Austria im Rahmen der Recy & DepoTech einen gemeinsamen Work-Shop mit der International Waste Working Group zum Thema Umsetzung der Internationalen Plastic Treaty gestalten dürfen. Dieser Workshop, der den Materialkreislauf des Werkstoffs Kunststoff adressiert, soll sich auf die Umsetzung und Implementierung der gerade in diesen Tagen vor der Finalisierung stehenden Global Plastics Treaty beziehen und einen Beitrag dazu leisten, die für die unterschiedlichen Sektoren und regionalen Settings relevanten Werkzeuge der Implementierung herauszuarbeiten.

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

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Arne M. Ragossnig".



SMART RECYCLING

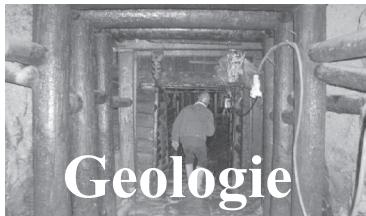
Ein schonender Umgang mit den Ressourcen ist für uns wesentlich!

WWW.BERNEGGER.AT



Bernegger GmbH | Gradau 15, 4591 Molln
office@bernegger.at | +43 (0) 7584 304 1-0

Kompetenz in ...



Geologie

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



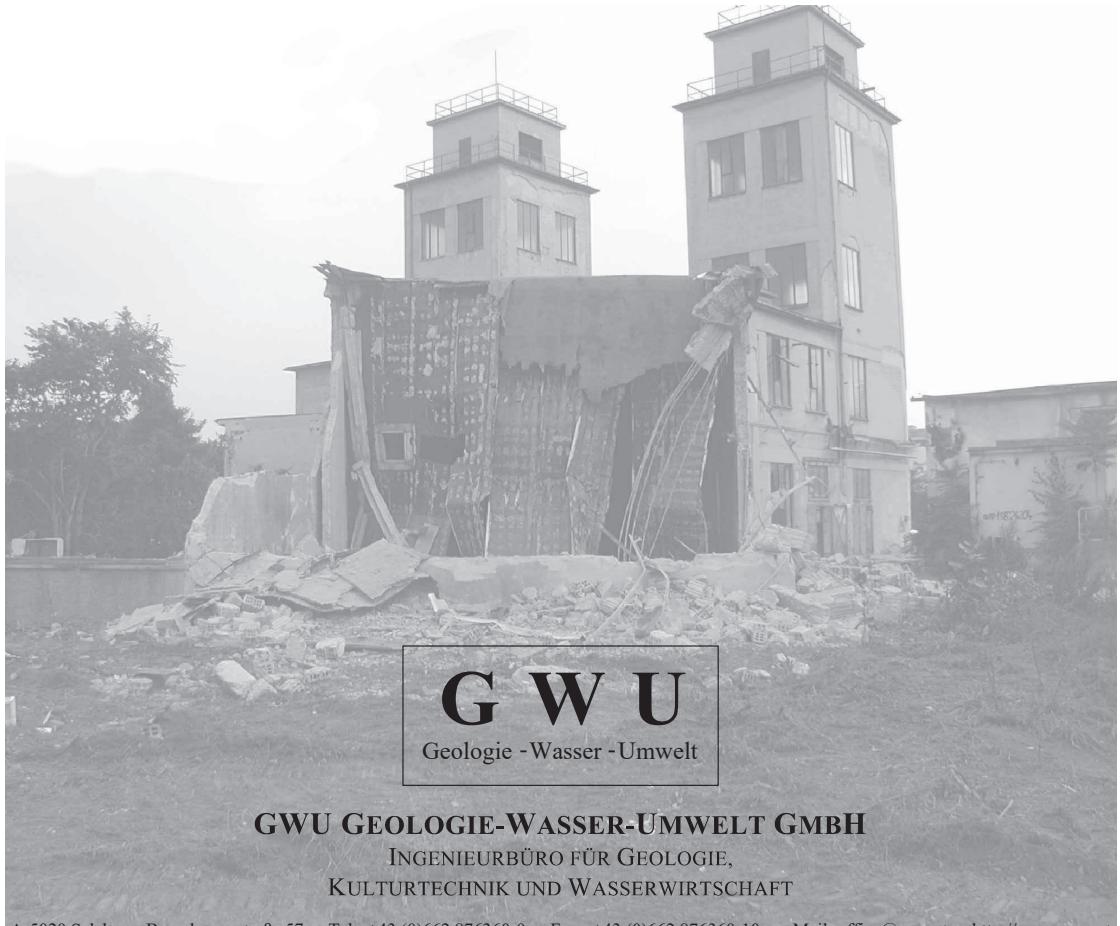
Wasser

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



Umwelt

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



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



Editorial

Professor Roland Pomberger

Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
der Montanuniversität Leoben

Ein herzliches Leobener Glückauf zur Recy & DepoTech 2024!

Zum siebzehnten Mal trifft sich im November 2024 die abfallwirtschaftliche Community - endlich wieder persönlich - in Leoben. Die Recy & DepoTech ist einer der Leuchttürme der wissenschaftlichen Konferenzen zu den Themen der Kreislauf- und Abfallwirtschaft.

Rückblick auf 2022:

Vor 2 Jahren war die Recy & DepoTech eine der ersten Konferenzen NACH CORONA. Es war spürbar wie erleichtert alle Teilnehmer:innen waren wieder physisch an einer Konferenz und dem Austausch mit Kolleg:innen teilnehmen zu können. Es war wirklich spürbar wie die Teilnehmer:innen die (neu gewonnene) Kommunikation genossen und sich höchst aktiv an der Konferenz beteiligten.

Ausblick:

163 Vorträge und 46 Poster werden präsentiert. Firmen werden sich wieder an Messeständen präsentieren. Unser RE-USE-KAFFEEHAUS ist wieder Fixpunkt. Und wir wissen aus vielen Gesprächen: Der persönliche Kontakt und Austausch der Teilnehmer:innen ist einer der wichtigsten Gründe für die Teilnahme.

Zum Inhalt:

Kreislaufwirtschaft ist das große Thema. Aber natürlich bleibt die Abfallwirtschaft ein zentraler Kern der Kreislaufwirtschaft. ReUse, Repair, ReManufacturing etc. sind sinnvoll und müssen gefördert werden, aber am Ende gilt der Hauptsatz der Abfallwirtschaft „Jedes Produkt wird Abfall – Es ist nur eine Frage der Zeit!“. Und damit ist die Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft im Rahmen der Kreislaufwirtschaft weiterhin eine zentrale Aufgabe. Neue Ansätze, neue Geschäftsmodelle, neue Stoffströme, neue Verfahren, neue Technologien und neue Anlagen sind die Themen dieser Recy & DepoTech.

Unser Programm:

Unsere vortragenden Expert:innen 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 und der Einsatz der Künstlichen Intelligenz (KI) 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 Textilien und speziellen industriellen Reststoffen.

Die Ergebnisse des größten österreichischen Abfallforschungsprojektes Kompetenzzentrum ReWaste F werden in mehreren Sessions sowohl durch die wissenschaftlichen Partner:innen als auch durch Unternehmen präsentiert. Gemeinsam mit der ISWA findet ein internationaler Workshop statt.

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 2024 vorgestellt.

Ihr Beitrag:

Die Recy & DepoTech wird von den aktiven Konferenzteilnehmer:innen gestaltet. Der Erfolg wird getragen von Programmgestalter:innen, Referent:innen, Chairperson, Diskutant:innen und Teilnehmer:innen. 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 Expert:in aus Forschung, Wirtschaft und Verwaltung. WIR sind die Abfallwirtschaft und WIR sind der Kern der Kreislaufwirtschaft! Ich wünsche Ihnen und uns eine erfolgreiche Recy & DepoTech 2024.

Mit herzlichem Glückauf!

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Stephan Pöhl'.



Oberflächenabdichtung

Ziel der Sicherung ist eine Abdichtung der verbliebenen Ablagerungen gegenüber Luft und Grundwasser. Diese behördlich aufgetragene Sicherungsmaßnahme enthält neben den Maßnahmen im Grundwasser ein innovatives, mehrlagiges und multifunktionales Oberflächenabdichtungssystem:

- 11 kg/m² Calciumbentonitmatte (NaBento RL-C)
- Geoverbundstoff mit 2 kg/m² Aktivkohlefüllung (Tektoseal Active AC)
- LDPE Membran mit integrierter CKW-dichter Aluminiumfolie
- Dränelement



Ihr Ansprechpartner in Österreich:

Herbert Lassnig

Tel.: + 43 (0) 664 / 435 25 39 | Mail: herbert.lassnig@HUESKER.at

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

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

Wissenschaftliches Komitee

A

Helmut Antrekowitsch, Montanuniversität Leoben, Österreich

B

Rupert Baumgartner, Universität Graz, Österreich

Alberto Bezama, Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Deutschland

Anke Bockreis, Universität Innsbruck, Österreich

D

Christina Dornack, Technische Universität Dresden, Deutschland

E

Martin Eisenberger, Eisenberger & Offenbeck Rechtsanwalts GmbH, Österreich

F

József Faitli, Universität Miskolc, Ungarn

Martin Faulstich, Technische Universität Dortmund, Deutschland

Johann Fellner, Technische Universität Wien, Österreich

Helmut Flachberger, Montanuniversität Leoben, Österreich

Sabine Flamme, Fachhochschule Münster, Deutschland

G

Stefan Gäth, Justus-Liebig-Universität Gießen, Deutschland

Evangelos Gidarakos, Technical University of Crete, Griechenland

Daniel Goldmann, Technische Universität Clausthal // IFAD, Deutschland

Kathrin Greiff, RWTH Aachen, Deutschland

H

Soraya Heuss-Aßbichler, Ludwig-Maximilians-Universität München, Deutschland

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

Gernot Kreindl, Stadtgemeinde Leoben, Österreich

Rainer Kronberger, Magistrat der Stadt Wien, Österreich

L

David Laner, Universität Kassel, Deutschland

Markus Lehner, Montanuniversität Leoben, Österreich

M

Mario Mocke, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Deutschland

N

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

Q

Peter Quicker, RWTH Aachen, Deutschland

R

Arne Ragossnig, RM Umweltkonsulenten ZT GmbH // ISWA Austria, Österreich

Harald Raupenstrauch, Montanuniversität Leoben, Österreich

Helmut Rechberger, Technische Universität Wien, Österreich

Karl Reiselhuber, Magistrat der Stadt Wien, Österreich

Daniel Resch, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Österreich

Gerhard Rettenberger, Hochschule Trier, Deutschland

Marco Ritzkowski, HiiCCE - Hamburg Institute for Innovation, Climate Protection and Circular Economy GmbH, Deutschland

Vera Susanne Rotter, Technische Universität Berlin, Deutschland

S

Liselotte Schebek, Technische Universität Darmstadt, Deutschland

T

Stephanie Thiel, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Deutschland

U

Olga Ulanova, Technische Universität Irkutsk, Russland

V

Daniel Vollprecht, Universität Augsburg, Deutschland

W

Ingrid Winter, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Österreich

Werner Wruss, ESW Consulting Wruss ZT GmbH, Österreich

Z

Michael Zorzi, Bundesaltlastensanierungsgesellschaft 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:

Univ.-Prof. DI Dr. Marion Huber-Humer (Jahrgang 1971) ist Professorin an der Universität für Bodenkultur Wien und leitet dort seit 2011 das Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft. Sie hat selbst ihre akademische Ausbildung an der BOKU absolviert, hat 2005 im Bereich Kulturtechnik und Wasserwirtschaft promoviert und sich 2015 für den Fachbereich „Globale Abfallwirtschaft“ habilitiert, mit Forschungsschwerpunkten im Bereich der Deponietechnik, des Emissionsmonitorings und der biotechnischen Reduktion von treibhauswirksamen Methanemissionen aus abfallwirtschaftlichen Prozessen. Dafür sowie für die Initiierung der Forschungsarbeiten zum Thema „Nano-Waste“ (Abfälle, die von Produkten und Materialien mit Nanotechnologischer Modifizierung stammen) wurde sie 2015 zur „Österreicherin des Jahres im Bereich Wissenschaft und Forschung“ gewählt. Sie war und ist immer wieder auch als Gastprofessorin an ausländischen Universitäten aktiv (z.B. an der UNALM in Lima, der UNICA Cagliari und der Perm National Research Polytechnic University) und ist vertreten in diversen nationalen und internationalen Gremien, wie u.a. im Managing Board der International Waste Working Group (IWWG) und als Vizepräsidentin der ISWA Austria. Mit Frau Prof. Huber-Humer und der BOKU pflegt das Recy&DepoTech Team und der Lehrstuhl enge Kooperation in verschiedenen gemeinsamen Forschungsprojekten.

Prof. Dr.mont. Michael Nelles (geboren 1066) ist seit 2006 Professor, Inhaber des Lehrstuhls für Abfall- und Stoffstromwirtschaft der Universität Rostock in Deutschland und leitet seit 2012 das Deutsche Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ) in Leipzig. Mit der Montanuniversität verbindet er den Beginn und die Basis seiner wissenschaftlichen Laufbahn. Gemeinsam mit Prof. Lorber baute er von 1994 bis 2000 als Stellvertretender Leiter das Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik an der Mintanuniversität auf. 1998 promovierte er mit Auszeichnung zum Dr. mont., Fachgebiet Industrieller Umweltschutz und Recycling. Unzählige Mitgliedschaften, Auszeichnungen und Publikationen zeichnen seine wissenschaftliche Arbeit aus. Er ist (Mit)Herausgeber von mehr als 100 Fachbüchern und Tagungsbänden, Autor von rund 500 Beiträgen in Büchern und Fachzeitschriften und Vortragender von mehr als 500 Fachvorträgen. Schwerpunkte seiner fachlichen Arbeit sind Umwelttechnik und Erneuerbare Energien mit den Schwerpunkten: technische, ökologische und ökonomische Aspekte der mechanischen, biologischen und energetischen Verwertung von Abfällen und Biomasse. Besonders hervorzuheben ist seine Gastprofessor an der Anhui Universität in Hefei (VR China), Prof. Nelles gilt als der Experte für Abfallwirtschaft in China. Mit der Recy&DepoTech und dem Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft verbindet ihn nicht nur die gemeinsame Geschichte sondern auch freundschaftlicher und reger Austausch.

Dipl.-Ing. Dr. Michael Zorzi wurde 1959 in Wien geboren und absolvierte von 1977 bis 1984 das Studium der Kulturtechnik und Wasserwirtschaft an der Universität für Bodenkultur in Wien. 1989 erfolgte seine Dissertation. Nach einer zweijährigen Tätigkeit am Umweltbundesamt wechselte er in die Bauwirtschaft zur PORR Umwelttechnik AG und baute dort die erste österreichische Bodenwaschanlage auf. Auch das Projektmanagement einer der größten österreichischen Altlasten, der Fischer Deponie, zählt zu seinen Referenzen. Seit 2005 ist Dr. Zorzi Geschäftsführer der Bundesaltlastensanierungsges.m.b.H. (BALSA GmbH) und verantwortet u.a. die Sanierung der größten österreichischen Altlastensanierung, der N6 in Wiener Neustadt. Seit 1995 gibt er sein theoretisches und praktisches Wissen als Lektor weiter an Studierende Montanuniversität Leoben. Für die langjährige Zusammenarbeit und Lehre bedanken wir uns mit der Ehrenmitgliedschaft.

Ehrenschutz

Leonore GEWESSLER

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

Christopher DREXLER

Landeshauptmann der Steiermark

Simone SCHMIEDTBAUER

Landesrätin für Land- und Forstwirtschaft einschl. land- und forstwirtschaftlicher Schulen, Wohnbau, Wasser- und Ressourcenmanagement, Veterinärwesen sowie Gesellschaft

Christian HOLZER

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

Kurt WALLNER

Bürgermeister der Stadt Leoben

Peter MOSER

Magnifizenz der Montanuniversität Leoben

Ingrid WINTER

Amt der Steiermärkischen Landesregierung

Daniel RESCH

Geschäftsführer des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes

Gabriele JÜLY

Präsidentin des Verbandes Österreichischer Entsorgungsbetriebe

Bernhard PUTTINGER

Geschäftsführer der Green Tech Valley Cluster GmbH

Arne RAGOSSNIG

Präsident der International Solid Waste Association

Förderungen & Firmenpartnerschaften

Förderstellen

Amt der Steiermärkischen Landesregierung - Abteilung 12 - Referat Wissenschaft und Forschung

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

Amt der Steiermärkischen Landesregierung - Landesamtsdirektion - Referat Protokoll und Auszeichnungen

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

Stadtgemeinde Leoben

Gold-Firmenpartner

Bernegger GmbH

GWU Geologie-Wasser-Umwelt GmbH

HUESKER Synthetic GmbH

RM Umweltkonsulenten ZT GmbH

Siemens AG Österreich

STADLER Anlagenbau GmbH

Silber-Firmenpartner

Breitenfeld Edelstahl AG

PORR Umwelttechnik GmbH

Saubermacher Dienstleistungs AG

Servus Abfall Dienstleistungs GmbH

Mittagsbuffet-Firmenpartner

Binder+Co AG

KIAS Recycling GmbH

Bronze-Firmenpartner

Alpacem Zement Austria GmbH

ARAPlus GmbH

Brantner Österreich GmbH

Bundesaltlastensanierungsgesellschaft m.b.H.

EWP Recycling Pfand Österreich gGmbH

FCC Austria Abfall Service AG

Geocycle

Holding Graz

OMV Downstream GmbH

TÜV SÜD

Messestände

ARP Aufbereitungs,- Recycling- und Prüftechnik GmbH
Komptech GmbH
Niederhuber & Partner Rechtsanwälte GmbH
POWPRO GmbH
SAMsoric
SCANTEC
Steyr Automotive GmbH
Vecoplan AG
voestalpine High Performance Metals GmbH
Wanggo Gummitechnik GmbH

Ingenieurdienstleistungen für Umweltschutz mit Mehrwert

www.umweltkonsulenten.at



Die
Umwelt
Konsulenten

Inhaltsverzeichnis Poster

The LIB Recycling Challenge – Pathways Achieving Efficiency Rates <i>Cornelia Rutkowski, Bettina Rutrecht, Astrid Arnberger, Thomas Nigl, Robert Hermann & Roland Pomberger</i>	39
Untersuchungen zur Verwertung carbonfaserhaltiger Abfälle im Zementwerk (EVCAZ) <i>Isabel Kaphahn & Kirsten Stark</i>	45
Prüfung der Einführung einer Pfandpflicht für Lithium-Batterien <i>Ralf Brüning & Florian Witt</i>	49
Anteil an für die getrennte Sammlung vorgesehenen Alttextilien im Restmüll <i>Lisa Tatschl, Hana Stipanovic & Alexia Tischberger-Aldrian</i>	55
Mobility Modular Load Carriers: Entwicklung modularer Mehrwegladungsträger für die Zugbauindustrie <i>Daniel Orth, Kevin Kaltenbrunner, Christian Pladerer & Georg Vinzenz</i>	59
A web-based tool to apply the UNFC for the assessment and classification of anthropogenic resource recovery projects as a basis for decision-making <i>Bhagya Jayasinghe, Iman Dorri, Alireza Sobouti, Juan Antonio Munizaga-Plaza & Soraya Heuss-Aßbichler</i>	63
Bewertung von Kunststoffzyklen hinsichtlich DNA-reaktiver Mutagenität mit in vitro Bioassays <i>Elisabeth Pinter, Elisa Mayrhofer, Jessica Schlossnikl, Veronica Osorio Piniella & Vasiliki-Maria Archodoulaki</i>	69
Circular-Economy-Ansätze für Kunststoff-Außenwerbungsplakate <i>Paul Steiner, Nicole Lasslop, Fabian Weller, Maximilian Auer, Jannick Schmidt & Jörg Woidasky</i>	73
The Role of Temporary Material Hubs and Final Sinks in Circular Economy <i>Romana Kopecká, Marlies Hrad & Marion Huber-Humer</i>	79
Digitaler Produktpass als Qualitätszertifikat und für die Nachverfolgbarkeit von Produkten und Materialien <i>Michael Krisper</i>	85
Mehrweg-Bouteille – Konzeption und Einführung eines Mehrweg-Systems für die 0,75-Liter-Weinflasche in Österreich <i>Victoria Menedetter & Christian Pladerer</i>	91
Post-war waste management in the Ukraine <i>Olena Hanoshenko & Marion Huber-Humer</i>	95

Verunreinigungen auf in der Papierindustrie gelaufenen Pressfilzen <i>Alexia Tischberger-Aldrian, Karin Schinner, Nicole Weber, Ivica Duretek, Klaus Haiden, Birthe Denneler & Jan Freudenberg</i>	103
Abbau von PFAS durch nicht-thermisches Plasma in einem Blasensäulenreaktor <i>Jan Back, Rania Bakry, Johanna Freilinger, Maria Fürhacker, Sebastian Handl, Claudia Hledik, Simon Jaborník, Marc Koch, Jana Marx, Madeleine Larch, Thomas Obholzer, Maximilian Pupp, Marco Rupprich & Martin Spruck</i>	109
Stilllegung und Rekultivierung von Deponien mit geringem Gefährdungspotential im Land Brandenburg <i>Ulrich Stock & Roman Dinslage</i>	113
Geruchsverbesserung von PCR-Rezyklat <i>Peter Clemenz, Martin Sturm & Maria Schäfer</i>	119
The Role of Circular Economy in Industry 5.0 <i>Susanne Roßkogler</i>	125
Neue Verbundwerkstoffe aus Biopolymeren und regionalen Naturfasern – ein zukunftsträchtiges Material? <i>Anett Kupka, Marc Krech & Maria Schäfer</i>	129
Viable recycling approaches to electrolyser stacks <i>Richard Yaw Nti, Thomas Nigl, Hannah Aster, Lukas Zeilerbauer & Marianne Kapp</i>	135
Kunststofftransformation im Zuge der Kompostierung <i>Josef Adam, Jessica Brantner, Verena Schmid, Martin Wellacher, Cornelia Riegler & Franz Poschacher</i>	139
Einfluss der Behandlung im Rahmen der Nutzungsphase auf verschiedene Eigenschaften von Textilien <i>Celine Grabner, Thomas Fink, Hana Stipanovic & Alexia Tischberger-Aldrian</i>	141
Formstabile Verpackungsabfälle aus Polyolefinen in der getrennten Sammlung in Österreich für 2021 <i>Elisabeth Jahn, Viktoria Gabriel, Manuel Pfitzner, Katrin Detter & Martin Novak</i>	147
Recycling von metallurgischem Staub unter Anwendung von biologischer Laugung und Bioelektrochemische Metallrückgewinnung <i>Rebeka Frueholz, Sabine Spiess, Christian Weiss, Johannes Schenk, Jan Eisenbacher-Lubensky, Dominik Wolmuth, Josephine Mueller & Marianne Haberbauer</i>	153
Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen im forstlichen Wegebau <i>Kerstin Pfandl & Ingrid Winter</i>	157
Rund um die Sanierung der Altlast Schrems <i>Jürgen Maier, Thomas Bruggraber & Dagmar Vorraber</i>	163
Bestimmung der PFAS-Belastung in zwei Nationalparks sowie deren Akkumulation in Pflanzenproben <i>Hannes Weinbauer, Romana Hornek-Gausterer, Daniel Tomsik, Oliver Mann & Werner Wruss</i>	167

Datenbereitstellung für KI-Systeme - Fallbeispiele und ihre Herausforderungen <i>Alexia Tischberger-Aldrian, Klemens Winkler, Valeria Fonseca Diaz, Roman Rainer, Felix Strohmeier, Melanie Neubauer, Elmar Rückert, Gerhard Ebenhofer, Thomas Pönitz & Gerald Koinig</i>	173
CO ₂ -Bilanzierung für eine chemisch-physikalische Behandlungsanlage <i>Hannes Menapace & Felix Kleinsasser</i>	179
Digital Product Passport: Enabling Sustainable Supply Chain Management for Electric Vehicle Batteries <i>Claus Mersch, Felix Strohmeier & Maria Dos Santos</i>	183
Recycling kunstharzgebundener Schleifwerkzeuge <i>Sabrina Sasse, Sebastian Pentz, Lukas Lämmermaier, Niklas Diller & Daniel Vollprecht</i>	189
Benchmarking-Projekt zur Bemessung der Nachhaltigkeit von Kosmetikverpackungen <i>Michelle Klein, Anna Oleynikova, Charlotte Werner, Manfred Tacker & Silvia Apprich</i>	193
Chancen und Risiken bei der Verwertung von Tunnelausbruchmaterial <i>Manfred Nahold</i>	199
Unkonventionelle Lagerstätten: Neue Quelle für Gewinnung von kritischen Metallen <i>Olga Ulanova</i>	205
Anwendung von 3D Simulationstechnologien in der Recyclingbranche <i>Thomas Kaufmann, Patrick Gröller, Manfred Hall, Klemens Winkler & Alexia Tischberger-Aldrian</i>	211
Anwendung von FOST zur Annotierung von Metallverbundabfällen <i>Melanie Neubauer, Gerald Koinig, Alexia Tischberger-Aldrian, Yves Radmann, Walter Martinelli, Roland Pomberger & Elmar Rückert</i>	217
Werferner Schiefer – Eine innovative, alternative mineralische Basisabdichtung zu Lehm bzw. Ton für den Deponiebau <i>Ewald Bückner & Gerd Hofmann</i>	223
Improvement of Polymer Segmentation by X-ray Phase Contrast Computed Tomography <i>Jonathan Glinz, Sarah Heupl, Johann Kastner & Sascha Senck</i>	227
Measuring the Flow Properties of Secondary Plastics <i>Ivan Kibet & Juergen Wieser</i>	233
Untersuchungen zur strukturellen Verwertung von geschredderten Windradflügeln in Bulk Moulding Compounds <i>Bianca Purgleitner, Karin Krenn & Christoph Burgstaller</i>	237
Entwicklung eines Verwertungsprojekts im Einklang mit der UNFC: Screening-Studie <i>Soraya Heuss-Aßbichler, Iman Dorri, Juan Antonio Munizaga-Plaza & Ludwig Herman</i>	241
Polymer Differentiation with Computed Tomography: Opportunities and Limitations <i>Sarah Heupl, Jonathan Glinz, Dietmar Salaberger & Johann Kastner</i>	247



NACHHALTIGKEIT

Digitalisierte Kreislaufwirtschaft für eine bessere Zukunft

Innovative Technologien für Produktdesign, Recycling oder Nachverfolgung ebnen den Weg in eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft. Siemens begleitet Sie mit maßgeschneiderten Lösungen bei Ihrer digitalen und grünen Transformation.

siemens.at/recycling

SIEMENS

Index English abstracts of posters

The LIB Recycling Challenge – Pathways Achieving Efficiency Rates <i>Cornelia Rutkowski, Bettina Ruttrecht, Astrid Arnberger, Thomas Nigl, Robert Hermann & Roland Pomberger</i>	257
Investigations on the utilisation of carbon fiber-containing waste in cement plants (EVCAZ) <i>Isabel Kaphahn & Kirsten Stark</i>	258
Examination of the introduction of a mandatory deposit for lithium-containing batteries and accumulators (LIB) <i>Ralf Brüning & Florian Witt</i>	259
Percentage of used textiles in residual waste intended for separate collection <i>Lisa Tatschl, Hana Stipanovic & Alexia Tischberger-Aldrian</i>	260
Mobility Modular Load Carriers: Development of modular reusable load carriers for the train construction industry <i>Daniel Orth, Kevin Kaltenbrunner, Christian Pladerer & Georg Vinzenz</i>	261
A web-based tool to apply the UNFC for the assessment and classification of anthropogenic resource recovery projects as a basis for decision-making <i>Bhagya Jayasinghe, Iman Dorri, Alireza Sobouti, Juan Antonio Munizaga-Plaza & Soraya Heuss-Aßbichler</i>	262
Assessment of plastic recyclates regarding DNA-reactive mutagenicity with in vitro Bioassays <i>Elisabeth Pinter, Elisa Mayrhofer, Jessica Schlossnikl, Veronica Osorio Piniella & Vasiliki-Maria Archodoulaki</i>	263
Circular Economy Approaches for polymer out of home advertising posters <i>Paul Steiner, Nicole Lasslop, Fabian Weller, Maximilian Auer, Jannick Schmidt & Jörg Woidasky</i>	264
The Role of Temporary Material Hub and Final Sinks in Circular Economy <i>Romana Kopecká, Marlies Hrad & Marion Huber-Humer</i>	265
Digital product passport as a quality certificate and for the traceability of products and materials <i>Michael Krisper</i>	266
Mehrweg-Bouteille - Concept and implementation of a reusable system for the 0.75 litre wine bottle in Austria <i>Victoria Menedetter & Christian Pladerer</i>	267
Post-war waste management in the Ukraine <i>Olena Hanoshenko & Marion Huber-Humer</i>	268

Contamination on press felts used in the paper industry <i>Alexia Tischberger-Aldrian, Karin Schinner, Nicole Weber, Ivica Duretek, Klaus Haiden, Birthe Denneler & Jan Freudenberg</i>	269
Do they break? PFAS degradation by non-thermal plasma <i>Jan Back, Rania Bakry, Johanna Freilinger, Maria Fürhacker, Sebastian Handl, Claudia Hledik, Simon Jaborník, Marc Koch, Jana Marx, Madeleine Larch, Thomas Obholzer, Maximilian Pupp, Marco Rupprich & Martin Spruck</i>	270
Closure and recultivation of landfills with low hazard potential in the state of Brandenburg <i>Ulrich Stock & Roman Dinslage</i>	271
Odor optimization of PCR Recyclates <i>Peter Clemenz, Martin Sturm & Maria Schäfer</i>	272
The Role of the Circular Economy in Industry 5.0 <i>Susanne Roßkogler</i>	273
New composites made from biopolymers and regional natural fibers - a promising material for the future? <i>Anett Kupka, Marc Krech & Maria Schäfer</i>	274
Viable recycling approaches to electrolyser stacks <i>Richard Yaw Nti, Thomas Nigl, Hannah Astar, Lukas Zeilerbauer & Marianne Kapp</i>	275
Plastic transformation in the composting process <i>Josef Adam, Jessica Brantner, Martin Wellacher, Cornelia Riegler & Franz Poschacher</i>	276
Influence of treatment during the use phase on various properties of textiles <i>Celine Grabner, Thomas Fink, Hana Stipanovic & Alexia Tischberger-Aldrian</i>	277
Rigid packaging waste from polyolefins in separate collection in Austria for 2021 <i>Elisabeth Jahn, Viktoria Gabriel, Manuel Pfitzner, Katrin Detter & Martin Novak</i>	278
Metallurgical dust recycling applying bioleaching and bioelectrochemical technology <i>Rebeka Frueholz, Sabine Spiess, Christian Weiss, Johannes Schenk, Jan Eisenbacher-Lubensky, Dominik Wolmuth, Josephine Mueller & Marianne Haberbauer</i>	279
Recycling of construction and demolition waste in forest road construction <i>Kerstin Pfandl & Ingrid Winter</i>	280
Remediation of the contaminated site „ST32: Halde Schrems“ – A case study <i>Jürgen Maier, Thomas Bruggraber & Dagmar Vorraber</i>	281
Determination of PFAS contamination in two national parks and its accumulation in plant samples <i>Hannes Weinbauer, Romana Hornek-Gausterer, Daniel Tomsik, Oliver Mann & Werner Wruss</i>	282

Data basis for AI systems - case studies and their challenges <i>Alexia Tischberger-Aldrian, Klemens Winkler, Valeria Fonseca Diaz, Roman Rainer, Felix Strohmeier, Melanie Neubauer, Elmar Rückert, Gerhard Ebenhofer, Thomas Pönitz & Gerald Koinig</i>	283
CO ₂ balancing for a chemical-physical treatment plant <i>Hannes Menapace & Felix Kleinsasser</i>	284
Digital Product Passport: Enabling Sustainable Supply Chain Management for Electric Vehicle Batteries <i>Claus Mersch, Felix Strohmeier & Maria Dos Santos</i>	285
Recycling of resin-bonded grinding tools <i>Sabrina Sasse, Sebastian Pentz, Lukas Lämmermaier, Niklas Diller & Daniel Vollprecht</i>	286
Holistic Sustainability Assessment of Cosmetic Packaging <i>Michelle Klein, Anna Oleynikova, Charlotte Werner, Manfred Tacker & Silvia Apprich</i>	287
Opportunities and risks in the recycling of tunnel excavation material <i>Manfred Nahold</i>	288
Unconventional Deposits: New Source for Extraction of Critical Metals <i>Olga Ulanova</i>	289
Application of 3D simulation technologies in the recycling industry <i>Thomas Kaufmann, Patrick Gröller, Manfred Hall, Klemens Winkler & Alexia Tischberger-Aldrian</i>	290
Application of FOST for Annotating Metal Composite Waste <i>Melanie Neubauer, Gerald Koinig, Alexia Tischberger-Aldrian, Yves Radmann, Walter Martinelli, Roland Pomberger & Elmar Rückert</i>	291
Werferner Schiefer – An innovative, alternative mineral base liner to clay or loam for landfill construction <i>Ewald Bückner & Gerd Hofmann</i>	292
Improvement of Polymer Segmentation by X-ray Phase Contrast Computed Tomography <i>Jonathan Glinz, Sarah Heupl, Johann Kastner & Sascha Senck</i>	293
Measuring the Flow Properties of Secondary Plastics <i>Ivan Kibet & Juergen Wieser</i>	294
Investigations on the mechanical recycling of shredded wind turbine blades in bulk moulding compounds <i>Bianca Purgleitner, Karin Krenn & Christoph Burgstaller</i>	295
Development of a recovery project in line with the UNFC: screening study <i>Soraya Heuss-Aßbichler, Iman Dorri, Juan Antonio Munizaga-Plaza & Ludwig Hermann</i>	296
Polymer Differentiation with Computed Tomography: Opportunities and Limitations <i>Sarah Heupl, Jonathan Glinz, Dietmar Salaberger & Johann Kastner</i>	297

STADLER®

Technik von ihrer besten Seite



Der STADLER WireX

Ihre optimale Wahl für die Drahtentfernung von Ballen

STADLER: für eine saubere Welt!

Die innovative Technologie hinter dem STADLER WireX revolutioniert den Prozess der Drahtentfernung. Der Einsatz **künstlicher Intelligenz** und **fortschrittlicher Sensorerkennungs- und Messsysteme** ermöglicht es dem WireX, Ballen mit Leichtigkeit zu vermessen und Drähte von sowohl einzelnen als auch kreuzverdrahteten Ballen in nur einem Schritt zu entfernen, ohne dass eine doppelte Aufgabe notwendig wird.

- Bis zu 60 Ballen in der Stunde
- Sehr niedriger Energieverbrauch
- Höhere Arbeitssicherheit, da kein manuelles Öffnen der Ballen erforderlich ist
- Einsatz von ausschließlich elektrischen Antrieben: keine Hydraulik-Systeme, kein Ölfilterwechsel und kein Ölaustritt

Verlassen Sie sich auf den STADLER WireX, um den Engpass der Drahtentfernung in Ihrem Sortierprozess zu überwinden.

STADLER Anlagenbau GmbH

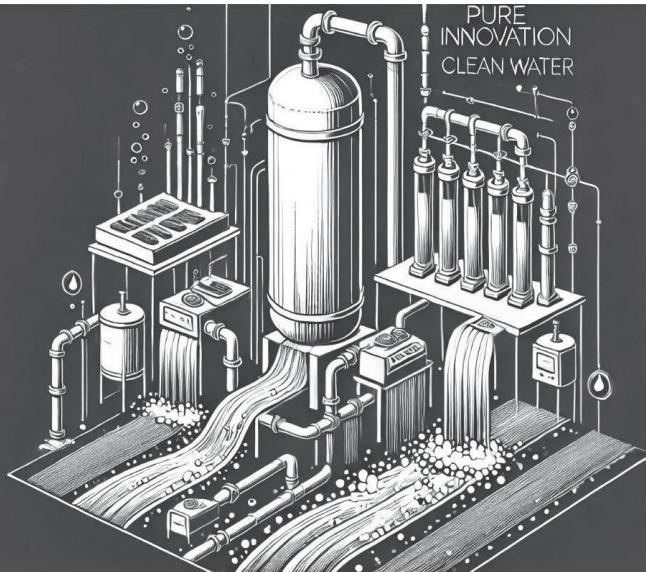
+49 7584 9226-0

info@w-stadler.de

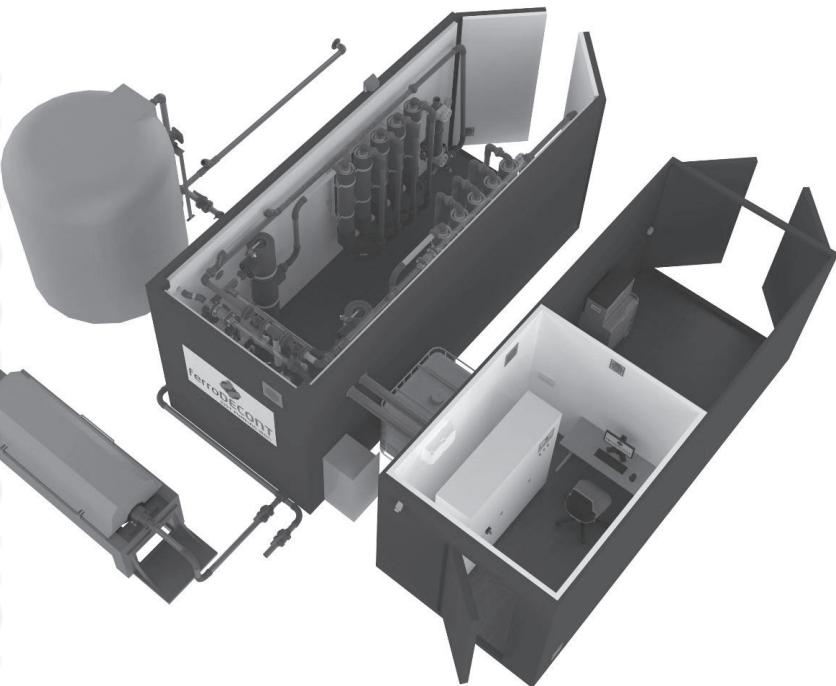
www.w-stadler.de

Poster

ChatGPT?



ferroDECONT!



Entdecken Sie unsere hochmodernen Lösungen
für eine effiziente Abwasserreinigung.
Gemeinsam schaffen wir eine nachhaltige Welt.

Erfahren Sie mehr bei **ferroDECONT**.

<https://www.ferrodecont.at>

The LIB Recycling Challenge – Pathways Achieving Efficiency Rates

Cornelia Rutkowski¹, Bettina Rurecht², Astrid Arnberger³, Thomas Nigl¹, Robert Hermann⁴ & Roland Pomberger¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

²⁾ K1-MET GmbH, Area Metallurgical Process Efficiency and Circularity, Leoben, Austria

³⁾ Saubermacher Dienstleistungs AG, Research and Development, Feldkirchen bei Graz, Austria

⁴⁾ TÜV SÜD Landesgesellschaft Österreich GmbH, Green Energy & Sustainability, Bruck/Mur, Austria

ABSTRACT: The new European Battery Regulation introduces both advantages and challenges for the recycling of lithium-ion batteries. Accordingly, it mandates that a minimum of 70 % of the average weight of lithium batteries must be recycled by the end of 2030. Specific recovery targets are set at 95 % for cobalt, copper and lead, 80 % for lithium and 95 % for nickel. Additionally, a stricter requirement for comprehensive data collection and verification from recycling companies is obligated. First step in achieving these obligations is a general assessment of the end-of-life lithium-ion batteries that are subject to recycling. This includes detailed overview of different battery designs, a general knowledge of the composition of exterior components as well as a characterisation on module and since current LIB recycling processes lack a characterisation on element level, a suitable method is required that provides repeatable and reliable results. This work presents preliminary findings of the pre-treatment and briefly discusses upcoming challenges regarding the European Battery Regulation.

1 INTRODUCTION

In 2023, 47,621 battery electric-vehicles (BEV) were registered in Austria, meaning that for the first time, more electrically powered cars were registered than diesel-powered cars (BMK 2024). Germany has seen an increasing trend in the number of BEV registered for the first time in the last 5 years (Statista 2024). Assuming that this trend will increase rather than decrease, it is essential to consider recycling options of BEV components such as EoL-LITBs (end of life - lithium ion traction batteries). In line with this trend, the European Union has introduced the European Battery Regulation (EBR 2023), as a part of the European Union's Green Deal (EU Kommission 2019). This regulation obligates recycling companies to provide both evidence and a calculation framework (Tab. 1).

Tab. 1: The new European Battery Regulation introduces several key innovations

New Batterie Regulation Targets			
Target	Element	Percentage	Date
Recycling efficiency	lithium	70 % of the average weight (battery system)	31 December 2030
	cobalt	95 %	
	copper	95 %	
Material recovery	lead	95 %	31 December 2031
	nickel	95 %	
	lithium	80 %	
Enhanced Data Collection & Verification	→ calculating the recycling efficiency and recovery rate by comprehensible data collection on input and output materials → reviewed quality criteria: "Completeness", "Accuracy", and "Consistency" → verification of results by third parties		

1.1 Recycling Efficiency Rate (r_{RE})

Disassembled parts have the potential contributing a significant share to the calculated **recycling efficiency rate (r_{RE})** of EBR 2023 since all material obtained from pre-treatment operations qualifies as m_{input} acc. formula (1).

The calculation includes **materials fractions resulting from pre-treatment operations** under the “preparation for recycling” including storage, handling and dismantling of battery packs (Article 3, Point 54, EBR 2023). Accordingly, any material used in the battery's construction counts as m_{input} .

Recycling Efficiency Rate (r_{RE})

$$r_{RE} = \frac{\sum m_{output}}{m_{input}} * 100; \quad [\text{mass \%}] \quad (1)$$

m_{input} ... the mass of waste battery input fractions

m_{output} ... the mass of output fractions derived from waste battery input fractions

Disassembled parts contain to some degree critical raw materials such as Cu, Ni and Co, especially when it comes to cabling, battery management systems or current collector bars. However, there potential contribution is neglected when it comes to the recovery rate of raw materials according to formula (2).

1.2 Recovery Rate of Materials (r_{RM})

The EBR 2023 furthermore introduces the **recovery rate (r_{RM})** of the **target materials** Co, Cu, Ni, Li & Pb (Annex XII, Part C, EBR 2023) from spent batteries which can be calculated according to formula (2). These elements are considered recycled, or $m_{TM,output-point}$, when their quality is suitable for substitution primary raw materials, substances or products and are therefore no longer considered waste.

Recovery Rate (r_{RM})

$$r_{RM}(TM) = \frac{\sum m_{TM,output-point}}{m_{TM,input}} * 100; \quad [\text{mass \%}] \quad (2)$$

$m_{TM,output-point}$... the mass of the targeted material in output fractions

$m_{TM,input}$... the mass of the targeted material in the input fraction

If we consider, that only the active mass remaining after the cells disruption is counted as input fractions for calculating $m_{TM,input}$ of r_{RM} and all other material fractions from pre-treatment operations are neglected, a significant proportion of the mass is excluded. Some of the dismantled material fractions contain the desired elements, like Co and Cu. Carvalho (2021) calculated that 40 % of a battery pack consist of packaging, the cooling system and the BMS (battery management system) and 60 % for the cells.

To understand the theoretical foundations and challenges associated with these regulations, it is recommended to consult the RecyDepo Tech 2024 paper “*Limits and Challenges of the Calculation and Verification of the Recycling Efficiency of Lithium-ion Batteries posed by the new European Battery Regulation*” by Rurecht et al. (2024). The paper discusses the theory behind the application of calculation methods, recycling efficiency, and recovery rates.

2 METHOD

The battery systems were dismantled down to module-level and into **several material fractions**: iron; aluminium; high-voltage line; cable; electronical-waste; fuses, copper busbars; printed circuit boards; conductor protection devices.

3 CHALLENGES OF A VALID RESULT

This work presents preliminary findings and potential learnings regarding the pre-treatment. Furthermore, based on these preliminary findings upcoming challenges regarding the European Battery Regulation are presented and briefly discussed.

Focusing on the materials fractions of battery packs resulting from pre-treatment, the following challenges concerning the designs were identified:

- **Diversity:** The diversity of the battery packs complicates the implementation of a standardised procedure with automated steps;
- **Joining technology:** Bonding of the components by different adhesives prevents non-destructive disassembly;
- **No information transfer:** The adaption of disassembly and dismantling steps is made more difficult by ongoing unpredictable design changes made by the original equipment manufacturers (Fig. 1).
- Lack of analytical standards

Diversity

Examination of different batteries at module-level reveals different battery designs and irregular shapes regarding housing, cover, connection, as well as variations of the used material (e.g. plastic, metal) (Fig. 2). The cell chemistries of the modules were not labelled. The module construction might depend on the model of the electric car and its manufacturer.



Fig. 1: Various module structures

The above-mentioned high diversity in battery systems complicates **representative sampling** as samples need to reflect the average properties (ÖNORM S 2123-3, ÖNORM S 2127). To analyse this heterogeneity, preliminary investigations are required.

The **rRE** is mandated to be calculated on the chemical composition of input and output fractions of continuously or representatively sampling. Due to the high diversity in battery systems

(including modules and cells) and the unpredictable design changes in the future, the **calculation of m_{input}** remains challenging and is in dire need of an applicable solution.

Selective manual **separation** is a labour-intensive task, especially, if uncontaminated output flows should be guaranteed. The current separation process is designed to achieve high throughput, but lacks a selective separation and quality control on element level.

In the selection of a suitable method for standardisation for analytics, a certain measuring speed should be emphasised with regard to a future automation process.

Joining technology

Non-destructive dismantling was not feasible due to factory-installed adhesives, which complicates the disassembly process and significantly hinder its automation, see table 2.

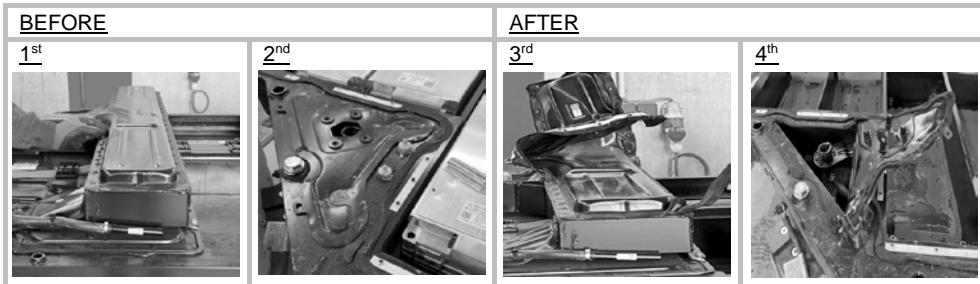


Fig. 2: Challenging joining technology: 1st & 2nd: housing cover; 3rd & 4th: cover could only be removed with non-destructive efforts; 3rd: modules in silver visible; 4th: bonding of modules by adhesives visible

No information transfer

The information on dismantling, considered as commercially sensitive data, are not publicly accessible. This also applies to information about the composition of a battery until the mandatory battery pass comes in force (Annex XIII, EBR 2023) (Tab. 2).

Tab. 2: Partial excerpts of the information in the Battery Pass

<u>Publicity available information</u>	<u>Accessible with legitimate interest & to commission</u>
Material composition	Composition cathode, anode, electrolyte
Composition hazardous & critical substances: Hg, Cd, Pb	Dismantling: <ul style="list-style-type: none"> → Explosion diagram of the battery system/set → Sequence of the disassembly steps → Type & number of connection techniques → Warning if parts are at risk of being damaged → Number of cells & arrangement
Recyclate content (Article 8 (1))	

None of the exterior material components (e.g., housing, cover etc) provide information about the cell chemistry. Despite the presences of numerous QR-Codes no additional information is provided, because they are not readable by any means. Without years of experience achieving a selective separation of battery modules without opening the battery cells is not feasible. The separation process becomes more difficult if the cell chemistry changes while the battery system and module design remain the same.

Data about the cell chemistry can only be achieved by opening the module and cell casing and analysing the cell chemistry or by manufacturer datasheets. Obtaining the latter must be considered rare, as data sheets can be regarded as manufactures secrets.

According to the definition for reporting recycling efficiency, all recycling steps and associated output fractions must be recorded. The **first recycler** is responsible for collecting the data and forwarding it to the authorities. If the pre-treatment is not carried out by the first recycler, the resulting data is not reported and therefore lost, which also effects the calculation of the recovery rate.

Lack of analytical standards

Currently employed analysis methods provide fluctuating results due to the inhomogeneity of both input and output fractions. Nevertheless, since an increase in the reliability of characterisation results is highly desired **standardising** respective analytical methods is necessary. The **analytical method** and its limitations determine the result of the recycling efficiency rate calculation as the measurement result is required for this calculation. Currently, no analytical method is able to characterise black mass without limitations. Depending on the digestion conditions (such as digestion reagents, digestion time, filter residues etc.), both yield and recovery rate can vary.

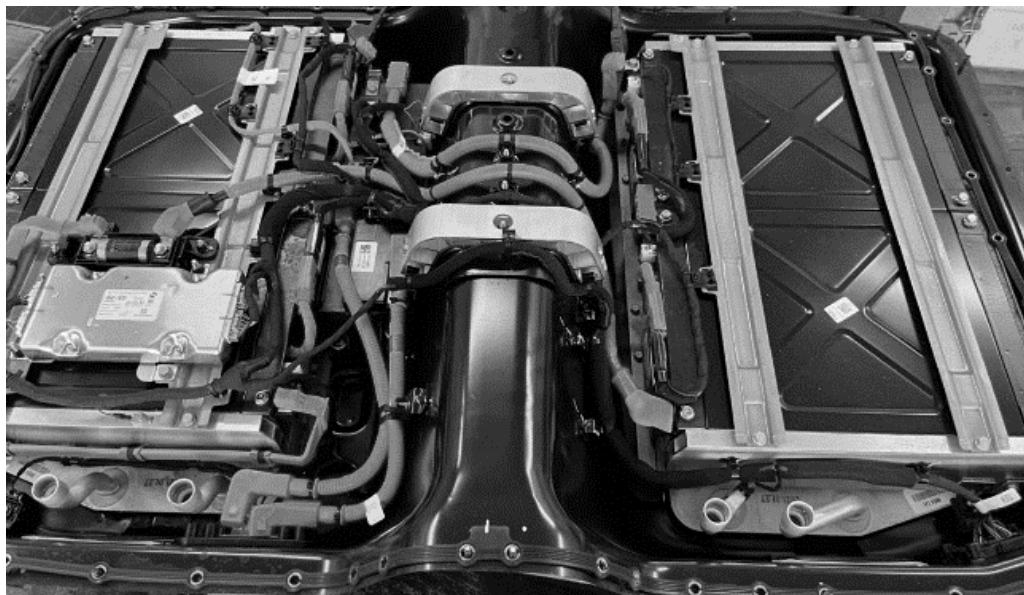


Fig. 3: Example of the different material fractions of a battery system

4 CONCLUSIONS

It can be concluded that the EBR (2023) introduces several challenges regarding:

Calculation Methods:

- What qualifies as input and output regarding the calculation for recycling efficiency and material recovery rates? *At what point is the material considered recycled and to what extent?*
- Does pre-treatment count as recycling? Does the plant where the pre-treatment is carried out count as the first recycler?
- How to secure a representative sample if the heterogeneity of the bulk is not known?
- How will different analytical methods effect the recycling efficiency rate?

Data Quality:

- What is the required level of data quality regarding completeness, accuracy, and consistency? How to assure high data quality?

Verification:

- How to establish robust verification processes by independent third parties to comply with the new regulation?

Elaborate best practices from two case studies

1. A **consortium** composed of Saubermacher Dienstleistungs AG, TÜV SÜD Landesgesellschaft Österreich GmbH (Technischer Überwachungsverein), K1-MET GmbH and Montanuniversitaet Leoben, is collaborating to develop a best-practice solution, marking an initial step towards standardisation.

2. The research project **MoLIBity** evaluates the suitability of an analytical procedure for the characterisation of black mass for broad application by employing a round robin. Procedure validation is conducted to determine whether the performance characteristics are appropriate for the intended application. Participants in the comparative study analyse the same test samples using the same measurement procedures under the specific conditions of their respective laboratories. The characterisation of the analysis methods is achieved through the processing and presentation of results using statistical techniques. The implementation of the calculations makes it possible to visualise the limits of applicability.

The MoLIBity research project is funded by the Austrian Research Promotion Agency (Forschungsförderungsgesellschaft mbH, FFG) (FFG No. FO999899505). The authors would like to take this opportunity to thank the funding organisations and the project partners Saubermacher Dienstleistungs AG, BOKU University, Treibacher Industrie AG, Fraunhofer IKTS, Fraunhofer Austria and Montanuniversitaet Leoben.

REFERENCES

- BMK (2024). E-Auto Rekordzulassung 2023. 2023 erstmals mehr neuzugelassene E-Autos als Autos mit Dieselantrieb. https://www.bmk.gv.at/service/presse/gewessler/2024/0111_e-autos.html.
- Carvalho, T. G. (2021) Life Cycle Assessment of Stationary Storage Systems within the. MDPI.
- Europäische Kommission (2019). Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschus der Regionen. Brüssel.
- European Battery Regulation (EBR) (2023). Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries. Office Journal of the European Union, S. 117.
- ÖNORM S 2123 (2003) ÖS 2123 - Probenahmepläne für Abfälle - Teil 3: Beprobung fester Abfälle aus Stoffströmen. Austrian Standards Institute.
- ÖNORM S 2127 (2011) ÖS 2127 - Grundlegende Charakterisierung von Abfallhaufen oder von festen Abfällen aus Behältnissen und Transportzeugen. Austrian Standards Institute.
- Statista (2024) Anzahl der Neuzulassungen von Elektroautos in Deutschland von 2003 bis Juli 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/244000/umfrage/neuzulassungen-von-elektroautos-in-deutschland/>.

CONTACT

Cornelia Rutkowski
Cornelia.rutkowski@unileoben.ac.at
+43 / 650 890 64 57
Chair of Waste Processing Technology and Waste Management
Department of Environmental and Energy Process Engineering
Montanuniversitaet Leoben
<http://avaw.unileoben.ac.at>

Untersuchungen zur Verwertung carbonfaserhaltiger Abfälle im Zementwerk (EVCAZ)

Isabel Kaphahn¹ & Kirsten Stark¹

¹⁾ Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft der RWTH Aachen, Arbeitsgruppe Thermische Abfallbehandlung, Aachen, Deutschland

KURZFASSUNG: Im Rahmen des Projekts EVCAZ wird die energetische Verwertung carbonfaserhaltiger Abfälle im Zementwerk untersucht. Aufgrund der hohen Temperaturen und langen Verweilzeiten erscheint der Zementdrehrohrprozess zur vollständigen Faserzersetzung vielversprechend, während sich die konventionelle thermische Abfallbehandlung in vorangegangenen Versuchen als nicht geeignet erwiesen hat. Langzeitversuche dienen zur Überprüfung, ob eine vollständige thermische Zersetzung carbonfaserhaltiger Abfälle im Zementdrehrohrprozess stattfindet. Als geeignete Aufgabestelle für die Abfälle wurde der Hauptbrenner identifiziert, wodurch besondere Anforderungen an das Versuchsmaterial gestellt werden. Die Charakteristik der Carbonfasern stellt eine Herausforderung bei der Förderung und Dosierung des Materials im Zementwerk dar. Bei jedem Versuch werden umfangreiche Feststoffprobenahmen sowie diskontinuierliche Partikelprobenahmen im Abgas durchgeführt und die Proben hinsichtlich ihres Fasergehalts analysiert sowie die werksseitigen Prozessgrößen ausgewertet, um abschließend eine Technologiebewertung durchzuführen. Ein umfassendes Sicherheitskonzept gewährleistet die sichere Durchführung der Versuche.

1 MOTIVATION UND ZIEL DES PROJEKTS

Aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften werden Carbonfasern (CF) in Verbundwerkstoffen eingesetzt. Durch mechanisches und pyrolytisches Recycling können CF-haltige Kunststoffe jedoch lediglich zu minderwertigen Füllstoffen, Stapelfasergarnen und Wirrfaservliesen verarbeitet werden. Die prozessimmanente Faserverkürzung führt mit zunehmender Zyklenzahl zur Entstehung nicht-rezyklierbarer Reststoffe und zur Freisetzung gesundheitsschädlicher Faserbruchstücke mit WHO-Charakteristik. Für diese Abfälle besteht aktuell keine Verwertungs- und Entsorgungsoption.

Untersuchungen, die vom LuF TEER an der RWTH Aachen für das Umweltbundesamt durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass konventionelle thermische Abfallbehandlungsanlagen aufgrund ihrer Prozessbedingungen nicht zur Umsetzung von Carbonfasern geeignet sind. Bei Kurzzeitversuchen an einem Zementdrehrohr wurden aufgrund der hohen Temperaturen und langen Verweilzeiten dagegen vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich einer vollständigen Umsetzung der Fasern erreicht. (Quicker & Stockschauder 2021)

Im Rahmen des Projekts EVCAZ sollen diese positiven Indikationen in Langzeitversuchen verifiziert werden, um den energetisch-stofflichen Verwertungspfad für nicht-rezyklierbare CF-haltige Abfälle im Zementwerk umfassend zu bewerten. Auf Basis von Laboruntersuchungen zum Abbrandverhalten werden mehrwöchige Versuchskampagnen an unterschiedlichen industriellen Zementdrehrohren durchgeführt. Abschließend wird eine Evaluation des Prozesserfolgs und der Einflüsse auf Verfahrenstechnik, Produktqualität, Arbeitsschutz und Emissionen vorgenommen. Die abschließende Technologiebewertung soll Betreibern von Zementwerken, Abfallaufbereitern, CF-verarbeitenden Betrieben und Genehmigungsbehörden als Entscheidungsgrundlage zur künftigen Verwertung CF-haltiger Abfälle dienen.

2 MATERIALAUSWAHL UND -CHARAKTERISIERUNG

Zur Mitverbrennung im Zementwerk bestehen Anforderungen an den Brennstoff, die von der Aufgabestelle abhängig sind. Im ersten Großversuch sollen die carbonfaserhaltigen Abfälle über den

Hauptbrenner aufgegeben werden, da der Brennstoff dort den höchsten Temperaturen von bis zu 2.000 °C in der Flamme ausgesetzt ist. Folglich kann dort die höchste Reaktionsgeschwindigkeit bei der Oxidation der CF erreicht werden. An den alternativen Aufgabestellen im Calcinator oder Ofeneinlauf liegen niedrigere Temperaturen vor und es bestände das Risiko, dass das Material unverbrannt mit dem Gasstrom in Richtung des Zyklonvorwärmers mitgerissen werden könnte (Zeschmar-Lahl et al. 2020).

Um für das Einblasen über den Hauptbrenner flugfähige Eigenschaften aufzuweisen, muss der Brennstoff eine möglichst zweidimensionale, flächige Geometrie sowie eine geringe Korngröße aufweisen. Aus diesem Grund ist eine Vorzerkleinerung auf eine Kantenlänge von < 30 mm vorgesehen. Die ausgewählte Abfallfraktion umfasst einen Mix aus industriellen Abfällen carbonfaserstärkter Kunststoffe (CFK) und soll den Ersatzbrennstoff (EBS) im Hauptbrenner substituieren (siehe Abbildung 1).

Zur Charakterisierung der Brennstoffeigenschaften des Versuchs- und Referenzmaterials wurden Wassergehalt, Aschegehalt, Gehalt flüchtiger Bestandteile sowie die chemische Zusammensetzung und der Heiz- bzw. Brennwert bestimmt. Der CFK-Mix besitzt einen geringen Wassergehalt von 2,5 Ma.-% und einen Aschegehalt von 6,6 Ma.-%. Der Gehalt flüchtiger Bestandteile von 46,3 Ma.-% weist auf den Anteil kunststoffhaltiger Matrix hin, welche sich unter den gegebenen Bedingungen verflüchtigt, während die Carbonfaser und die Asche als nicht-flüchtige Bestandteile zurückbleiben. Die Heizwerte, bezogen auf den wasserfreien Zustand, sind mit 26.280 kJ/kg für den CFK-Mix und 26.650 kJ/kg für den EBS vergleichbar, und erfüllen die Vorgabe der Zementwerke von Heizwerten > 22.000 kJ/kg für Brennstoffe, welche im Hauptbrenner eingesetzt werden. Zur weiteren Charakterisierung der Brennstoffe hinsichtlich der genehmigungsrechtlichen Vorgaben wurden die Schwermetallgehalte des Brennstoffs mittels Röntgenfluoresszenzanalyse (RFA) bestimmt.

3 THERMOGRAVIMETRISCHE UNTERSUCHUNGEN

Um das Umsatzverhalten der CFK-Abfälle im Vergleich zum Referenzmaterial EBS zu untersuchen, wurden thermogravimetrische Analysen (TGA) durchgeführt. Mittels TGA können Massenänderungen eines Feststoffes in Abhängigkeit von Temperatur und Gasatmosphäre ermittelt werden. In Anlehnung an die maximale Feststofftemperatur im Drehrohr wurden der CFK-Mix und die EBS-Probe unter Luft-Atmosphäre mit 30 K/min auf 1.400 °C aufgeheizt. Die Ableitung der relativen Massenänderung über die Zeit ist in Abb. 1 dargestellt.

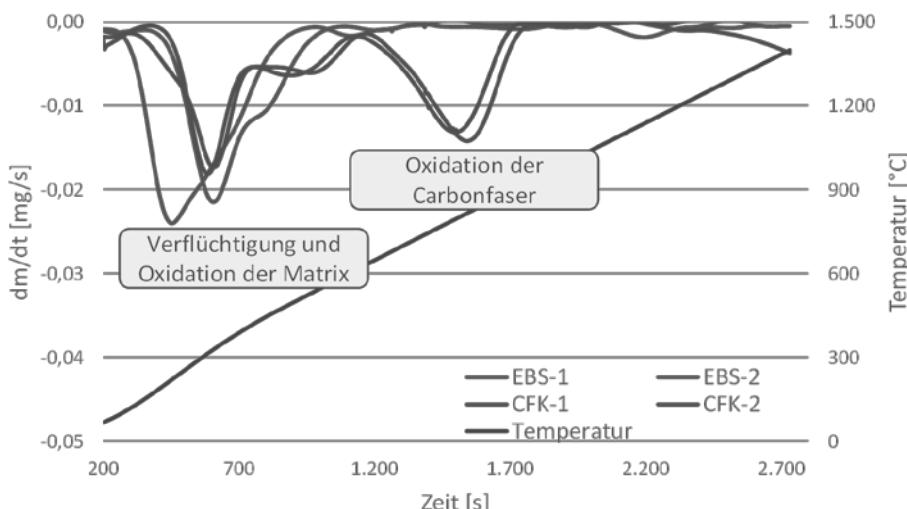


Abb. 1: Ableitungen der TG-Analysen von CFK-Mix und EBS bei Luftatmosphäre

Es ist zu erkennen, dass die Massenabnahme des EBS (blau) bei Temperaturen zwischen ca. 250 und 600 °C vollständig stattfindet. In diesem Temperaturbereich ist auch eine Massenabnahme des CFK-Mixes zu erkennen, die der Verflüchtigung und Oxidation der kunststoffhaltigen Matrix zuzuordnen ist. Die Kurve des CFK-Mixes weist einen zweiten charakteristischen Peak zwischen 680 und 900 °C auf. Bei diesen Temperaturen findet die Oxidation der Carbonfasern statt. Diese unterschiedlichen Reaktionsverläufe bei der Oxidation unter Luftatmosphäre sind beim Großversuch im Zementwerk zu beachten, um die Carbonfaser vollständig zu oxidieren.

4 PLANUNG DER LANGZEITVERSUCHE

In Langzeitversuchen an unterschiedlichen Zementwerken in Deutschland soll der auf < 30 mm vorzerkleinerte CFK-Mix im Hauptbrenner mit einer Substitutionsrate von 5 Ma.-% CF, bezogen auf den gesamten Brennstoffinput, aufgegeben werden. Im ersten Langzeitversuch soll die Aufgabe des CFK-Mix über fünf Stunden kontinuierlich erfolgen. Die Aufgabedauer und Materialmenge sollen nach positiven Resultaten auf bis zu 50 Mg CFK-Mix innerhalb von einer Woche erhöht werden. Jede Versuchskampagne gliedert sich in drei Phasen. In der Vorwoche der CFK-Aufgabe wird der Referenzzustand aufgenommen, dann erfolgt die Hauptversuchphase und nach Ende der CFK-Aufgabe werden Nachbeprobungen durchgeführt, um die Langzeitwirkungen zu analysieren und mögliche Memory-Effekte zu detektieren. In allen Phasen werden werkseitig Prozessgrößen wie Massenströme, Verbrennungsparameter und Emissionswerte aufgenommen. Es werden Feststoffprobenahmen des eingesetzten EBS und CFK-Mixes, 3D-Ausschusse, Ofenmehls, Klinkers, Bypassstaub und Ofenfilterstaub durchgeführt. Im Rohgas zwischen dem letzten Zyklonvorwärmer und der Abgasreinigung sowie im Bypassgas werden diskontinuierliche Partikelprobenahmen aus dem strömenden Gas, angelehnt an VDI 2066, durchgeführt (siehe Abb. 2). Sämtliche Proben werden anschließend auf ihren Carbonfasergehalt untersucht, um die Zersetzung der Carbonfasern sowie die Auswirkungen auf die Schadstoffemissionen (insbesondere der etwaigen Emission lungengängiger WHO-Fasern) und die Qualität des Klinkers zu beurteilen.

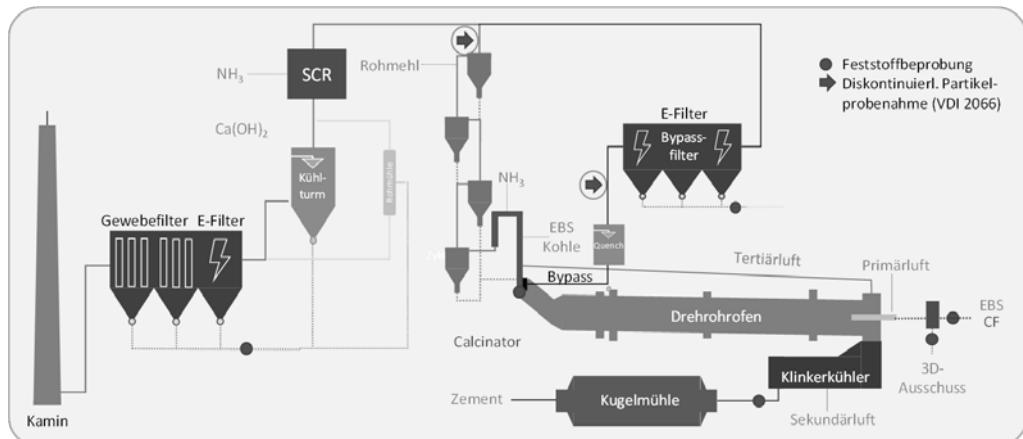


Abb. 2: Darstellung des Versuchskonzepts und Probenahmestellen. [angelehnt an (Zeschmar-Lahl et al. 2020)]

Zudem wird für jede Versuchskampagne ein individuelles Sicherheitskonzept für den gefahrlosen Umgang mit den CF-haltigen Abfällen entwickelt. Es wird darauf abgezielt, mit technischen Maßnahmen ein geschlossenes System zur Aufgabe der CF zu entwickeln. Im Rahmen organisatorischer Sicherheitsmaßnahmen wird das Werkspersonal umfassend über den Einsatz des carbonfaserhaltigen Materials und die Gefahren bei Exposition gegenüber Carbonfasern informiert.

Weitere persönliche Schutzmaßnahmen umfassen die Pflicht zum Tragen von FFP2-Maske, Schutzbrille, langer Kleidung und Handschuhen. Bei der Aufgabe der Carbonfasern im Zementwerk werden weitere Arbeitsplatzmessungen zur Bestimmung der Faserexposition durchgeführt, indem Messgeräte an kritischen Stellen installiert bzw. dem Werkspersonal als tragbare Geräte zur Verfügung gestellt werden.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Für carbonfaserhaltige Abfälle besteht aktuell keine Verwertungs- und Entsorgungsoption, da konventionelle thermische Abfallbehandlungsanlagen nicht zur Umsetzung von CF geeignet sind. Aufgrund der hohen Temperaturen und Verweilzeiten scheint der Zementdrehrohrprozess vielversprechend, um die vollständige thermische Zersetzung der CF zu ermöglichen. Im Rahmen des Projekts EVCAZ werden Langzeitversuche an unterschiedlichen Zementwerken durchgeführt. Als Aufgabestelle wurde der Hauptbrenner ausgewählt, da dort die höchsten Temperaturen von bis zu 2.000 °C in der Flamme vorliegen und bei der alternativen Aufgabestelle im Calcinator die Gefahr besteht, dass Fasern unverbrannt vom Abgasstrom mitgerissen werden. Die Aufgabe im Hauptbrenner erfordert eine Zerkleinerung der CFK-haltigen Abfälle auf eine Kantenlänge von < 30 mm, die aufgrund der Materialeigenschaften der CF sehr aufwendig ist. Um die Gefahr der Freisetzung von Fasern, insbesondere von gesundheitsschädlichen WHO-Fasern, während der Anlieferung und Aufgabe im Zementwerk zu minimieren, soll ein geschlossenes System installiert werden. Die Charakteristik der zerkleinerten CF mit sehr geringer Dichte und der Neigung zur Brückenbildung stellt bei der Materialförderung eine Herausforderung dar. Im Rahmen des Projekts wird angestrebt, eine umfassende Technologiebewertung zu erarbeiten, die als fundierte Entscheidungsgrundlage zur zukünftigen Verwertung carbonfaserhaltiger Abfälle dienen kann. Das Projekt EVCAZ – „Verfahrenstechnische Untersuchung der energetisch-stofflichen Verwertung von carbonfaserhaltigen Abfällen im Zementwerk“ wird für zweieinhalb Jahre vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags über die Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke Technology gGmbH im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung unter der Vorhaben-Nr. 23009 N gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

- Quicker, P., & Stockschläder, J. (2021). Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung carbonfaserverstärkter Kunststoffe in thermischen Prozessen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Zeschmar-Lahl, B., Schönberger, H., & Waltisberg, J. (2020). Abfallmitverbrennung im Zementwerk. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

KONTAKT

M.Sc. Isabel Kaphahn
kaphahn@teer.rwth-aachen.de
+49 241 80 90714

Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Arbeitsgruppe „Thermische Abfallbehandlung“
Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft der RWTH Aachen
www.teer.rwth-aachen.de

Prüfung der Einführung einer Pfandpflicht für Lithium-Batterien

Ralf Brüning¹ & Florian Witt¹

¹⁾ Dr. Brüning Engineering UG, Brake, Deutschland

KURZFASSUNG: Vermehrt wird über Brände in Anlagen und Betrieben aus der Kreislaufwirtschaft berichtet. Die Brandereignisse können unter anderem auf eine fehlerhafte Erfassung und anschließende Entsorgung von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) bzw. in Elektroaltgeräte enthaltende LIB zurückgeführt werden. In Zusammenhang mit der zunehmenden Menge an in Verkehr gebrachten LIB ist die Thematik der ordnungsgemäßen Erfassung bzw. korrekten Entsorgung immer stärker in den Fokus gerückt. In diesem Kontext wird auch um bspw. die Einführung einer Pfandpflicht diskutiert. Im Zuge des 2023 abgeschlossenen Forschungsvorhabens „Prüfung der Einführung einer Pfandpflicht für lithiumhaltige Batterien und Akkumulatoren“ wurde von der Firma Dr. Brüning Engineering UG in Zusammenarbeit mit der Firma cyclos GmbH für das deutsche Umweltbundesamt untersucht und bewertet, ob eine Pfandpflicht auf LIB ein geeignetes Instrument darstellt, die (frühzeitige) getrennte Erfassung von LIB in erhöhtem Maße sicherzustellen, Brandereignisse entlang der Erfassungs- und Abfallbehandlungskette zu reduzieren bzw. zu verhindern sowie zur Steigerung der Sammelmenge von Altbatterien und Altakkumulatoren beizutragen. In diesem Kontext wurden Handlungsempfehlungen, Maßnahmen und Alternativen zur Fortentwicklung der Sammlung von LIB benannt und erläutert.

1 PROBLEMSTELLUNG

Der Anteil an Hochenergiebatterien hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. Dabei besonders relevant sind die lithiumhaltigen Batterien (LIB). Sie verfügen in der Regel über die höchsten Energiedichten und werden vielfältig sowohl als Gerätebatterien als auch Industriebatterien eingesetzt. Nach dem Ende der Nutzung von LIB ist deren ordnungsgemäße und umweltgerechte Erfassung und Entsorgung grundlegend für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft. Den rechtlichen Rahmen hierfür bildet das Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriegesetz – BattG). Bereits seit mehreren Jahren kommt es zu Brandereignissen bei der Erfassung und Entsorgung von LIB in Entsorgungsbetrieben. Dabei können erhebliche Sachschäden, Gesundheitsgefahren, Umweltgefährdungen und Kosten für Versicherungen oder für Vermeidungsmaßnahmen entstehen. Die vermehrt vorkommenden Brände in vorrangig fremden, irregulären Abfallströmen, die mutmaßlich sowie bestätigt durch LIB ausgelöst wurden, stellen dabei den Auslöser der Debatte dar. Durch die Einführung einer Pfandpflicht für LIB wird von einigen Akteuren die Möglichkeit der Reduzierung bzw. Vermeidung von Bränden und Brandrisiken gesehen. Jedoch sind die vorgetragenen Argumente zum Thema Pfandpflicht auf LIB aktuell nicht eindeutig. Daher verfolgte das Forschungsvorhaben das Ziel, zu bewerten, ob die Einführung einer Pfandpflicht auf LIB dazu beitragen kann:

- Brandereignisse entlang der Erfassungs- und Abfallbehandlungskette zu verhindern,
- eine Steigerung der Sammelmenge von Altbatterien und Altakkus zu bewirken sowie
- als Synergieeffekt eine Steigerung der Sammelmenge von EAG hervorzurufen.

2 METHODIK UND VORGEHENSWEISE

Mit § 3 Abs. 4 bis 6 BattG werden drei die drei Batteriearten Fahrzeug-, Geräte- und Industriebatterien definiert. Für die drei Arten werden zum Teil unterschiedliche gesetzliche Regelungen getroffen (BattG, 3.11.2020). Die Batterien für Elektrofahrräder, Pedelecs und E-Scooter werden in der Praxis vielfach als „haushaltsnahe Industriebatterien“ bezeichnet und von weiteren Industriebatterien abgegrenzt. Somit ergeben sich aus den Definitionen und gesetzlichen Regelungen

relevante Unterschiede bei den betroffenen Akteuren und Sammelstrukturen. Damit geht auch eine unterschiedliche Produktidentität sowie praktische Erfassung und Entsorgung einher. Daher wurde im Forschungsvorhaben sowohl die grundsätzlichen Eignung von Pfandsystemen für LIB im Allgemeinen als auch jeweils für die drei nach § 3 Abs. 4 bis 6 BattG definierten Arten betrachtet. Um eine Mengenabschätzung des Aufkommens von (lithiumhaltigen) Batterien in verschiedenen haushaltsnahen Abfallströmen in Deutschland zu erlangen, wurden die haushaltnahen Abfallsammelsysteme/-ströme betrachtet. In diesem Rahmen erfolgt ebenfalls eine Darstellung, welche Mengen an Fehlwürfen durch ein Pfand potentiell in ordnungsgemäße Entsorgungswege gelenkt werden könnten, um somit die Reduzierung von Schadensereignissen zu bewirken. Dazu wurden Literaturrecherchen in Bezug auf repräsentative Abfallanalysen durchgeführt. Außerdem wurden Befragungen zu (möglichen) Schadensereignissen durch LIB, Ausgaben zu Sicherheitsmaßnahmen und zur Erfassung durchgeführt. Neben der Bewertung der Pfandsysteme in Bezug auf die Zielsetzungen wurden weitere Handlungsempfehlungen, mögliche Maßnahmen und Alternativlösungen zur Zielerreichung formuliert.

2.1 Fehlwürfe in haushaltsnahen Sammelsystemen

In die Recherche einbezogen wurden Analysen zu Abfallstoffströmen wie Restabfall, LVP-Abfälle aus dem Dualen System (Verpackungsabfall aus gelber Tonne, gelbem Sack, Wertstofftonne), Altpapier und Bioabfall. In den Abfallanalysen wurden nur die Fraktionen (Alt)Batterien und Elektro(alt)geräte betrachtet. Eine Angabe speziell zu LIB wurde in keiner der Analysen vorgenommen. Zudem wurde in den meisten ausgewerteten Abfallanalysen keine Unterscheidung nach Primär- oder Sekundärbatterien gemacht. Die Daten zeigten, dass sowohl die Fehlwurfmengen der Batterien als auch der EAG in der haushaltnahmen Sammlung von LVP-Abfällen geringer sind als die entsprechenden Fehlwurfmengen im Restabfall. Im Rahmen der Untersuchung wurden die Werte der regionalen Einzelanalysen für eine nicht repräsentative Mengenabschätzungen von Altbatterien und EAG in Abfallströmen für das Bundegebiet hochgerechnet. In der haushaltnahmen Sammlung sind, betrachtet über die beiden Abfallströme Restabfall und LVP-Sammlung, somit zwischen 33.200 - 259.790 t EAG und 1.660 - 20.750 t Altbatterien als Fehlwürfe enthalten. Zur besseren Einschätzung der Aussagekraft wurden die Ergebnisse mit den Werten der vom Umweltbundesamt initiierten bundesweiten Analyse des Siedlungsrestabfalls verglichen (Dornbusch, 2020). Das nach Dornbusch für Deutschland ermittelte arithmetische Mittel von 5.500 t Batterien im Restabfall liegt unter dem aus den regionalen Einzelanalysen hochgerechneten Wert von 6.640 t. Das nach Dornbusch für Deutschland ermittelte arithmetische Mittel von 86.000 t EAG im Restabfall liegt über dem aus den regionalen Einzelanalysen hochgerechneten Wert von 84.821 t. Schlussfolgernd ist festzustellen, dass die Fehlwurfmengen an Batterien bzw. EAG in der untersuchten haushaltnahmen Sammlung relativ nahe an den Daten der Vergleichsstudie liegen und eine relevante Größenordnung einnehmen.

2.2 Erfassung, Schadensereignissen und Sicherheitsmaßnahmen

Im Winter 2020 und Frühjahr 2021 wurden Umfragen bei Entsorgungsbetrieben sowie öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern (örE) durchgeführt. Abgefragt wurden Schadensereignisse und ihre Ursachen sowie Sicherheitsmaßnahmen, die ergriffen werden, um Schadensereignisse zu vermeiden. Bei örE wurde zudem die Erfassungssituation von LIB und EAG, die LIB enthalten, abgefragt. Die Umfrage wurde so gestaltet, dass sie auch von Akteuren beantwortet werden konnte, bei denen kein Schadensereignis stattgefunden hat. In diesen Fällen wurden die Antworten zu Sicherheitsmaßnahmen ausgewertet. Es ist allerdings zu beachten, dass in der Umfrage Details zu den drei größten Schadensereignissen erfragt wurden. Daher kann es sein, dass im Betriebsalltag häufig noch weitere Schadensereignisse geringeren Ausmaßes vorkommen, als im Rahmen der Studie angegeben. Insgesamt konnten 101 Antworten ausgewertet werden, davon von 89 von Entsorgungsbetrieben und 12 von örE. Es wurden 148 Schadensereignisse benannt: Von den 89 Entsorgungsbetrieben wurden Angaben zu 139 Schadensereignissen gemacht, bei

denen Batterien als Schadensauslöser vermutet werden. Von den zwölf an der Umfrage beteiligten örE wurden Angaben zu neun Schadensereignissen gemacht, bei denen Batterien als Schadensauslöser vermutet werden. Insgesamt ist seit 2008 eine Steigerung der Anzahl an genannten Schadensereignissen je Jahr zu erkennen. Mit jeweils mehr als 30 Schadensereignissen fallen die Ereignisse in die Jahre 2019 und 2020. In allen Jahren davor liegt die Zahl der Schadensereignisse bei bis zu 15. Für 2021 wurden Angaben zu 10 Schadensereignissen gemacht. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass der Befragungszeitraum nicht ein volles Jahr berücksichtigt, sondern Ende April 2021 endete. Die befragten Entsorgungsbetriebe benannten in Bezug auf den Abfallstrom, der von dem Schadensereignis betroffen war, am häufigsten den Abfallstrom EAG (48 Nennungen); gefolgt von den Abfallströmen Leichtverpackungen (LVP) aus privaten Haushalten (21 Nennungen), Gewerbeabfall (19 Nennungen) und Sonstiges (16 Nennungen). Bei den befragten örE bezogen sich fünf Schadensereignisse auf den Abfallstrom der Altbatterien, zwei auf den Abfallstrom EAG und zwei Schadensereignisse auf sonstige Abfallströme (Kabelsammlung und Altpapiersammlung). In allen Fällen traten die Schadensereignisse bei der Erfassung am Wertstoffhof auf. Nach den Angaben der Entsorgungsbetriebe entstanden in ca. 30 % der Fälle die meisten Schadensereignisse im Eingangslager. Bei separater Betrachtung des Abfallstroms EAG wurde „Eingangslager“ sogar in ca. 52 % aller Fälle genannt. Die zweithäufigste Nennung fiel auf den Anlagenteil „Zwischen- / Ausgangslager ohne vorherige Zerkleinerung“ (ca. 23 %). Insgesamt ergibt sich beim Abfallstrom EAG, dass Schadensereignisse gehäuft in Lagerbereichen und insbesondere im Eingangslager ausgelöst wurden. Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass batteriehaltige EAG bereits vor oder bei der Anlieferung an den Behandlungsanlagen mechanischen Einwirkungen und ggf. Beschädigungen ausgesetzt sind, die zu Schadensereignissen führen können, sowie darauf, dass fälschlicherweise auch lose Altbatterien enthalten sind. Die Frage nach den Brandklassen der Schadensereignisse zeigt, dass die Entsorgungsbetriebe Angaben zu 40 Großbränden und jeweils mehr als 30 Mittelbränden und Kleinbränden machten. Die Angaben zeigen, dass es mehrere Groß- und Mittelbrände gab, bei denen Batterien als Schadensursache vermutet wurden. Bei den befragten örE wurden fünf Kleinbrände und zwei Mittelbrände angegeben. Die Schadenshöhe für fünf der Ereignisse wurde mit bis zu 10.000 Euro benannt. Die Angaben zur Schadenshöhe bei den befragten Entsorgungsbetrieben zeigen, dass die Schadensumme in ca. 44 % bei bis zu 10.000 Euro lag. Die Zahl der Nennungen nimmt mit der Schadenshöhe ab. Bei ca. 6 % lag die Schadenshöhe zwischen einer und fünf Millionen Euro und bei ca. 2 % bei mehr als 5 Millionen Euro. Die abnehmende Anzahl an Nennungen bei steigender Schadenshöhe bildete sich durchgängig bei allen Abfallströmen ab.

Neben den Sachschäden wurden von den befragten Entsorgungsbetrieben ebenfalls Personenschäden angegeben. Eine weitere Fragestellung der Umfrage zielte darauf ab, festzustellen, wie wahrscheinlich es sei, dass eine Batterie der tatsächliche Schadensauslöser gewesen ist. Die befragten Entsorgungsbetriebe erklärten, dass 54 der 139 Schadensereignisse „mit Sicherheit“ von einer Batterie „ausgelöst wurden“. Bei weiteren 39 Schadensereignissen gehen die Teilnehmenden mit „hoher Wahrscheinlichkeit“ davon aus, dass eine Batterie Auslöser des Schadensereignisses „war“, bei 43 Schadensereignissen, dass es eine Batterie „gewesen sein“ kann. Bei sechs von neun Schadensereignissen sei, laut der befragten örE, der Schaden „mit Sicherheit“ von einer Batterie ausgelöst wurden. Zwei Mal wurde die Antwort „es kann eine Batterie gewesen sein“ ausgewählt und ein Mal wurde die Antwort ausgewählt, dass es „mit hoher Wahrscheinlichkeit“ eine Batterie war. Gemäß den Umfrageergebnissen kann ein Zusammenhang zwischen Bränden und Batterien als Auslöser der Schadensereignisse hergestellt werden. Jedoch konnte abschließend nicht geklärt werden, welche LIB-Arten oder -Typen zu den Brandereignissen entlang der Entsorgungskette geführt haben.

2.3 In Verkehr gebrachte Mengen

In Bezug auf eine mögliche Einführung einer Pfandpflicht auf LIB wurde im Forschungsvorhaben ebenfalls ermittelt, auf welche Mengen an LIB das zutreffen würde. Bei der Mengenermittlung

traten insbesondere zwei Herausforderungen auf. In vielen Bereichen für die in Verkehr gebrachten Batterien und LIB liegen keine Daten vor. Angaben zum Pfandgut sind in der Einheit „Stück“ notwendig. In dieser Einheit liegen die Daten allerdings nur eingeschränkt vor und mussten errechnet werden. Daher konnten die Stückzahlen zu möglichen Pfandgütern nur als grobe Abschätzungen angegeben werden. Bei den Gerätebatterien zeigen die Berechnungen für das Berichtsjahr 2019, dass in Deutschland ca. 2,7 Milliarden Stück Batterien in Verkehr gebracht wurden und ca. 360 Millionen Stück davon LIB waren. Eine genauere Betrachtung der in Verkehr gebrachten LIB für 2019 zeigt, dass nach Stückzahlen ca. 2/3 der LIB Primärbatterien und ca. 1/3 Sekundärbatterien sind. Von den 2019 in Verkehr gebrachten 239.148.147 Stück Lithium Primärbatterien waren 194.600.554 Stück Primär-Knopfzellen. Damit bilden die Primär-Knopfzellen einen Anteil von 81% der in Verkehr gebrachten Lithium-Primärbatterien. Die verbleibenden 19 % waren Li-Primär-Rundzellen. Daneben wurden 120.037.958 Lithium-Sekundärbatterien in Verkehr gebracht. Hier beträgt der Anteil der Lithium-Rundzellen 109.181.384 Stück (ca. 91%). Bei den Industriebatterien kann zwischen (besonders) relevanten Sektoren in Bezug auf eine Pfandpflicht unterschieden werden. In diesem Rahmen wurden auch die Angaben zu in Verkehr gebrachten Mengen dargestellt. Im Sektor der „haushaltsnahen“ Industriebatterien wie z.B. Batterien von Elektro-Fahrrädern ist hervorzuheben, dass im Jahr 2019 fast 1,4 Millionen und 2020 fast 2 Millionen Stück Elektro-Fahrräder verkauft wurden. Die Verkaufszahlen sind dabei mit großer Dynamik steigend und es wird weiterhin ein starkes Marktwachstum erwartet. Bei dem Sektor Elektro-Mobilität, welcher Elektro- und Hybridfahrzeuge sowie weitere Traktionsbatterien z.B. von Flurförderzeugen oder Reinigungsfahrzeugen umfasst, wurden im Jahr 2020 722.335 Personenkraftwagen mit Batterieelektrischem- oder mit Plug-In-Hybrid-Antrieb zugelassen. Betrachtet auf die PKW-Gesamtzulassungen entspricht das circa 25 %. Im Jahr 2020 betrug der Anteil der Flurförderzeuge mit elektrischem Antrieb gemessen am Gesamtmarkt ca. 66 %. Nach der Abschätzung wurden in Deutschland im Jahr 2020 ca. 23.000 Stück elektrisch angetriebene Flurförderzeuge und ca. 56.000 handgeführte, elektrische Flurförderzeuge in Verkehr gebracht. Die Summe die LIB enthalten könnten, beträgt ca. 79.000 Stück. Wenn von einem LIB-Anteil von unter 25 % (Herstellerangaben) ausgegangen wird, ergeben sich für 2020 weniger als 19.750 in Verkehr gebrachte Flurförderzeuge mit LIB in Deutschland. Bei dem Sektor Energiespeichersysteme, wozu die Batteriespeicher für Erneuerbare Energien zählen, wurde zwischen drei Kategorien unterschieden. In der Kategorie Heimspeicher (Home Storage Systems, HSS) wurde für das Jahr 2019 eine in Verkehr gebrachte jährliche Menge von ca. 60.000 Stück ermittelt. Da nahezu nur LIB in Heimspeichern verbaut sind, werden 60.000 Stück pro Jahr mit der Menge an zugebauten LIB Heimspeichern gleichgesetzt. Gemäß den Umfrageergebnissen kann ein Zusammenhang zwischen Bränden und Batterien als Auslöser der Schadensereignisse hergestellt werden. Die Ergebnisse zeigen das hohe Gefahrenpotenzial, das von lithiumhaltigen Altbatterien ausgeht.

2.4 Betrachtung der Pfandsysteme

Das Grundprinzip von Pfandsystemen ist die Erhebung eines Pfandbetrags beim Erwerb eines Pfandguts, welches bei Rückgabe des Pfandguts erstattet wird. Wichtig ist, dass die Produktidentität des Pfandgutes entlang der Nutzungsphase weitgehend erhalten bleibt. Für Verbraucher*innen soll ein ökonomischer Anreiz geschaffen werden, sich des bepfandeten Guts zielgerichtet und somit sachgemäß sowie gesetzeskonform zu entledigen. Die daraus erzeugte Lenkungswirkung begünstigt das Generieren eines sortenreinen und qualitativ hochwertigen (Abfall-)Stroms und reduziert parallel die Diffusion des Pfandguts in andere (Abfall-)Ströme. Für die Erreichung der im Forschungsvorhaben formulierten Ziele eines Pfandsystems ist besonders relevant, dass es geeignet sein muss, ggf. bis auf wenige Ausnahmen, sämtliche Marken und Typen von LIB (auch unter Berücksichtigung des Verbaus in EAG) abzubilden. Somit ließe sich eine größtmögliche Menge ordnungsgemäß zurückführen und die Diffusion in andere Abfallströme deutlich reduzieren. Vor diesem Hintergrund wurde in der Betrachtung angenommen, dass ein potentielles Pfandsystem entsprechend flächendeckend und umfassend umgesetzt wurde. In

diesem Zusammenhang wurden folgende Grundanforderungen betrachtet: Erfassungsgrad / Lenkungswirkung, Verbraucherfreundlichkeit, Rechtlicher Rahmen, Administrativer Aufwand, Operationaler Aufwand, Missbrauchsanfälligkeit sowie Kosten. Für das Pfandgut LIB bestehen bspw. weitere zu berücksichtigende Mechanismen: Rückgabe beschädigter LIB, Automatengestützte Rücknahme von LIB, (Ver-)Bauformen sowie Pfandhöhe. In diesem Kontext wurden folgende drei grundlegende Pfandsystemprinzipien in Bezug auf die Zielsetzungen im Forschungsvorhaben betrachtet: eine „Eins zu Eins“-Rückgabe, ein durch einen Hersteller organisiertes Pfandsystem sowie ein System mit Clearingstelle Ausgehend von den betrachteten Grundprinzipien der Pfandsysteme, den Betrachtungen bzgl. der technischen Eigenschaften von LIB, den Abfallanalysen, den erlangten Umfrageergebnissen zu Schadensereignissen, den gesammelten Daten zu jährlichen Mengen der in Verkehr gebrachten LIB wurden Hypothesen zur Eignung eines Pfandsystems und Anforderungen an das Pfandgut LIB abgeleitet. Es erfolgte eine Clusterung von LIB-Gruppen. Die Clusterung wurde mit den relevanten Aspekten bzgl. einer Pfandsystematik gegenübergestellt. Auf Basis einer entwickelten Matrix wurde die Grundlage für eine Bewertung möglicher, auf diese Cluster angepasste Pfandsysteme geschaffen. Aufgrund der hohen Vielzahl und dem Umstand, dass völlig unterschiedliche Bauformen oder Typen beispielsweise in denselben Gerätetypen verwendet werden, ist eine Einteilung nach Bauformen oder Typen nicht möglich. Insofern wurde eine Clusterung auf Grundlage der Nutzungsart bzw. des Einsatzzweckes vorgenommen. Eine mögliche Eingrenzung eines LIB-Pfandsystems auf spezifische Batteriearten und Anwendungsbereiche, gerade wegen des Gebots der Verhältnismäßigkeit eines möglichen Pfandsystems, kann zunächst mit Hilfe der aufgezeigten Informationen zur Schadensauslösung abgeleitet werden. Demnach gab es Schadensfälle, die von eingebauten und losen lithiumhaltigen Gerätebatterien sowie von haushaltsnahen Industriebatterien verursacht wurden. Lithiumhaltige Industriebatterien der Elektromobilität (Traktionsbatterien für Elektro- und Hybridfahrzeuge sowie sonstige Traktionsbatterien / FFZ) waren hingegen nicht als Schadensverursacher sichtbar. Aus der Perspektive der Schadensvermeidung entlang der Erfassungs- und Abfallbehandlungskette wären Altbatterien dieser Anwendungsbereiche demnach eher unerheblich. Ein „einheitliches“ Pfandsystem wäre für eingebaute und lose lithiumhaltige Gerätebatterien sowie haushaltsnahe Industriebatterien vorstellbar. Die größte Gruppe „abfalltonnengängiger“ bzw. „fehlwurfanfälliger“ lithiumhaltiger Altbatterien bzw. (Lithium-)batteriehaltiger EAG, welche die Ursache von Brandereignissen sein können, werden so in den Fokus genommen. Die Komplexität einzelner Pfandsysteme hinsichtlich Organisation (evtl. notwendige Clearingstelle) und operationeller Umsetzung des Pfandausgleichs bei der Rücknahme ist jedoch enorm. Diesbezüglich sollte in Erwägung gezogen werden, unterschiedliche Pfandsysteme für die benannten Batterietypen/-arten und (Ver-)Bauweisen einzuführen. Ein „einheitliches“ Pfandsystem für alle LIB Batterietypen (Industrie-, Geräte- und Fahrzeugbatterien) und (Ver-)Bauformen ist bzw. wäre nicht zweckdienlich. Die Komplexität eines solchen Systems in der Organisation und in der operationellen Umsetzung der Rücknahmeprozesse ist enorm hoch. Ein vorzusehendes umfassendes Pfandsystem kann seine volle Wirkung nur dann erzielen, wenn es verpflichtend und somit rechtlich verankert ist. Das bedeutet, dass sämtliche Rücknahmestellen in ein solches System zu implementieren wären. Aufgrund des hohen Umsetzungsaufwandes kann dies jedoch dazu führen, dass künftig eine geringere Anzahl von Rückgabemöglichkeiten als derzeit zur Verfügung stehen könnte. Die Umsetzung erfordert neben der Kennzeichnung der Batterien bzw. des batteriehaltigen Geräts jedoch sehr aufwändige Mechanismen, wie die Einführung einer Clearingstelle und diverse vertragliche Regelungen zwischen Herstellern und Vertreibern. Eine automatengestützte Rücknahme von LIB bietet sich vor allem für unbeschädigte Gerätebatterien und unbeschädigte haushaltsnahe Industriebatterien an. Hierbei muss den entsprechend den Sicherheitsanforderungen im Umgang mit LIB entsprochen werden. Beschädigte und zerstörte LIB weisen ein erhöhtes Gefahrenpotential auf, weshalb sicherheitstechnische Anforderungen auch bei einem Pfandsystem in vergleichbarer Wirksamkeit erfüllt werden müssen. Eine Pfandlösung erfordert die Setzung von Rahmenbedingungen und Zeit bis die gewünschten Ergebnisse sichtbar werden, insbesondere da bereits im Markt befindliche LIB nicht nachträglich bepfandet werden können. Anfallende lithiumhaltige Altbatterien aus Regelungsbereichen außerhalb Deutschlands können die Erreichung der Ziele erschweren. Die Menge aus Regelungsbereichen außerhalb des

Geltungsbereiches des BattG ist allerdings als verhältnismäßig gering einzuschätzen. Ein Pfandsystem kann je nach Ausgestaltung positive Effekte auf die Sammelmenge von Batterien haben. Im Fall von fest verbauten LIB sind entsprechend auch auf die Sammelmenge von EAG positive Auswirkungen anzunehmen. Ist die Lenkungswirkung des Pfandsystems so groß, dass Mengen in reguläre Ströme zurückgeführt würden, die ohne Pfandsysteme in irregulären Entsorgungspfaden anlanden, hätte dies zwangsläufig eine Steigerung der Erfassungsmengen zur Folge. Bei der Ausgestaltung des Pfandsystems müssen entsprechende Akteure (wie z.B. Vertreiber, örE) vollumfänglich eingebunden werden. Die Erhöhung der Sammelmenge ist dabei maßgeblich auch an das korrekte (legale) Verhalten der entsprechenden Akteure im Rücknahmeprozess geknüpft. Aufgrund der teilweise langen Lebens- bzw. Verweildauern von zum einen fest verbauten sowie losen LIB, würde ein Pfandsystem erst mit Verzögerung zu einer Steigerung der Sammelmengen in den entsprechenden Bereichen führen.

3 SCHLUSSFOLGERUNG

Ein Lenkungsbedürfnis wurde für alle Produktgruppen im Gerätebatteriebereich erkannt. Sofern das Pfandgut als solches durch eindeutige Kennzeichnungen auf der Batterie und dem Gerät für Produktgruppen klar identifiziert werden kann, sind positive Auswirkungen zu erwarten. Im Fall der Geräte mit eingebauten Batterien müssten bei Ausgestaltung eines Pfandsystems auch die rechtlichen Regelungen der Elektro(nik)geräte (ElektroG) berücksichtigt und angepasst werden. Die Notwendigkeit von eindeutigen Kennzeichnungen und eindeutigen Verantwortlichkeiten führen jedoch zu einem Mehraufwand. Bei einer Einführung eines Pfandsystems für die Produktgruppen „lithiumhaltige nicht eingebaute Gerätebatterien (lose)“ sowie „Geräte mit eingebauten lithiumhaltigen Gerätebatterien“ wäre die mit Abstand höchste Lenkungswirkung und somit auch eine Reduzierung der Brandgefahr in irregulären Abfallströmen zu erwarten. Gleichzeitig ergäben sich weitere (Synergie-)Effekte: So besteht ein Potenzial, neben der Altbatteriesammelmenge auch die Sammelmenge von (batteriehaltigen) EAG zu steigern. Bei Pfandsystemen, die nur auf spezifische Produktgruppen begrenzt werden, bliebe die erzielbare Lenkungswirkung auf den entsprechenden Teilbereich beschränkt und es könnten weiterhin größere Diffusionen von LIB in nicht ordnungsgemäße Abfallströme stattfinden. In der Gruppe der lithiumhaltigen Industriebatterien ist nahezu ausschließlich für die „haushaltsnahen“ Industriebatterien – „Elektrofahrrad-Batterien / E-Scooter Batterien, die von Endnutzern problemlos entnehmbar sind“ – eine erhöhte Lenkungswirkung zu erwarten. Für dieses Cluster wäre aufgrund der bestehenden Vertriebsstruktur und der ähnlichen Bauformen der Batterien ein Pfandsystem denkbar. Aufgrund der langen Lebensdauer dieser Batterien ist ein Pfandsystem in Bezug auf die Erhöhung der Sammelmenge allerdings zeitversetzt zu sehen und damit eine Kapitalbindung erfolgt. Weitere Maßnahmen und Handlungsempfehlungen werden im Projektabschlussbericht aufgeführt.

LITERATURVERZEICHNIS

- BattG. (2020) Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriegesetz - BattG). 25.06.2009, Zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 3.11.2020 | 2280.
- Dornbusch (2020) Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Anteil an für die getrennte Sammlung vorgesehenen Alttextilien im Restmüll

Lisa Tatschl¹, Hana Stipanovic² & Alexia Tischberger-Aldrian²

¹⁾ AWV Judenburg, Abfallberatung, Judenburg, Österreich

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

KURZFASSUNG: Ziel des vorliegenden Beitrages war es, den Anteil an tragbaren Alttextilien im Restmüll zu erfassen und zu quantifizieren. Dazu wurden Abfallanalysen in mehreren Regionen der Steiermark (Österreich) mit unterschiedlichen abfallwirtschaftlichen Kriterien durchgeführt. Es wurden aus mehreren Restmüllproben jeder Region alle Alttextilien heraussortiert und im Anschluss mittels Handsortierung in unterschiedliche Fraktionen aufgeteilt. Daraus ergaben sich sechs Kategorien, die sich in Altkleider, Schuhe und Accessoires sowie sonstige Textilien gliederten. Zusätzlich wurde jeweils noch zwischen tragbar und nicht-tragbar unterschieden. Basierend auf den Daten der Analysen wurde das Potential an tragbaren Textilien im Restmüll berechnet und die verschiedenen Faktoren diskutiert. Die Ergebnisse dieses Beitrages zeigen, dass im Durchschnitt pro Kopf 5,1 Kilogramm Alttextilien im Restmüll erfasst wurden. Davon war mehr als die Hälfte davon noch tragbar und somit für die Wiederverwendung potentiell geeignet. Als Unterschiede der einzelnen Regionen lässt sich zum Beispiel ableiten, dass die Menge der Fehlwürfe an tragbaren Alttextilien in der ländlichen Region geringer ist als im städtischen oder intermediären Raum.

1 EINLEITUNG

Die Kreislaufwirtschaft ist ein zentrales Thema der Europäischen Union auf dem Weg ambitionierte Klimaziele zu erreichen. Der Textilsektor wird dabei auch immer mehr in den Fokus gerückt. Für eine nachhaltige Gestaltung der Abfallwirtschaft ist eine ausgereifte Sammlung unumgänglich. Weltweit fallen jährlich 92 Millionen Tonnen an Textilabfällen an. Ein Großteil landet auf Mülldeponien. Selbst in der EU werden jedes Jahr rund 5,8 Millionen Tonnen an Alttextilien entsorgt, was einer Menge von rund 11 kg pro Einwohner:in und Jahr entspricht. (Europäische Kommission 2022) Für Alttextilien gibt es ins Österreich bereits ein bestehendes System für tragbare Textilien, das derzeit jedoch überdacht wird. Im Jahr 2020 wurden in Österreich rund 240.000 Tonnen an Alttextilien gesammelt, wobei davon 61.500 Tonnen sortenrein und der Rest von 178.500 über eine gemischte Sammlung gesammelt wurden. (BMK 2023). Die Qualität der mitgesammelten Alttextilien ist bis dato unbekannt.

2 MATERIAL UND METHODIK

2.1 Auswahl der Regionen

Stellvertretend für verschiedene Sammelsysteme sowie demografische und sozioökonomische Schichten wurden vier Regionen in der Steiermark (Österreich) ausgewählt und untersucht. Region 1 repräsentiert in diesem Beitrag den ländlichen Raum mit einer Restmüllsammlung, die vorwiegend Einfamilienhäuser mit 4-wöchigen Abholintervall betrifft. Die intermediaire Region wird durch Region 2 vertreten, wo der Restmüll im Sacksystem (Holsystem) gesammelt wird. Region 3 und Region 4 spiegeln die städtischen Gebiete wider, wobei Region 3 durch Einfamilienhäuser geprägt ist und in Region 4 im Vergleich vorwiegend Mehrparteienhäuser vorliegen.

2.2 Ablauf der Probenahme und Sortieranalyse

Um den Anteil der tragbaren HH-Textilien im Restmüll beurteilen zu können, war es erforderlich entsprechende Proben zu ziehen. Dafür wurden vorab die Restmüllanalysen aus 2018/19 als Datenbasis herangezogen (Restmüllanalysen Steiermark 2018/19). Laut Analysen befinden sich rund 3,8 % Textilien und 1,2 % Schuhe im Restmüll, woraus sich insgesamt 5,0 % HH-Textilien im Restmüll ergeben. Um somit auf eine zuvor festgelegte Fraktion an HH-Textilien von mind. 25 kg pro Probenahme zu kommen, ergab sich, dass pro Probenahme ca. 500 kg Restmüll zu untersuchen waren.

Aus jeder Region wurde eine Sammeltour ausgewählt und diese an drei verschiedenen Tagen (verteilt über drei Monate) betrachtet und jeweils eine Probenahme des angelieferten Restmülls direkt an Umschlagplätzen durchgeführt (d.h. es wurden 3 Probenahme pro Region durchgeführt). Von einer Untersuchung einzelner Restmüllbehälter wurde abgesehen, da die Repräsentativität als zu gering beurteilt wurde. Die Abfallanalysen erfolgten deshalb an sogenannten Umladestationen, an denen Abfälle, die von Sammelfahrzeugen gesammelt wurden für den weiteren Transport entleert wurden. Eine Sammeltour hatte grundsätzlich immer die gleiche Route und der Abfall im betrachteten Sammelfahrzeug spiegelte daher immer das Verhalten der gleichen Haushalte wider. In den Regionen 1 und 2 war die Sammeltour an allen drei Tagen komplett ident und in den Regionen 3 und 4 waren leichte Abweichungen möglich, jedoch deckten sie immer dasselbe Gebiet ab. Die Probenahme wurde an allen Standorten und Tagen gleich durchgeführt. Das Abfallsammelfahrzeug, ein Hecklader mit Presse, entleerte den gesamten Inhalt einer zuvor bestimmten Sammeltour an einem vor Wind und Wetter geschütztem Ort in einer Halle. Für die eigentliche Probenahme wurde ein Radlader gewählt, da die Probenahme immer direkt vor Ort in den Regionen stattfand und ein Radlader in jeder Region zur Verfügung stand. Vor der Probenahme wurde der Abfallhaufen mittels Radlader vermischt, um so eine möglichst homogene Grundgesamtheit zu garantieren. Für die Entnahme der Probe fuhr der Radlader mit der Schaufel in den zuvor entleerten und durchmischten Restmüllhaufen und zog so eine Teilprobe mit dem Volumen einer Radladerschaufel heraus. Die entnommene Probe wurde mit Hilfe des Radladers in der Halle am Boden verteilt. Mit Hilfe von Gabeln, Rechen und Schaufeln wurden alle HH-Textilien aus dem Restmüll aussortiert, auch kleinste Textilien, wie Socken oder Stoffreste, wurden erfasst. Jene HH-Textilien, die bei der Probenahme aus dem Restmüll gezogen wurden, wurden im Anschluss per Hand sortiert.

2.3 Sorterkategorien

Die HH- (Haushalts-)Textilien wurden zunächst in drei Kategorien – Altkleider, Schuhe und Accessoires und sonstige Textilien – unterteilt. Kleidung, wie Jeans oder T-Shirts zählten zur Kategorie der Altkleider. Unter Schuhe und Accessoires fielen auch Gegenstände wie Taschen, Hosen oder Halstücher. Vorhänge, Teppiche, Bettwäsche und weitere Heimtextilien gehörten zur Kategorie der sonstigen Textilien. Somit ergaben sich aus der Analyse sechs Kategorien.

Die 6 Kategorien wurden anschließend in die Kategorien „tragbar“ und „nicht-tragbar“ sortiert, da der Anteil an tragbaren HH-Textilien im Restmüll untersucht werden sollte.

Als tragbar wurden alle Altkleider, Schuhe und Accessoires sowie sonstige Textilien eingestuft, die eigentlich über die getrennte Altkleidersammlung gesammelt werden sollten und werden in dieser Arbeit unter dem Begriff HH-Textilien zusammengefasst. Für die Altkleidersammlung gibt es in der Steiermark eine genaue Definition laut steirischem Abfall-ABC (BMNT 2019), das für die Kategorie „tragbar“ als Grundlage diente. Der Begriff tragbar ist sehr subjektiv und wird daher für diese Arbeit im Folgenden definiert: Tragbar bzw. verwendbar sind HH-Textilien, die keine offensichtliche Beschädigung, wie Löcher oder Flecken haben. Um die Tragbarkeit zu beurteilen war es notwendig, jedes Teil einzeln zu betrachten, um somit keine Löcher zu übersehen, die die Kleidung untragbar machen. Außerdem wurden Reißverschlüsse auf ihre Funktionalität geprüft

und Verschmutzungen beurteilt. Die Verschmutzung durch den mitgesammelten Restmüll machte die HH-Textilien in dieser Untersuchung trotzdem tragbar, da diese Art von Verschmutzung durch eine korrekte Sammlung über die getrennte Altkleidersammlung zuvor nicht vorliegen würde. Es war meist deutlich zu erkennen, ob die Verschmutzung durch die Mitsammlung über den Restmüll entstanden ist oder bereits zuvor auf den HH-Textilien vorhanden war.

3 ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aus den Ergebnissen der Analysen ergaben sich je nach Region unterschiedliche Anteile an HH-Textilien im Restmüll und auch unterschiedliche Anteile an tragbaren HH-Textilien.

Für den Vergleich der Regionen wurde der Anteil der tragbaren HH-Textilien im Restmüll pro Kopf berechnet. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass im Durchschnitt 5,1 kg/EW*a an HH-Textilien im Restmüll zu finden waren. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse nach Regionen und die derzeitig getrennt erfassten HH-Textilien über die getrennte Altkleidersammlung.

Tab. 1: Aufkommen an HH-Textilien pro Einwohner und Jahr in den untersuchten Regionen, alle Angaben in kg/EW*a

	Bereits getrennt erfasst*	Anteil im Restmüll	Anteil tragbar	Anteil nicht-tragbar
Region 1	6,7	4,8	1,2	3,6
Region 2	5,7	6,0	3,1	2,9
Region 3	4,2	4,7	1,7	3,0
Region 4	4,2	4,9	2,1	2,8
<i>Durchschnitt</i>	<i>5,2</i>	<i>5,1</i>	<i>2,0</i>	<i>3,1</i>

* bereits über die getrennte Sammlung entsorgt

In Abbildung 1 sind die Ergebnisse nach der Tragbarkeit der HH-Textilien grafisch dargestellt. Werden Region 3 und Region 4 verglichen, ist der Anteil an HH-Textilien pro Kopf sehr ähnlich. Aufgrund der schlechteren Trennmoral, die auf Erfahrungswerten des AWV basieren, wird in Region 4 ein deutlich schlechteres Ergebnis als in Region 3 erwartet. Dies konnte nicht wirklich bestätigt werden, da pro Kopf 4,9 (Region 4) bzw. 4,7 kg/EW*a (Region 3) an HH-Textilien im Restmüll gesammelt werden. Die zweite Hypothese, dass der tragbare Anteil durch die schlechte Trennmoral in Region 4 höher sein würde, konnte bestätigt werden, da der Anteil an tragbaren HH-Textilien mit 2,1 kg/EW*a in Region 4 höher als in Region 3 mit 1,7 kg/EW*a war. In Massenprozent ausgedrückt bedeutet das, dass im Region 4 43,3 % der HH-Textilien im Restmüll tragbar war und im Vergleich dazu in Region 3 nur 36,1%. Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang jedoch die Qualität der tragbaren Kleidung. In Region 3 wurde qualitativ hochwertigere Kleidung, vor allem Markenware, im Restmüll vorgefunden, dagegen wurde in Region 4 eher Kleidung minderwertiger Qualität festgestellt.

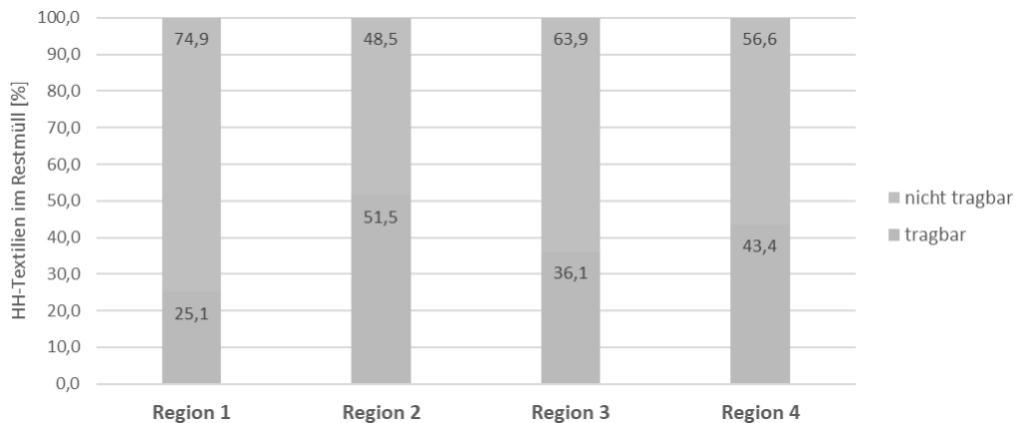


Abb. 1: Vergleich der Regionen in Bezug auf die Tragbarkeit der HH-Textilien im Restmüll

Im Durchschnitt befanden sich insgesamt 5,1 kg/EW*a an HH-Textilien, wobei davon noch 39 % tragbar waren. Im Restmüll der ländlichen Region 1 waren 25,1 % der Alttexilien noch tragbar, was umgerechnet 1,2 kg pro Einwohner:in und Jahr entsprach. In den städtischen Gebieten Region 3 und Region 4 fie die Verteilung der Tragbarkeit mit 36,1 % und 43,4 % der Alttexilien im Restmüll sehr ähnlich aus. Vor allem der große Anteil an noch tragbaren Textilien in Region 2, welche den intermediären Raum repräsentierte, war mit 51,5 % besonders bemerkenswert. Vergleicht man die Menge an tragbaren Textilien im Restmüll pro Kopf, war diese ebenfalls in Region 2 mit 3,1 kg/EW*a deutlich höher als in den städtischen oder ländlichen Gebieten. Im Durchschnitt waren im Restmüll pro Einwohner:in und Jahr 2,0 kg an tragbaren HH-Textilien im Restmüll zu finden, welche derzeit eigentlich über eine getrennte Altkleidersammlung entsorgt werden sollten. Werden die bereits getrennt erfassten Altkleider mit dem errechneten Anteil an tragbaren Alttexilien summiert, ergeben sich somit 7,2 kg/EW*a, die theoretisch für eine Wiederverwendung zur Verfügung stünden. Die Menge, die – nach dem derzeit in Österreich geltenden Sammelsystem – richtig über den Restmüll entsorgt werden und als nicht-tragbar eingestuft wurde, liegt bei 3,1 kg/EW*a. Die Untersuchungen ergaben, dass das Potential an Textilien, die derzeit über den Restmüll mitgesammelt werden, nicht zu unterschätzen ist.

LITERATURVERZEICHNIS

- BMK (2023) Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023. *Grundsätze der Abfallwirtschaft*. https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/ awsgrundsaeze.html, zuletzt abgerufen am 30.12.2023.
- BMNT (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus) (2019) *Abfall Trenn-ABC*. Wien.
- Europäische Kommission (2022) *EU-Strategie für nachhaltige und kreislauffähige Textilien*. COM(2022) 141 final.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Lisa Tatschl
 lisa.tatschl@abfallwirtschaft.steiermark.at
 0676 71 11 505
 Umwelt- und Abfallberatung, Abfallwirtschaftsverband Judenburg

Mobility Modular Load Carriers: Entwicklung modularer Mehrwegladungsträger für die Zugbauindustrie

Daniel Orth¹, Kevin Kaltenbrunner¹, Christian Pladerer¹ & Georg Vinzenz²

¹⁾ Österreichisches Ökologie-Institut, Wien, Österreich

²⁾ Siemens Mobility Austria GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Siemens Mobility Austria GmbH entwickelt im Rahmen des Projekts modulare Mehrwegladungsträger (MMLC), um die Logistik für komplexe Schienenfahrzeugprojekte nachhaltiger zu gestalten. Die innovativen Ladungsträger sind flexibel, zerlegbar und volumenreduzierbar, wodurch sie für verschiedene Komponenten projektübergreifend einsetzbar sind. Dies ermöglicht eine signifikante Reduktion von Einwegverpackungen und den damit verbundenen Abfällen. Standardisierte und schnell auswechselbare Katalogteile zur vereinfachten Reparatur können darüber hinaus die Nutzungsphase der einzelnen Bauteile verlängern. Das Projekt umfasst die Konzeption, Prototypenbeschaffung, umfangreiche Testphasen sowie eine ökologische Bewertung durch Lebenszyklusanalysen und CO₂-Bilanzen. Das Österreichische Ökologie-Institut unterstützt mit der ökologischen Bewertung der Prozesse und vergleichenden CO₂-Bilanzierungen der Einweg- und Mehrwegladungsträger-Systeme. Die erwarteten ökologischen Vorteile beinhalten erhebliche Einsparungen bei Verpackungsabfällen und eine erhöhte Ressourceneffizienz. Die Anpassung der Ladungsträgersysteme, um auch den Ausstoß von Treibhausgasen in relevantem Maße zu reduzieren ist langfristiges Ziel. Siemens Mobility setzt mit diesem Projekt ein Zeichen für verantwortungsbewusste und zukunftsorientierte Produktion, die langfristig auch ökonomische Vorteile durch reduzierte Verpackungs- und Transportkosten bietet.

1 EINFÜHRUNG

Schienenfahrzeugprojekte wie die Fertigung neuer X-Wagen U-Bahnzüge für die Wiener Linien oder die ÖBB Tag- & Nachtzüge umfassen ztausende Einzelteile und bringen enorme logistische Komplexität mit sich. Diese Herausforderung wird oft mit Einwegverpackungen bewältigt, obwohl bereits Mehrwegladungsträger (MWLT) zum Einsatz kommen. Diese sind jedoch meist projektspezifisch gestaltet und werden nach Projektende nicht weiterverwendet, was zu vermeidbarem Schrott führt. Ziel war es, den Einsatz projektübergreifender MWLT wirtschaftlich zu gestalten, indem modulare und flexible Lösungen entwickelt werden.

Die Siemens Mobility Austria GmbH, als führendes Unternehmen für zukunftsweisende Mobilitätslösungen, möchte mit dem Projekt der modularen Mehrwegladungsträger (MMLC) einen bedeutenden Schritt in Richtung nachhaltiger Logistik machen. Durch die Entwicklung flexibler und zerlegbarer Ladungsträger sollen verschiedene Komponenten projektübergreifend transportiert werden können (siehe Abbildung 1). Diese Ladungsträger werden so konzipiert, dass sie durch Steck-, Verstau- und Klappmechanismen volumenreduziert im leeren Zustand transportiert werden können. Standardisierte und schnell austauschbare Katalogteile erleichtern die Reparatur und verlängern so die Nutzungsdauer der einzelnen Komponenten. Dies fördert die Langlebigkeit der Ladungsträger und reduziert gleichzeitig Einwegverpackungsabfälle sowie den Ausstoß von Treibhausgasen durch Transporteinsparungen.

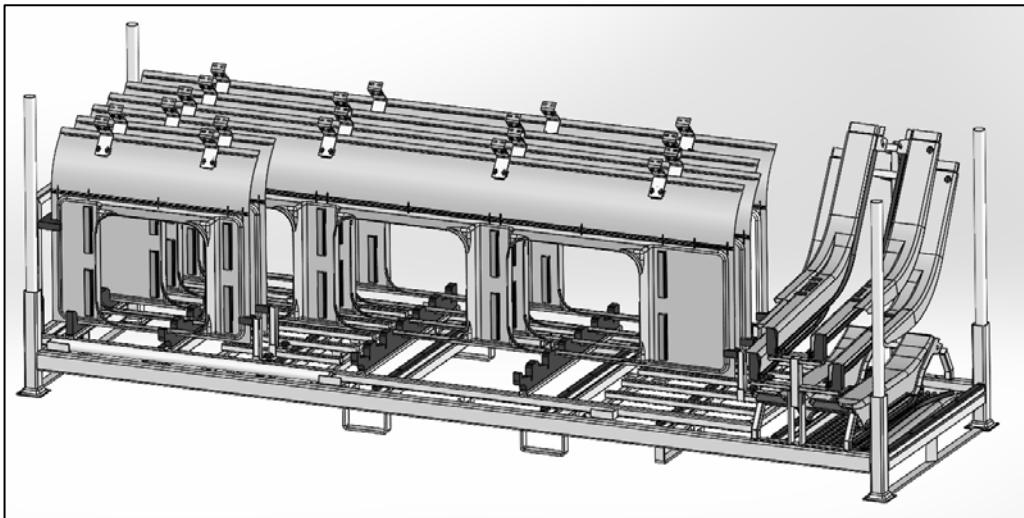


Abb. 1: Multiple Modular Load Carrier in beladener Form, Rendering ©Siemens Mobility Austria GmbH

Vor Projektbeginn wurden Verpackungs- und Transporterfordernisse häufig mit Einwegverpackungen gelöst. Mehrwegladungsträger, wenn überhaupt eingesetzt, waren projektspezifisch und nach Projektabschluss nicht weiterverwendbar. Diese Herangehensweise förderte die Nutzung von Einwegverpackungen, da projektübergreifende Lösungen aufgrund ihrer höheren Anschaffungskosten und der zusätzlichen Rücktransportkosten oft abgelehnt wurden.

2 PROJEKTDDETAILS UND UMSETZUNG

Das Konzept der MMLC sieht die Entwicklung standardisierter Grundladungsträger in unterschiedlichen Größen vor, die an spezifische Projektanforderungen angepasst werden können. Diese Ladungsträger sind im Werk Wien angesiedelt und können projektübergreifend genutzt werden.

Die Entwicklung der MMLC umfasst mehrere Phasen:

Konzeption: Die technische Detailplanung und Konzeption der modularen Ladungsträger unter Berücksichtigung von Eco-Design-Aspekten. Eine wissenschaftliche Begleitung stellt sicher, dass alle Anforderungen an Kreislaufwirtschaft und Reparaturfähigkeit berücksichtigt werden.

Beschaffung der Prototypen: Nach der Marktforschung und Auswahl geeigneter Produzenten erfolgt die Feinabstimmung und Auftragerteilung für die Fertigung der Prototypen.

Testphase: Die Prototypen werden unter Realbedingungen getestet. Dabei wird die praktische Anwendbarkeit der Ladungsträger bei Komponentenproduzenten und im Siemens Werk in Wien überprüft.

Ökologische Bewertung: Die Entwicklung von Kennzahlen zur Einsparung von Abfällen und Treibhausgasen erfolgt anhand eines Umsetzungsbeispiels. Eine CO₂-Bilanz und Lebenszyklusanalysen zeigen die ökologischen Vorteile der MMLC.

Evaluierung und Vorbereitung für den Serieneinsatz: Die gesammelten Erkenntnisse werden in einem Gesamtkonzept zusammengefasst und evaluiert. Dieses Konzept dient als Basis für den Serieneinsatz.

Projektmanagement: Die Leitung und Koordination des Projekts, inklusive interdisziplinärer Abstimmungen und Dokumentation des Projektfortschritts, sind wesentliche Bestandteile des Projektmanagements.

2.1 CO₂-Bilanzierung

Ein zentraler Bestandteil des Projekts modulare Mehrwegladungsträger (MMLC) bei Siemens Mobility Austria GmbH ist die umfassende CO₂-Bilanzierung, um die ökologischen Vorteile der neuen Logistiklösung quantitativ zu bewerten und zu belegen. Die CO₂-Bilanzierung erfolgt durch eine systematische Analyse der gesamten Wertschöpfungskette der Ladungsträger, von der Herstellung über die Nutzung bis hin zur Wiederverwertung.

2.2 Methodik

Die CO₂-Bilanzierung basiert auf international anerkannten Standards und Methoden der Lebenszyklusanalyse (LCA). Dabei werden die relevantesten bzw. intensivsten Emissionsquellen berücksichtigt. Der Cutoff Point für die Berücksichtigung der Bauteile lag bei 1 Masseprozent der Gesamtmasse der Ladungsträger. Folgende Lebensphasen wurden in der Bilanzierung einbezogen:

- Rohstoffgewinnung und -verarbeitung: Die Emissionen, die bei der Gewinnung und Verarbeitung der Materialien für die MMLCs anfallen, werden detailliert erfasst.
- Herstellung: Die CO₂-Emissionen, die durch die Produktion der modularen Mehrwegladungsträger entstehen, werden analysiert. Hierzu zählen Energieverbrauch und direkte Emissionen in der Produktionsstätte.
- Transport: Die Emissionen, die durch den Transport der Ladungsträger vom Hersteller zum Einsatzort sowie zwischen verschiedenen Standorten innerhalb der Produktionskette anfallen, werden berücksichtigt.
- Nutzung: In der Nutzungsphase wird der Einfluss der MMLCs auf die Gesamtemissionen bewertet. Dies umfasst die Reduktion von Einwegverpackungen und die dadurch vermiedenen Abfallmengen.
- End-of-Life: Die Emissionen, die am Ende des Lebenszyklus durch Recycling oder Entsorgung der Ladungsträger entstehen, werden ebenfalls in die Bilanz einbezogen.

Die vorläufigen Ergebnisse der CO₂-Bilanzierung zeigen eine Reihe an Einsparungspotenzialen, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

- Rohstoffeinsparung: Durch den Einsatz langlebiger Materialien und die Möglichkeit der Wiederverwertung werden weniger Rohstoffe benötigt, was zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen beiträgt.
- Reduktion von Einwegverpackungen: Die Vermeidung von Einwegverpackungen führt zu einer deutlichen Reduktion der Verpackungsabfälle und der damit verbundenen Emissionen.
- Optimierte Transportlogistik: Die modulare Bauweise und die Möglichkeit, die Ladungsträger volumenreduziert zu transportieren, kann Transportemissionen im Vergleich zu herkömmlichen Ladungsträgern zusätzlich reduzieren.

Durch die kontinuierliche Verbesserung und Anpassung der modularen Mehrwegladungsträger sowie die fortlaufende Überwachung der CO₂-Bilanz wird Siemens Mobility in der Lage sein, die ökologischen Vorteile weiter zu maximieren. Dies unterstützt nicht nur die Umweltziele des Unternehmens, sondern trägt auch zur globalen Reduktion von Treibhausgasemissionen bei. Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus diesem Projekt können zudem als Best-Practice-Beispiel für andere Industriebereiche dienen und zu einer breiteren Akzeptanz und Implementierung nachhaltiger Logistiklösungen beitragen.

2.3 Quantitative und qualitative Auswirkungen

Das Projekt zielt darauf ab, den Einsatz von Einwegverpackungen drastisch zu reduzieren und die Effizienz in der Logistik zu steigern. Durch die modularen Ladungsträger wird eine breite, projektübergreifende Nutzung ermöglicht. Dies spart nicht nur Ressourcen und reduziert Abfall, sondern führt auch zu einer Reduktion von Treibhausgasemissionen durch weniger Transporte.

Die Nutzung von MMLC bietet zudem wirtschaftliche Vorteile, indem Verpackungs- und Entsorgungskosten gesenkt und die Planungs- und Handling-Aufwände optimiert werden. Die Einführung von MMLC wird zu geringeren Verpackungskosten und Transportkosten führen, was sich langfristig positiv auf die Gesamtprojektkosten auswirkt. Durch die Entwicklung und Implementierung der MMLC kann nicht nur die Umwelt geschont, sondern auch ein Beitrag zur Bewusstseinsbildung innerhalb und außerhalb des Unternehmens geleistet werden.

3 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Projekt der modularen Mehrwegladungsträger (MMLC) bei Siemens Mobility Austria GmbH ist ein bedeutender Schritt Richtung nachhaltiger Logistik und umweltfreundlicherer Produktion. Durch die Entwicklung flexibler und volumenreduzierter Ladungsträger wird nicht nur der Einsatz von Einwegverpackungen reduziert, sondern auch die Effizienz in der Logistik gesteigert. Dies trägt langfristig zur Reduktion von Abfall und Treibhausgasemissionen bei und unterstützt die Ziele des European Green Deal. Das Projekt half die Gesamtkosten in der Logistik zu senken und langfristig den Einsatz von Mehrwegladungsträgern weiter zu forcieren. Siemens Mobility zeigt mit diesem Projekt, wie innovative Lösungen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit in der Industrie beitragen können.

KONTAKT

Daniel Orth, MA
orth@ecology.at
Abteilung Kreislaufwirtschaft, Ressourcenschonung, Abfallvermeidung
Österreichisches Ökologie-Institut
www.ecology.at

A web-based tool to apply the UNFC for the assessment and classification of anthropogenic resource recovery projects as a basis for decision-making

Bhagya Jayasinghe¹, Iman Dorri¹, Alireza Sobouti¹, Juan Antonio Munizaga-Plaza¹ & Soraya Heuss-Aßbichler¹

¹⁾ University of Munich (LMU), Department for Earth and Environmental Sciences, Munich, Germany

ABSTRACT: The supply requirements for critical raw materials associated with the energy transition make it urgently necessary to consider the recovery of secondary raw materials from distinct waste streams. The United Nations Framework Classification of Resources (UNFC) is a generic tool that allows the classification of anthropogenic resource recovery projects in a similar way to primary raw materials principles. It takes three main criteria into account: the degree of confidence in product quantities, technical feasibility, and environmental and socio-economic viability. This article presents a crucial and novel web tool developed within the Horizon Europe project FuRaM based on the UNFC to classify the viability of recycling and recovery projects. The user-friendly web tool applies a structured approach with seven stages, including definition, assessment and classification, to determine the maturity level of the project. The holistic approach provides decision-makers with valuable insights in the opportunities and barriers of a project and it offers the opportunity to consider sustainability aspects. The application of the UNFC is illustrated using an example of mining waste recovery.

1 INTRODUCTION

The transition to sustainable energy systems necessitates a reliable supply of critical raw materials, which are essential for manufacturing technologies like batteries, wind turbines, and solar panels. The huge demand for these materials, coupled with geopolitical considerations, is leading a shift towards evaluating and recovering anthropogenic resources generated by human activities, such as waste and by-products. This shift is not only a response to supply chain constraints but also aligns with global sustainability goals by promoting circular economy principles and reducing environmental impacts associated with resource extraction.

Effective decision-making in anthropogenic resource recovery projects requires the use of a standardized methodology to assess adoption and effectiveness. The evaluation and classification of projects according to a standardized principle is an important contribution to building confidence in the quantity of recyclable materials and to sustainable resource management.

The United Nations Framework Classification of Resources (UNFC) offers a systematic framework to assess and classify these resources, aligning them with the principles applied to primary raw materials. The UNFC framework facilitates a comprehensive evaluation that encompasses not only the physical characteristics of the resources but also their environmental and socio-economic implications.

This paper presents a web-based tool developed within the Horizon Europe project FuRaM to facilitate the assessment and classification of anthropogenic resource recovery projects in line with UNFC.

2 UNITED NATIONS FRAMEWORK CLASSIFICATION FOR RESOURCES (UNFC)

The UNFC is a universally applicable scheme for resource classification, encompassing a wide range of resource types, including minerals, petroleum, nuclear fuel, renewable energy, and anthropogenic resources (United Nations Economic Commission for Europe 2020). The classification is based on three primary criteria:

- Degree of confidence in product quantities (G): This criterion evaluates the reliability of data on the amount of recoverable material.
- Technical feasibility (F): This assesses whether the recovery and processing methods are technically viable.
- Environmental and socio-economic viability (E): This examines the environmental impact and socio-economic benefits of the project.

Each criterion is divided into categories (e.g., E1, E2, E3) and subcategories (e.g., E1.1, E1.2). Resource projects are classified by combining these categories into a three-dimensional matrix (E-F-G). Each combination provides a unique classification code, which represents the specific status and potential of the project.

Although the UNFC framework was initially created for primary mineral resources and fossil fuels, it has proven adaptable to hydrothermal and other renewable energy resources. There is also a specification document to apply UNFC anthropogenic resources (United Nations Economic Commission for Europe 2018). Several studies have shown that UNFC can be applied to anthropogenic resources, e.g., recovery of materials from landfills and industry residues.

Winterstetter et al. (2015) introduced an approach by integrating mass flow analysis (MFA) with discounted cash flow (DCF) analysis, a method that proves instrumental in categorizing landfilled materials as anthropogenic 'resources' or 'reserves' under the UNFC. Their study employs MFA to quantify the extractable resource potential, while economic viability is assessed through DCF analysis using Monte Carlo simulations. In a subsequent study, Winterstetter et al. (2016) investigated the economic feasibility of mining anthropogenic resources from various sources, including old landfills, obsolete PCs, and permanent magnets in wind turbines. They classified these scenarios under the UNFC and compared the economic outcomes of mining these resources under current conditions. This analysis not only provided valuable insights into the economic viability of such projects but also explored how the choice of specific factors called modifying factors could potentially influence future economic extraction.

Another comprehensive study by Winterstetter et al. (2018) applied the UNFC to classify recovered material from three landfill-mining projects in Flanders, Belgium. These projects, which spanned various stages from exploration to production, were evaluated based on a range of factors, including site-specific parameters, project-related choices, and systematic factors that influence socio-economic parameters. This extensive analysis provides a robust understanding of the application of UNFC in different contexts.

Huber & Fellner (2018) applied the UNFC to classify the resource potential of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash for cement, metal, and salt production. Mueller et al. (2020) developed a retrospective study used the UNFC to categorize and classify the development status of the material recovery projects for bottom-ash from MSWI. Suppes & Aßbichler (2021a, 2021b, and 2021c) illustrate how the UNFC can effectively be applied to assess the potential for raw material recovery from tailing storage facilities. They identified specific factors for the assessment and demonstrated that considering environmental and social aspects can significantly impact the classification outcome. At an early stage, environmental, social, and legal aspects are carefully considered, reflecting a more comprehensive and responsible approach to sourcing and utilizing these materials.

These case studies on anthropogenic resources used different factors to assess the three UNFC axes. This variation arises because the UNFC does not prescribe a standardized set of factors to be used for assessment. Specifically, for the E-axis, which relates to the environmental and socio-economic viability, the factors taken into account vary greatly in the individual study.

The choice of factors for each study is obviously case-specific and influenced by the characteristics of the waste streams on the one hand and the stage of project development on the other. At the same time, these factors have an influence on the evaluation and classification of each study. However, these inconsistencies in terminology and categorization of the factors lead to confusion when interpreting the results. This lack of a consistent evaluation and classification makes comparison of projects challenging and points to the need for a systematic approach.

UNFC GUIDANCE EUROPE (United Nations Economic Commission for Europe 2022) provides guidance for the application of the UNFC for mineral and anthropogenic resources. However, it is only applicable to mining residues. Therefore, there is a necessity for a unified and comprehensive approach to evaluate and communicate the potential of a project to extract valuable secondary raw materials from waste streams. Standardizing criteria and conducting thorough assessments will enable more meaningful and transparent comparisons across projects, ultimately supporting better decision-making.

3 SEVEN-STAGE PROCEDURE

To address the need of a unified approach, a systematic procedure is developed focusing on the recoverability of anthropogenic resources from specific stocks and flows. This procedure provides a standardized method for evaluating project viability, ensuring consistency and transparency in the assessment process, as illustrated in Figure 1.

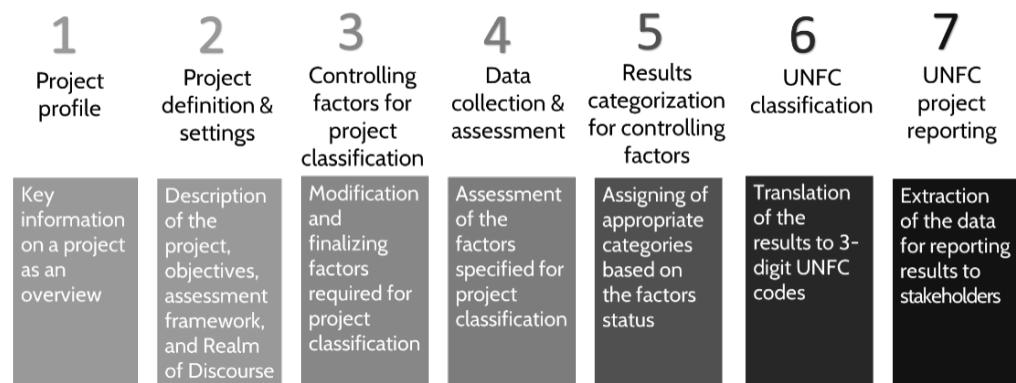


Fig. 1: Seven-stage procedure to assess and classify anthropogenic resources in line with UNFC

Stage 1 involves collecting essential information about the projects, such as the type of waste stocks/flows and the materials intended for recycling and recovery. It also identifies the current development phase of the project and gathers additional relevant information.

In **Stage 2**, the project is defined as a system, including the objectives, scope, and requirements. It considered different variants of project development scenarios to improve efficiency and effectiveness. It also identifies the stakeholders who are directly or indirectly affected by the project.

Stage 3 provides a list of controlling factors (CFs) based on the context of evaluation, which cover environmental, socio-economic, legal and technical aspects besides those related to the quantity and quality of the input and output materials. By considering these factors, the project can be evaluated holistically, ensuring all relevant aspects are taken into account.

During **Stage 4**, data and information are collected for the selected CFs. The methods, indicators and databases or protocols used for the assessment are documented.

In **Stage 5**, the results of the project evaluation are categorized to understand the project's strengths, weaknesses, opportunities and potential risks.

In **Stage 6**, the UNFC classification criteria are applied to the collected data to classify the project's viability. The results are presented in a two-dimensional form to provide a clear overview.

Stage 7 comprises the preparation of a comprehensive report that includes the classification results, strengths, weaknesses and recommendations for stakeholders. This report is UNFC-compliant, ensuring that it adheres to international standards and includes visual representations of results, such as graphs and charts, to facilitate understanding and communication of results.

4 WEB-BASED TOOL DEVELOPMENT

A web-based tool was developed to apply the seven-stage procedure (as illustrated in Figure 1) systematically and holistically. The tool is designed to streamline project classification by incorporating several key features. It allows users to input comprehensive data related to resource quantity, technical specifications, and environmental and socio-economic factors. This ensures that all relevant aspects of a project are considered from the beginning. The tool leverages automated classification algorithms to analyze the input data, providing an initial assessment of project viability with minimal user intervention. This automated process enhances efficiency and consistency in project evaluation. Additionally, the tool generates detailed reports that outline the classification results and offer recommendations for further action, enabling users to make informed decisions. To aid understanding and application, the tool includes example cases that illustrate the classification process, helping users to effectively apply the tool to their specific anthropogenic resource recovery projects.

The architecture of the web-based tool is shown in Figure 2. It comprises three main components, such as the front-end, the back-end and the database.

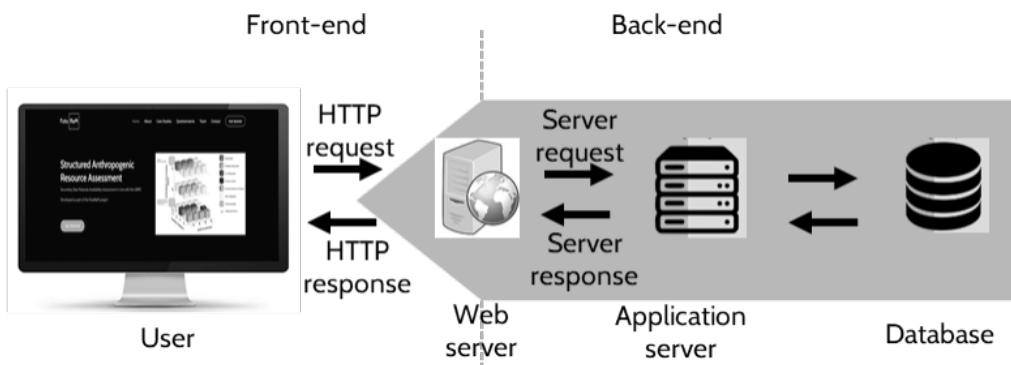


Fig. 2: System architecture of the tool

The front-end of the web-based tool is responsible for managing the visual and interactive elements that users encounter. This includes the design and layout of web pages, as well as the functionality that allows users to input data, view results, and generate outcomes. The technologies used in the front-end development typically encompass HTML for structuring web page content, CSS for styling and layout, and JavaScript for interactive elements and dynamic content. The web server handles HTTP requests from users and delivers the front-end content to their browsers, acting as an intermediary between the user's browser and the application server. The back-end of the web-based tool was developed using Django, a high-level Python web framework known for its robustness, flexibility and scalability, making it a sound choice for developing a comprehensive assessment tool. Django follows the Model-View-Template (MVT) architectural pattern, which separates the application's data model, business logic, and presentation layer. It interacts with the database to retrieve and store information, maintaining the integrity and availability of data. Depending on the requirements, Django can work with various databases, such as PostgreSQL, MySQL, SQLite and Oracle. In this study, MySQL was used for the database creation. The MySQL database comprises several tables, each with many-to-many relationships with other tables.

5 CASE STUDY

To demonstrate the functionality of the web-based tool, the data from a case study conducted on the Bollrich Tailing Storage Facility was chosen. This facility contains significant quantities of

critical raw materials such as Cobalt (Co), Gallium (Ga), and Indium (In). More details on the project and controlling factors used for UNFC categories can be found in Suppes & Heuss-Aßbichler (2021c). Three scenarios were developed; one of them was selected for the assessment. Figure 3(a) shows the result categorization for the CFs used in the F-axis. Figure 3(b) shows the overall classification of the project for the selected scenario. It has a medium level of confidence (G2) in the knowledge of the quantity and quality of the recoverable materials in the tailing storage facilities. The classification matrix indicates a low overall rating (F3.2) in the technical feasibility due to uncertainties about operation design, water consumption, etc. Furthermore, a low overall rating (E3.3) was achieved for the E-axis, due to various factors such as e.g. under-developed legal aspects, unclarified potential dust emissions, and lack of knowledge about potential financial support. This case study serves as an illustrative example of how the tool can effectively guide users through a practical interpretation of on-site exploration data, ensuring compliance with the UNFC framework.

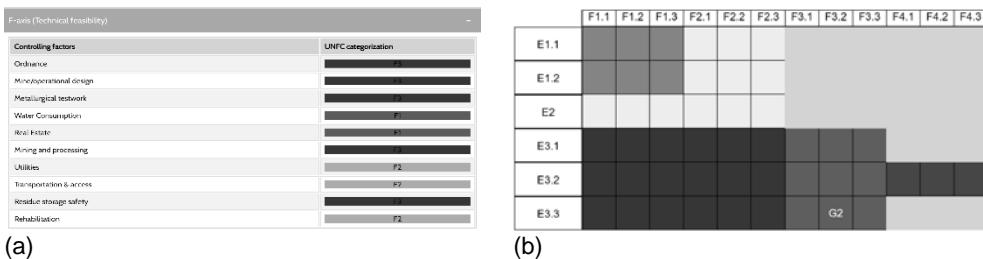


Fig. 3: (a) Example of result categorization in Stage 5, providing an overview of the controlling factors for the F-axis and the status achieved, (b) UNFC classification in a two-dimensional form, developed in Stage 6, based on the results in Stage 5

6 CONCLUSION

The development of a web-based tool for applying the UNFC to recovery projects represents a significant advancement in anthropogenic resource classification. By providing a standardized, efficient, and user-friendly platform, the tool supports the evaluation and classification of projects. The systematic approach with seven stages offers a solid base for decision-making and supports the sustainable supply of critical raw materials.

The case study of the Bollrich Tailing Storage Facility highlights the practical applications of the tool, demonstrating its capability to accurately evaluate the project's viability. In the context of the FutuRaM project, a series of case studies is being developed utilizing a web-based tool. The input of user feedback will facilitate further enhancements to the tool. Future work will focus on expanding its applicability from now six waste streams to a broader range of waste types. Furthermore, the web-based tool will focus on broadening its applicability and improving its features, e.g. by considering the context of evaluation, ensuring that it continues to be a useful and reliable resource for professionals and decision-makers involved in anthropogenic resource recovery projects. The goal is to maintain and increase the tool's relevance and effectiveness in the industry by incorporating user feedback and adapting to a wider variety of waste types.

7 ACKNOWLEDGEMENT

This article is based on research work supported by the Horizon Europe FutuRaM project.

REFERENCES

- Huber, F. & Fellner, J. (2018) *Integration of life cycle assessment with monetary valuation for resource classification: The case of municipal solid waste incineration fly ash*. Resources, Conservation and Recycling, Volume 139, pp. 17-26.
- Mueller, S. R., Kral, U., Wäger, P. A. (2020) *Developing material recovery projects: Lessons learned from processing municipal solid waste incineration residues*. Journal of Cleaner Production, Volume 259, p. 120490.
- Suppes, R. & Heuss-Aßbichler, S. (2021a) *Resource potential of mine wastes: A conventional and sustainable perspective on a case study tailings mining project*. Journal of Cleaner Production, Volume 297, p. 126446.
- Suppes, R. & Heuss-Aßbichler, S. (2021b) *How to Identify Potentials and Barriers of Raw Materials Recovery from Tailings? Part I: A UNFC-Compliant Screening Approach for Site Selection*. Resources, 10(3), p. 26.
- Suppes, R. & Heuss-Aßbichler, S. (2021c) *How to Identify Potentials and Barriers of Raw Materials Recovery from Tailings? Part II: A Practical UNFC-Compliant Approach to Assess Project Sustainability with On-Site Exploration Data*. Resources, 10(11), p. 110.
- United Nations Economic Commission for Europe (2018) *Specifications for the application of the United Nations Framework Classification for Resources to Anthropogenic Resources*. Geneva: UNECE.
- United Nations Economic Commission for Europe (2020). *United Nations framework classification for resources - Updated 2019*. Geneva: United Nations.
- United Nations Economic Commission for Europe (2022). *UNFC guidance Europe - Guidance for the application of the United Nations framework classification for resources (UNFC) for mineral and anthropogenic resources in Europe*. Geneva: United Nations.
- Winterstetter, A., Laner, D., Rechberger, H., Fellner, J. (2015) *Framework for the evaluation of anthropogenic resources: A landfill mining case study – Resource or reserve?* Resources, Conservation and Recycling, Volume 96, pp. 19-30.
- Winterstetter, A., Laner, D., Rechberger, H., Fellner, J. (2016) *Evaluation and classification of different types of anthropogenic resources: the cases of old landfills, obsolete computers and in-use wind turbines*. Journal of Cleaner Production, Volume 133, pp. 599-615.
- Winterstetter, A., Wille, E., Nagels, P., Fellner, J. (2018) *Decision making guidelines for mining historic landfill sites in Flanders*. Waste Management, Volume 77, pp. 225-237.

CONTACT

Prof. Dr. Soraya Heuss-Aßbichler

heuss@lmu.de

+49 (0) 8921806713

Ludwig-Maximilians Universität München, Department of Earth and Environmental Sciences

<https://futuram.eu>

Bewertung von Kunststoffrezyklaten hinsichtlich DNA-reaktiver Mutagenität mit in vitro Bioassays

Elisabeth Pinter¹, Elisa Mayrhofer¹, Jessica Schlossnikl², Veronica Osorio Piniella¹ & Vasiliki-Maria Archodoulaki²

¹⁾ OFI – Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik, Wien, Österreich

²⁾ TU Wien, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Regulatorische Initiativen sowie Konsument:innen verlangen den Einsatz von Rezyklat in Kunststoffverpackungen für sensible Anwendungen wie den Lebensmittelkontakt. Zurzeit sind nur wenige Materialien dafür zugelassen, außer mechanisches PET Recycling. Für andere Polymere muss noch erhoben werden, ob die Materialien den strengen Sicherheitsansprüchen entsprechen. Um erste Informationen darüber zu sammeln wurden in Forschungsprojekten Recyclingmaterialien mit Bioassays, konkret dem miniaturisiertem Ames Test und chemischer Analytik analysiert. Dabei hat sich gezeigt, dass bei einigen Rezyklaten nach der Verarbeitung Effekte detektiert wurden, welche gesundheitlich bedenklich sein könnten. So wurden am Beispiel von Etiketten als Worst-Case gezeigt, dass unerwünschte Substanzen entstehen, die entfernt werden müssen.

1 HINTERGRUND

Der Europäische Green Deal und die Konsument:innen fordern recyclingfähige Verpackungen und den Einsatz von Rezyklat. Im Entwurf der „Packaging and Packaging Waste Regulation“ sind bereits verpflichtende Rezyklatgehalte für Kunststoffverpackungen enthalten (PPWR 2022). Auch für kontakt sensible Verpackungen, wie Lebensmittelkontakt oder Kosmetika, wird der Einsatz von Rezyklat bis 2030 verpflichtend. Dies stellt die Industrie vor eine große Herausforderung, da zurzeit fast nur mechanisches PET Recycling aus dem Post-Consumer Strom (PCR) zugelassen ist. Jedoch sind auch für andere Kunststoffe, wie Polyolefine oder Polystyrol, verpflichtende Rezyklatgehalte gefordert, aber noch keine bzw. kaum Prozesse und Materialien zugelassen.

Um den Prozess der Zulassung von Rezyklaten zu aktualisieren, wurde die Verordnung (EU) Nr. 2022/1616 für Kunststoffrezyklate im Lebensmittelkontakt verabschiedet. In dieser wird in geeignete (=suitable) und neuartige (=novel) Technologien unterschieden (Kommission 2022). Geeignete Technologien sind mechanisches PET Recycling, unter definierten Bedingungen, und Closed-Loop Recyclingsysteme. Neuartige Technologien gelten für alle anderen Rezyklate, die aus der Post-Consumer Sammlung stammen. Für deren Einsatz müssen Daten erhoben werden, um deren Sicherheit für den Lebensmittelkontakt aufzuzeigen. Dafür ist insbesondere die Anwesenheit und Bewertung von unerwünschten Kontaminationen entscheidend, wobei es im Lebenszyklus einer Verpackung eine Vielzahl an Quellen gibt: u.a. Abbau des Virgin-Kunststoffs oder von Additiven, Verunreinigungen im Produktgebrauch, Kontaminationen durch das zuvor verpackte Lebensmittel, fälschlicher Gebrauch von Konsument:innen oder Kontaminationen im Recyclingprozess, usw.

Insbesondere DNA-reaktive Substanzen sind ein wichtiger Aspekt in der Sicherheitsbewertung, da diese schon in geringen Konzentrationen zu gesundheitlichen Effekten führen können. Kontaminationen mit diesen Substanzen müssen somit oberhalb des Sicherheitsgrenzwerts von 0,15 ppb vermieden werden bzw. es muss aufgezeigt werden, dass der Recyclingprozess ausreicht, um diese zu entfernen (EFSA Panel 2011).

1.1 TTC Konzept und Analyse mittels *in vitro* Bioassays

Das Threshold of Toxicological Concern (TTC) Konzept dient zur Bewertung von Substanzen hinsichtlich ihrer Sicherheit, wenn Daten zu deren Toxizität fehlen. Dafür wird basierend auf der chemischen Struktur eine Substanzklassifizierung vorgenommen und ein für diese Substanzklasse geltender Expositionsgrenzwert zugeordnet. Für DNA-reaktive Mutagene oder Karzinogene wurde ein Grenzwert von 0,15 µg / Person (60 kg) / Tag festgelegt. Für Organophosphate gilt ein Grenzwert von 18 µg / Person (60 kg) / Tag. Sofern diese Kategorien ausgeschlossen werden konnten ist die strukturelle Zuordnung in Cramer Klassen möglich, wobei in die folgenden Gruppen unterteilt wird: Cramer Klasse III (90 µg / Person (60 kg) / Tag), Klasse II (540 µg / Person (60 kg) / Tag) und Klasse I (1.800 µg / Person (60 kg) / Tag) (EFSA 2019).

DNA-reaktive, mutagene Substanzen sind sehr divers in ihren Eigenschaften: so können sie u.a. polar oder unpolar bzw. leicht flüchtig oder schwer flüchtig sein. Wie beschrieben gilt für diese kritische Substanzkategorie ein sehr niedriger Grenzwert von 0,15 µg / Tag für eine „Standard-person“ mit 60 kg Körpergewicht. Dies macht es schwierig sie mittels chemischer Analytik in einem Screening abzudecken. Alternativ werden biologische Testsysteme, sogenannte *in vitro* Bioassays, verwendet (Schilter, et al. 2019). Diese basieren auf Zellen (wie z.B. Humanzellen) oder Bakterien, die Rückschlüsse auf den Effekt einer Substanz geben können. Dabei wird die Substanz nicht identifiziert, sondern stattdessen die Wirkung auf die Zellsysteme oder deren DNA ermittelt. Für die Analyse von genotoxischen Effekten steht eine Vielzahl an Bioassays zur Verfügung, wobei für die Detektion von den besonders kritischen DNA-reaktiven mutagenen Substanzen der Ames Test als Goldstandard identifiziert wurde. Dieser misst zuverlässig und in niedrigen Konzentrationen mutagene Substanzen und wird sowohl in der pharmazeutischen Industrie, als auch in der Umwelttoxikologie eingesetzt (Rainer et al. 2018).

2 METHODIK

Im Rahmen des FFG-Forschungsprojekts „Pack2theLoop“ und des CORNET Projekts „Poly-Cycle“ wurde der miniaturisierte Ames Test (eine Variante mit hohem Durchsatz, niedriger Nachweisgrenze und geringeren Probenvolumen) eingesetzt und eine Vielzahl von Recyclingmaterialien (Post-Consumer, Post-Industrial, Input, Output, Zwischenschritte) analysiert (siehe: Mayrhofer et al. 2023). Proben wurden sowohl industriell hergestellt, als auch mittels einem Laborextruder EXTRON EX-18-26-1.5 (siehe: Schlossnikl et al. 2024). Ergänzend zu den Bioassays wurde chemische Analytik mittels HS-SPME-GC/MS-Screening durchgeführt und eine Sensorik-Analyse auf Fehlgerüche mit einem Sensorik-Panel erhoben.

3 RESULTATE

3.1 Ergebnisse Recyclingmaterialien

Eine Vielzahl an Rezyklaten wurde mittels miniaturisierten Ames Test analysiert, welche eine große Bandbreite an Qualitäten und Inputströmen abdecken (Mayrhofer et al. 2023). Wie in Abb. 1 erkenntlich sind PET Rezyklate, welche auch bereits zugelassen sind, nicht DNA-reaktiv im Ames Test und zeigen somit keine bedenklichen Effekte. Sowohl bei Polyolefin- und Polystyrolmaterialien wurden Effekte gefunden, welche auf die Präsenz von DNA-reaktiven, mutagenen Substanzen hinweisen. Die Detektion systematischer Effekte im Outputmaterial führte zu der Schlussfolgerung, dass es sich um Abbauprodukte der Verarbeitung handeln könnte. Insbesondere Materialien, die aus bedruckten Inputströmen stammten, wiesen diese Effekte auf. Deshalb wurden im nächsten Schritt dekorative Materialien, wie Etiketten betrachtet, welche einen hohen Bedruckungsgrad aufweisen.

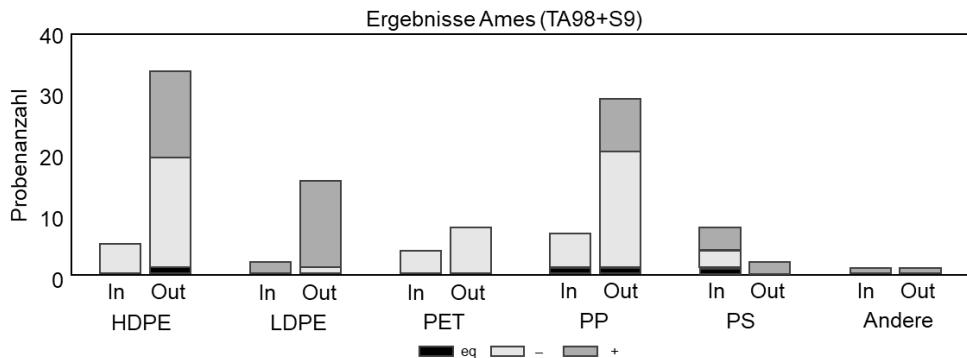


Abb. 1: Zusammenfassung der Ergebnisse von Input- und Output-Recyclingmaterialien mittels miniaturisiertem Ames Test in der Testbedingung TA98+S9. Hellgraue Balken zeigen negative Ergebnisse, dunkelgraue Balken repräsentieren Proben, die positiv sind und somit eine potenziell DNA-reaktive, mutagene Wirkung aufzeigen. Uneindeutige Proben sind in schwarz gekennzeichnet. (Mayrhofer et al. 2023)

3.2 Ergebnisse Etikettenanalysen

Definierte reine post-industrial (PIR) Etikettenfraktionen wurden verarbeitet und mittels miniaturisiertem Ames Test analysiert. Dies stellt ein absolutes Worst-Case Szenario dar: diese Etiketten sind normalerweise nicht direkt im Kontakt mit den Lebensmitteln, sondern nur außen auf der Verpackung angebracht und bilden einen rein fiktiven 100 % Etikettenrezyklatstrom ab. Die Ergebnisse in Abb. 2 zeigen, dass die unverarbeiteten PIR-Etiketten schwach DNA-reaktiv Effekte aufzeigten, verglichen mit Proben nach der Verarbeitung nahm das Signal stark zu, was in der zugehörigen Dosis-Wirkungskurve ersichtlich ist.

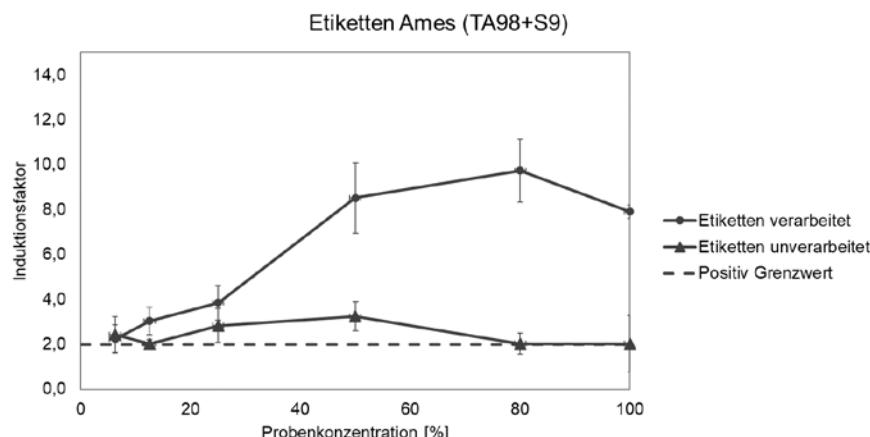


Abb. 2: Ergebnisse des miniaturisierten Ames Tests verarbeiteter (Kreis) und unverarbeiteter (Dreieck) PIR-Etiketten. Die unverarbeiteten Proben sind schwach DNA-reaktiv im Ames Test Stamm TA98+S9. Nach der Verarbeitung verstärkt sich das Signal und zeigt eine Dosis-Wirkungskurve

Im HS-SPME-GC/MS-Screening wurde eine Vielzahl an Substanzen gefunden, die toxikologisch in Cramer Klassen eingestuft wurden, wie in Abb. 3 ersichtlich. Insbesondere in den PCR-Etiketten wurde eine Vielzahl an Substanzen gefunden, wobei der Großteil nicht identifiziert werden konnte. Tendenziell wurden bei den verarbeiteten Etiketten mehr Substanzen gefunden, sowie eine Vielzahl an nicht-identifizierbaren Substanzen im PCR-Material.

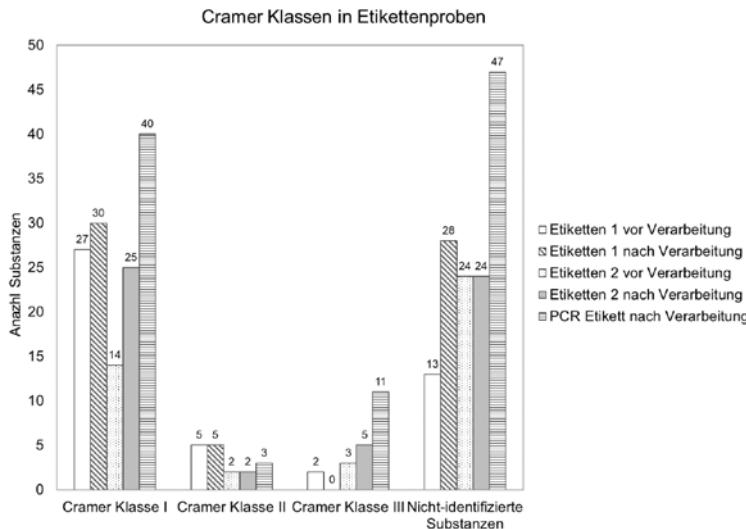


Abb. 3: Übersicht der Cramer Klassen basierend auf den Ergebnissen der chemischen Analytik

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Anhand der Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass das derzeit zugelassene Recyclingmaterial aus PET sicher ist. Bei neuartigen Materialien hat sich gezeigt, dass einige systematische Verunreinigungen stattfinden, die entfernt werden müssen, um deren sicheren Einsatz als Rezyklate im Lebensmittelkontakt zu ermöglichen. Insbesondere Substanzen in dekorativen Elementen, wie Etiketten, können problematisch im Recycling werden und müssen intensiv betrachtet werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- EFSA Panel, o. o. (2011). Scientific Opinion on the criteria to be used for safety evaluation of a mechanical recycling process to produce recycled PET intended to be used for manufacture of materials and articles in contact with food. *EFSA Journal*.
- EFSA, S. C. (2019). Guidance on the use of the Threshold of Toxicological Concern approach in food safety assessment. *EFSA Journal*.
- Kommission. (2022). Verordnung (EU) 2022/1616 der Kommission vom 15. September 2022 über Materialien und Gegenstände aus recyceltem Kunststoff, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen, und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 282/2008.
- Mayrhofer, E., Prieling, L., Sharp, V., Rainer, B., Kirchnawy, C., Rung, C., . . . Springer, A. (2023). Safety Assessment of Recycled Plastics from Post-Consumer Waste with a Combination of a Miniaturized Ames Test and Chromatographic Analysis. *Recycling*.
- PPWR, D. (2022). Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on packaging and packaging waste, amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC, COM/2022/677 final.
- Rainer, B., Pinter, E., Czerny, T., Riegel, E., Kirchnawy, C., Marin-Kuan, M., . . . Tacker, M. (2018). Suitability of the Ames test to characterise genotoxicity of food contact material migrants. *Food Additives & Contaminants: Part A*.
- Schilter, B., Burnett, K., Eskes, C., Geurts, L., Jacquet, M., Kirchnawy, C., . . . Boobis, A. (2019). Value and limitation of in vitro bioassays to support the application of the threshold of toxicological concern to prioritise unidentified chemicals in food contact materials. *Food Additives & Contaminants: Part A*.
- Schlossniki, J., Pinter, E., Jones, M. P., Koch, T., & Archodoulaki, V.-M. (2024). Unexpected obstacles in mechanical recycling of polypropylene labels: Are ambitious recycling targets achievable? *Resources, Conservation and Recycling*.

Circular-Economy-Ansätze für Kunststoff-Außenwerbungsplakate

Paul Steiner, Nicole Lasslop, Fabian Weller, Maximilian Auer, Jannick Schmidt & Jörg Woidasky

Hochschule Pforzheim, Fakultät für Technik, Arbeitsgruppe Nachhaltige Produktentwicklung, Pforzheim, Deutschland

KURZFASSUNG: Papier- oder Kunststoffplakate sind wichtige Medien der Außenwerbung. Sie finden u.a. regelmäßig bei Wahlkämpfen ihren Einsatz. Die Publikation stellt Ansätze der Circular Economy für PP-Hohlkammerplakate bereit. Ergänzende experimentelle Untersuchungen gebrauchter Hohlkammer-Wahlplakate umfassen Kombinationen aus Zerkleinern, Waschen, Entschichten, Extrusion und Spritzguss. Die Auswirkungen dieser Schritte auf die werkstoffliche Verwertung des Polypropylens durch Bestimmung der rheologischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften wurden quantifiziert. Die Ergebnisse lassen nur geringe thermooxidative Veränderungen während des Recyclings vermuten, da lediglich geringe Auswirkungen auf die Zugfestigkeit des wiederverwerteten PP beobachtet werden. Deutliche Unterschiede zeigen sich jedoch bei der Bruchdehnung, so dass zur Verbesserung der zirkulären Produkteigenschaften aus werkstofflicher Sicht der Einsatz von Waschprozessen für die Aufbereitung gebrauchter Hohlkammerplakate aus Außeneinsätzen empfohlen wird. Grundsätzlich sind gebrauchte Wahlplakate jedoch gut für die Kreislaufführung geeignet, auch wenn das Ökodesign-Potential bei diesen Medien der Außenwerbung noch nicht vollständig ausgeschöpft ist.

1 EINLEITUNG

Zur Bundestagswahl 2017 wurden in Deutschland etwa 2,4 Mio. Wahlplakate genutzt (Geiger et al. 2021), und auch bei der Bundestagswahl 2021 spielten Wahlplakate eine zentrale Rolle (Müller et al. 2021), was sich in den hohen Werbeausgaben der Parteien widerspiegelt (z. B. SPD: 4,3 Mio. € und Grüne: 2,9 Mio. €) (Nielsen 2022a, Nielsen 2022b). Für die Wahlwerbung werden neben Großflächenplakaten vor allem masthängende Allwetter- und Systemplattenplakate verwendet, die mithilfe von Kabelbindern aus Polyamid (PA) als Einzel- oder Doppelplakat meist im DIN-A1-Format zum Einsatz kommen. Dabei besitzen Plakate, je nach Ortsrecht, eine maximale Nutzungsdauer von etwa drei Monaten (Erhardt-Maciejewski 2021).

Hohlkammerplakate aus Polypropylen (PP) zählen zu den Systemplattenplakaten. Sie sind grundsätzlich für eine Kreislaufführung geeignet, und einzelne spezialisierte Entsorgungsunternehmen machen daher bereits Rücknahmeangebote. Als kreislaufhinderlich stellen sich insbesondere die vollflächige Bedruckung der Plakate, Verschmutzungen, Aufkleber, äußere Umwelteinflüsse (z. B. UV-Strahlung) oder die Kabelbinder dar (Dehoust et al. 2021, Orth et al. 2022, Ragaert et al. 2017). Im Folgenden soll untersucht werden, welcher Aufwand für eine hochwertige Kreislaufführung bedruckter PP-Hohlkammerplakate erforderlich ist. Hierzu wurde eine Charge gebrauchter Wahlplakate beschafft, gewaschen, teilweise entschichtet und extrudiert. Die Proben wurden hinsichtlich ihrer werkstofflichen Eigenschaften (mechanisch, chemisch, rheologisch) analysiert.

2 EIGENSCHAFTEN VON WAHLPLAKATEN

Nach der Bundestagswahl wurden Ende September 2021 in einer süddeutschen Großstadt insgesamt 233 Wahlplakate erfasst und davon 135 Stück (PP-Hohlkammerplakate 106 Stk; Allwetterplakate 29 Stk) zufällig ausgewählt (Geiger et al. 2021). Die durchschnittliche Masse pro Plakat lag bei 594 g. Die Allwetterplakate bestehen hauptsächlich aus Recycling- und Kraftpapier mit einer witterungsbeständigen Schutzfolie aus Polyethylen. Das durchschnittliche Flächengewicht der Allwetterplakate beträgt 471,3 g/m² und der PP-Hohlkammerplakate 441,5 g/m². Eine

Abschätzung des Treibhausgaspotentials der eingesetzten Werkstoffmassen weist auf eine deutlich höhere Umweltwirkung der PP-Hohlkammerplakate (1,287 kg CO_{2eq}) im Vergleich zu Allwetterplakaten (0,367 kg CO_{2eq}) (Geiger et al. 2021) hin. In dieser materialfokussierten Abschätzung bleibt jedoch die Plakatherstellung und –entsorgung unberücksichtigt.

Beim PP-Basismaterial der untersuchten Plakate wurden graue, weiße sowie grünliche Farbtönungen beobachtet. Bei allen PP-Hohlkammerplakaten wurde die Druckfarbe unmittelbar auf das Material gedruckt. Die Druckfarben wurden nicht weitergehend analysiert. Die Wahlplakate einer Partei zeigten zudem durch eine zusätzliche PP-Folie über der Druckschicht (Geiger et al. 2021) eine glänzende Oberfläche. Zusätzlich wurde ein Teil der Plakate auf einer Holz-Europalette fixiert und für vier Wochen im Juni 2024 auf einem Flachdach in Pforzheim mit der bedruckten Plakatseite horizontal den Umgebungseinflüssen ausgesetzt. Ein Plakat der Europawahl 2024 (Juni 2024) diente als ergänzende Referenzprobe.

Es wurden die Plakat-Formate DIN A1 (75,6%), DIN A0 (14,8 %) und 590x780mm (9,6%) gefunden. Die Plakate werden meist als Einzelplakat-Paar (57,0%) oder Doppelplakat (42,2%) ausgeführt. Alle Allwetterplakate sind als Doppelplakat ausgeführt. Die Plakate wurden mit Kabelbindern an Straßenlaternen o. ä. befestigt. Bei 6,7% der Plakate wurden Heftklammern verwendet, um beide Plakatseiten zu verbinden. Für die Befestigung der Wahlplakate wurden 709 Kabelbinder (1,87 kg) in den Farben weiß (62,6%), schwarz (37,1%) und grün (0,3%) verwendet. Für die weißen und grünen Kabelbinder wurde mittels Nahinfrarot-Analysen Polyamid (PA) als Werkstoff identifiziert, während schwarze Kabelbinder durch NIR nicht identifiziert werden konnten. Es ist wahrscheinlich, dass hier ebenfalls PA zum Einsatz kam. Doppelplakate benötigen weniger Kabelbinder, (4,9 Stk bzw. 14,1 g Kabelbinder) als Einzelplakat-Paare (5,7 Stk, 13,5 g). Bei Wahlplakaten mit einer größeren Anzahl vorgestanzter Löcher werden mehr Kabelbinder eingesetzt als bei solchen mit weniger Befestigungsöffnungen (Tab. 1), was aus Eco-Design-Sicht auf Material-Einsparpotential hindeutet, ebenso wie das Einbringen eines Dreiviertelkreis-Schnittes anstelle eines vollständigen Ausstanzens einer kreisförmigen Befestigungsöffnung im Plakat. Weiters Einsparpotential birgt in der Verwendung von kürzeren Kabelbindern (< 300 mm), welche bei Bedarf zur größeren (>300 mm) zusammengesteckt werden könnten (Abb. 1).

Tab. 1: Abhängigkeit des Kabelbindereinsatzes von der Plakat-Lochung

Plakat-Lochungs-Variante	Prozentualer Anteil (n=135)	Durchschnittliche Masse von Kabelbindern je Plakat in [g]	Durchschnittliche Anzahl von Kabelbindern je Plakat [Stk.]	Vorgesehene Kabelbinderanzahl je Plakat
7er	20,7%	14,14	4,86	3 kurze und 2 lange
10er	40,7%	13,51	5,40	6 kurze und 2 lange
11er	11,1%	12,67	4,60	3 kurze und 2 lange
12er	0,7%	26,00	4,00	4 lange
13er	10,4%	16,00	4,21	3 kurze und 2 lange
20er	16,3%	13,36	6,55	8 kurze und 4 lange

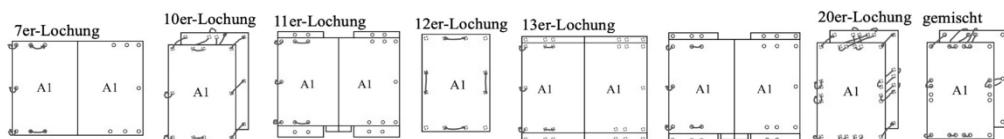


Abb. 1: Plakat-Lochungsvarianten und Kabelbinder je Plakatformat, grün: lange Kabelbinder, rot: kurze Kabelbinder (Geiger et al. 2021)

3 VERWERTUNG UND CHARAKTERISIERUNG

Die Wahlplakate wurden in fünf Kategorien eingeteilt, davon vier nach der Materialfärbung (weiß, weiß foliert, grau und grün) plus eine Mischprobe. Neben unbehandeltem Granulat wurden zusätzlich die Varianten „gewaschen“ und „entschichtet und gewaschen“ untersucht. Insgesamt ergaben sich neun Versuchsreihen (Tab 2). Unbehandelte Proben wurden in der Schneidmühle SM 200 (Retsch, Deutschland) mit einem 4-mm-Bodensieb zerkleinert. Gewaschene Proben wurden mit einem 20 mm-Bodensieb zerkleinert, anschließend in der Waschmaschine WML 16106 N (Beko, Türkei) bei 30°C für 30 min ohne weitere Zusätze mit Wasser gewaschen und daraufhin für 12 h bei 90°C im Trockenschrank UF160 (Memmert, Deutschland) getrocknet. Für die anschließende Feinzerkleinerung wurde ein 4-mm-Bodensieb verwendet. Die Aufbereitungsvariante „gewaschen und entschichtet“ umfasste eine mechanische Druckbild-Entschichtung mit einem elektrischen Schwingschleifer (Metabo FSR 200 Intec) mit der Schleifpapierkörnung 80P (Hersteller Craftomat). Bei der Materialkategorie „Weiß foliert“ konnte keine mechanische Entschichtung durchgeführt werden, so dass bei der Mischprobe „gewaschen und entschichtet“ auf die Zumischung verzichtet werden musste (Tab 2). Anschließend wurden die Proben analog zur Aufbereitungsvariante „gewaschen“ gewaschen, getrocknet behandelt und auf 4 mm zerkleinert.

Tab. 2: Untersuchungsumfang (n= 106 PP-Hohlkammerplakate; Gesamtmasse 56,1 kg)

Nr.	Material-kategorie	Anteil der Materialkategorie [Gew.-%] (n=135)	unbe-handelt	ge-waschen	gewaschen und ent-schichtet
1	weiß	61	X	X	X
2	weiß foliert	10		X	
3	grau	17		X	
4	grün	12		X	
5	Mischprobe	Zusammensetzung gemäß Gew.-%-Angaben zu Nr. 1 bis 4	X	X	X

Die zerkleinerten Proben wurden mit dem Doppelschneckenextruder Process 11 (Thermo Scientific, Deutschland) mit dem Temperaturprofil 250-260-270-270-270-270-270 °C und bei der Drehzahl 140 min⁻¹ verarbeitet. Das Extrudat wurde trocken abgezogen und anschließend mit einem Pelletizer (Thermo Scientific – VariCut Pelletizer 11 mm) granuliert. Zur Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) wurde das Granulat gemäß (DIN EN ISO 1133-1: 2022) mit dem Extrusionsplastometer MI (Göttfert, Deutschland) bei 230 °C mit 2,16 kg untersucht. Für jede der neun Versuchsreihen wurden 20 Messungen durchgeführt und der arithmetische Mittelwert bestimmt. Aus dem regranulierten Material wurden Zugversuchsstäbe des Typs 1-BA gemäß DIN EN ISO 527 mit der Kolbenspritzguss-Maschine „HEK MCP-Spritzgießmaschine 30 KSA“ bei einer Temperatur von 265°C, einer Werkzeugtemperatur von 90°C und einer Nachdruckzeit von 4 Sekunden hergestellt. Für die neun Versuchsreihen wurden spektroskopische Messungen mit Hilfe des ALPHA Platinum ATR Spektrometers (Bruker, Deutschland) an Plakaten, Granulat und Zugstäben durchgeführt (Tab 3). Die Messungen an den Plakaten erfolgten jeweils auf der bedruckten Seite. Anschließend wurde der Carbonyl-Index (CI) berechnet, indem der Quotient der Flächenintegrale der Carbonylbande (C=O, 1700-1770 cm⁻¹) und der Referenzbande (2700-2750 cm⁻¹) bestimmt wurde (Almond et al. 2020). Es wurde jeweils eine fünffache Messung durchgeführt. Je Versuchsreihe wurden fünf Zugstäbe des Typs 1BA mit der Universalprüfmaschine 112.20 kN (TesT, Deutschland) normgemäß (ISO 527-1: 2019, ISO 527-2: 2012) mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min bei einem Klemmenabstand von 58,5 mm gezogen und so der E-Modul, die Bruchdehnung und die Zugfestigkeit bestimmt.

4 VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION

Der rheologische Parameter MFR korreliert mit dem Molekulargewicht und kann als Indikator für die Molekülkettenlänge herangezogen werden (Bonten 2020). Hohe MFR-Werte können auf eine

Abnahme der Molmasse der Polymermatrix aufgrund des Abbaus während des Recyclingprozesses hinweisen (Araújo et al. 2019). Die MFR-Messungen zeigen keine feststellbaren Polymer-schädigungen (Abb. 2). Bei der Materialkategorie "weiß foliert" sind wahrscheinlich kürzerkettige PP-Varianten aus der Oberflächenbeschichtung für einen leichten (10% foliertem Anteil (Tab. 2)) bzw. erheblichen (reine "weiß foliert"-Probe) Anstieg der MFR-Werte verantwortlich. Der Ver-gleich der Messwerte von "weiß unbehandelt" mit "gewaschen" und "entschichtet und gewa-schen" zeigt, dass das Vorhandensein von Druckfarben aus der bedruckten Oberflächenschicht nicht signifikant mit Änderungen der MFR korreliert.

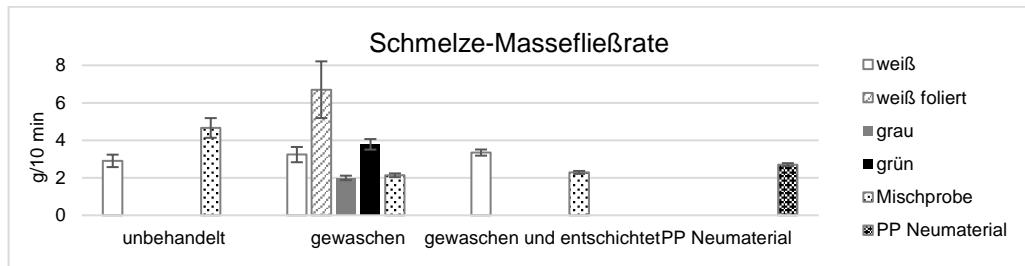


Abb. 2: Schmelze-Massefließrate (MFR 230°C/2,16 kg (Neuwarewerte aus (Seier et al. 2020))

Es wird ein Anstieg des CI vom Ausgangsplakat bis hin zur Verarbeitung während des Recyclings beobachtet (Tab 3), so dass erwartungsgemäß eine thermooxidative Schädigung des Polymers durch die Wiederverarbeitung vermutet werden kann. Zudem kann bei den über einen Zeitraum von vier Wochen freibewitterten Plakaten keine signifikante Veränderung des CI festgestellt werden. Auffällig ist, dass die Zugstäbe trotz einer zweifachen thermischen Verarbeitung einen ge-ringeren CI aufweisen als das einfach verarbeitete Stranggranulat. Die größten Abweichungen sind bei den Proben des folierten Plakates zu verzeichnen. Dies könnte auf strukturelle Defekte zurückzuführen sein, die anfälliger für Oxidationen sind (Gijsman 2008, Moldovan et al. 2012).

Tab. 3: Carbonyl-Index der Proben nach Aufbereitungsart und Verarbeitung

	Ausgangsplakat	Ausgangsplakat Dach	Granulat	Zugstab
Unbehandelt:				
Weiß	1,67	-	1,26	2,13
Mischprobe	-	-	2,1	1,44
Gewaschen:				
Weiß	2,06	1,54	1,47	1,47
Weiß foliert	1,41	1,61	2,54	1,97
Grau	1,80	1,72	2,04	1,64
Grün	1,96	1,35	1,76	1,6
Mischprobe	-	-	1,64	1,54
Entschichtet und gewaschen:				
Weiß	1,04	-	1,48	1,51
Mischprobe	-	-	2,12	1,95
Europawahl 2024	1,52	-	-	-

Die E-Modul-Messungen (Abb. 3b) zeigen, dass das Waschen bei der weißen Probe zu einer erheblichen Erhöhung des E-Moduls führt, während eine zusätzliche Entschichtung zu einer deutlichen Abnahme führt. Bei der Mischprobe sinkt der E-Modul mit jedem zusätzlichen Aufbe-arbeitungsschritt. Ein niedriger E-Modul-Wert kann auf den Abbau der Molmasse (Araújo et al. 2019) durch hohe Temperaturen und Scherkräfte während der Extrusion (Spoerl et al. 2019) im Recyclingprozess zurückgeführt werden. Auf die Zugfestigkeit haben die Aufbereitungsschritte keine Auswirkung. Signifikante Effekte der Probenbehandlung sind bei der Bruchdehnung fest-zustellen (Abb. 3a): Sowohl bei der weißen als auch bei der Mischprobe führt die Wäsche zu einer erheblichen Erhöhung der Bruchdehnung. Eine zusätzliche Entschichtung erhöht die

Bruchdehnung um etwa ein Drittel. Fremdstoffe wie Druckfarbe, folierte Oberflächen oder anhaftende Verunreinigungen tragen vermutlich zu einer internen Kerbwirkung bei und verschlechtern die plastischen Eigenschaften (Alvarado Chacon et al. 2020).

Bruchdehnung

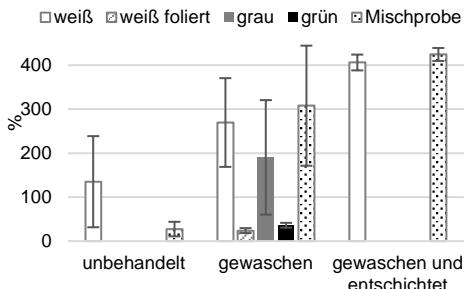


Abb. 3a: Bruchdehnungs-Messergebnisse

E-Modul

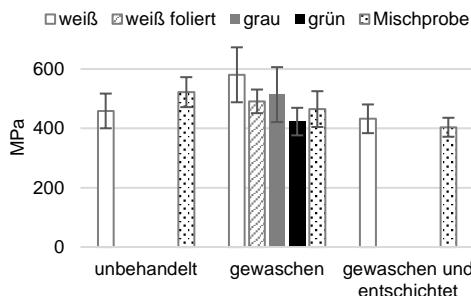


Abb. 3b: E-Modul-Messergebnisse

5 ZUSAMMENFASSUNG

Plakate sind ein zentrales Medium der Außenwerbung. Bei einer durchschnittlichen Masse von etwa 590 g pro Plakat und dem Einsatz von etwa 14 g Kabelbinder pro Plakat lässt sich unter der Annahme, dass ausschließlich Kunststoffplakate eingesetzt werden, für eine typische deutsche Bundestagswahl mit etwa 2,4 Mio Plakaten ein Gesamtanfall von deutschlandweit etwa 1.400 Mg Plakatwerkstoff und 35 Mg Polyamid-Kabelbindern abschätzen.

Bei den Plakaten können Einschnitte anstelle von Ausstanzungen für die Befestigung die Kunststoff-Rückgewinnungsmengen erhöhen. Weitere Ressourceneffizienzeffekte können durch Vermeidung von Kabelbindern zum einen durch eine geringere Anzahl herstellerseitig angebrachter Befestigungslöcher und andererseits durch den Einsatz kurzer bzw. angepasster Kabelbinderlängen realisiert werden.

Praktische Untersuchungen zum Recycling von Wahlplakaten wurden mit nach der Bundestagswahl 2021 gesammelten PP-Hohlkammerplakaten durchgeführt. Die rheologischen Kennwerte (MFR) zeigen keine Unterschiede zwischen mechanisch recyceltem PP-Material und einem Referenz-Neumaterial (PP). Die Messung des Carbonylindex (CI) ergab jedoch, dass eine Oxidation während der Verarbeitung vom Ausgangsplakat bis hin zum Zugstab stattgefunden haben muss. Erwartungsgemäß begünstigt die Kunststoff-Verarbeitung den Abbauprozess der Polymere, jedoch konnte ein erkennbarer Abbau durch die Bewitterung nicht festgestellt werden.

Die Untersuchung der Kreislauffähigkeit von Wahlplakaten zeigt, dass die unterschiedlichen Aufbereitungsmethoden erhebliche Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des rezyklierten Materials besitzen. Die größten Einflüsse konnten bei der Bruchdehnung im Zugversuch verzeichnet werden. Wenn für Rezyklatanwendungen die Bruchdehnung des Werkstoffs von besonderer Bedeutung ist, so sollte insbesondere ein Reinigungsschritt (Wäsche) bei der Kreislaufführung vorgesehen werden.

6 DANKSAGUNG

Die Autoren danken Theresa Willburger, Verena Willburger, Thiago Geiger, Berat Yayan und Maja Merdzik sowie Jan Woidasky für die Unterstützung bei der Bereitstellung von Informationen und Probenmaterialien und der Versuchsdurchführung.

LITERATURVERZEICHNIS

- Almond, J., Sugumaar, P., Wenzel, M. N., Hill, G. & Wallis, C. (2020). Determination of the carbonyl index of polyethylene and polypropylene using specified area under band methodology with ATR-FTIR spectroscopy. *e-Polymers*, 20(1), 369–381. <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0041>
- Alvarado Chacon, F., Brouwer, M. T., van Thoden Velzen, E. U. & Smeding, I. W. (2020). *A first assessment of the impact of impurities in PP and PE recycled plastics*. FBR Sustainable Chemistry & Technology. <https://doi.org/10.18174/518299>
- Araújo, E. A. F., Visconte, L. L. Y., Da Silva, A. L. N., Sirelli, L. & Pacheco, É. B. A. (2019). Effect of clay amount and reprocessing cycles on thermal, morphological, and mechanical properties of polypropylene/organovermiculite nanocomposites. *Polymer Engineering & Science*, 59(10), 2110–2120. <https://doi.org/10.1002/pen.25213>
- Bonten, C. (2020). *Plastics Technology - Introduction and Fundamentals*. Carl Hanser Verlag.
- Dehoust, G., Herman, A., Christiani, J., Beckamp, S., Bünemann, A. & Bartnik, S. (2021). *Ermittlung der Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-01-22_texte_11-2020_oekologische_beteiligungsentgelte.pdf
- DIN EN ISO 1133-1:2022. *Kunststoffe - Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten - Teil 1: Allgemeines*. Beuth.
- Erhardt-Maciejewski, C. (2021). *Wahlplakate aufhängen: Das müssen Sie wissen!* <https://kommunal.de/wahlplakate-aufhaengen-recht>
- Geiger, T., Willburger, V. & Willburger, T. (2021). *Ecodesign und Circular-Economy-Ansätze für Außenwerbung*.
- Gijssman, P. (2008). Review on the thermo-oxidative degradation of polymers during processing and in service. *e-Polymers*, 8(1). <https://doi.org/10.1515/epoly.2008.8.1.727>
- ISO 527-1:2019. *Plastics – Determination of tensile properties: Part 1: General principles*. Beuth.
- ISO 527-2:2012. *Plastics – Determination of tensile properties: Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*. Beuth.
- Moldovan, A., Patachia, S., Buican, R. & Tiorean, M. H. (2012). *Characterization of Polyolefins Wastes by FTIR Spectroscopy* [Bulletin of the Transilvania University of Brașov].
- Müller, M. G., Christ, K., Elbert, L. & Nonnengardt, S. (2021). Parteienwerbung im Bundestagswahlkampf 2021: Eine qualitative Analyse zu den aktuellen Wahlkampagnen. *Media Perspektiven*(12), 625–638.
- Nielsen. (2022a). *Bruttowerbeaufwendungen von Bündnis 90/Die Grünen in Deutschland im Jahr 2021*. <https://de.statista.com/prognosen/1298726/bruttowerbeaufwendungen-von-buendnis-90-die-gruenen>
- Nielsen. (2022b). *Entwicklung der Bruttowerbeaufwendungen der SPD in Deutschland in den Jahren 2017 bis 2021*. <https://de.statista.com/prognosen/1299294/bruttowerbeaufwendungen-der-spd>
- Orth, P., Bruder, J. & Rink, M. (2022). *Kunststoffe im Kreislauf: Vom Recycling zur Rohstoffwende*. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37814-1>
- Ragaert, K., Delva, L. & van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste management (New York, N.Y.)*, 69, 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- Seier, M., Stanic, S., Koch, T. & Archodoulaki, V.-M. (2020). Effect of Different Compatibilization Systems on the Rheological, Mechanical and Morphological Properties of Polypropylene/Polystyrene Blends. *Polymers*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/polym12102335>
- Spoerk, M., Arbeiter, F., Raguž, I., Holzer, C. & Gonzalez-Gutierrez, J. (2019). Mechanical Recyclability of Polypropylene Composites Produced by Material Extrusion-Based Additive Manufacturing. *Polymers*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/polym11081318>

KONTAKT

Prof. Dr.-Ing Jörg Woidasky

E-Mail: joerg.woidasky@hs-pforzheim.de

Tel.-Nr. 07231 28-6489

Nachhaltige Produktentwicklung, Hochschule Pforzheim

Homepage: <https://www.hs-pforzheim.de/>

The Role of Temporary Material Hubs and Final Sinks in Circular Economy

Romana Kopecká, Marlies Hrad & Marion Huber-Humer

BOKU University, Department of Water, Atmosphere and Environment, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

ABSTRACT: Landfilling remains a widely used practice worldwide, despite being the least preferable option according to the EU's waste hierarchy and it is going to be strongly restricted in future. The waste sector must be prepared to manage waste diverted from landfills and to accommodate non-hazardous and potentially valuable waste materials that are currently being either energetically recovered or landfilled. These materials must be reintroduced into the anthropogenic or natural cycles to ensure adequate material recovery. Conversely, the waste sector also needs to find new ways for the safe disposal of non-recyclable and potentially harmful materials, which are still found in our daily products as well as in sector-specific applications (e.g., in the medical or energy sector). These materials must be removed from anthropogenic cycles and require safe disposal to maintain clean material cycles. Future-oriented concepts, such as temporary material hubs and final sinks, are proposed to ensure that waste materials do not pose a danger to human health and the environment in the long term, while also optimizing the reasonable use of circulating resources.

1 INTRODUCTION

The rapid evolution of lifestyles and growing material consumption increase waste generation, making it crucial to develop new technologies and approaches in waste management. Prevention of waste plays a key role in the current European waste management strategy, occupying the top level of waste hierarchy, in contrast to disposal – landfilling – which is the very last management option. Nevertheless, generation of waste cannot be completely avoided, and despite new strategies and (recycling) technologies, a certain amount of waste will still need to be landfilled in the foreseeable future.

In 2019, an average amount of 22,6% of municipal solid waste in the EU was landfilled, with a significant variation among Member States. The EU-Landfill Directive mandates that the landfilling of municipal waste must be limited to 10% and less by 2035 (European Commission, 2020). In addition, starting in 2030, the landfilling of waste suitable for recycling or other forms of material or energy recovery will be restricted (European Parliament and the Council, 2018). The Waste Framework Directive requires Member States to increase the reuse, recycling and material recovery, e.g., of construction and demolition waste to at least 70% by 2020. Furthermore, at least 65% of municipal solid waste must be prepared for reuse/recycled by 2035 (European Parliament and the Council, 2008).

The waste sector plays a pivotal role in protecting the environment and human health while keeping materials in anthropogenic cycles by recovering as much resources as possible, or alternatively managing waste through energetic recovery and landfilling.

The directives aim to enhance recycling efforts; however, it is essential to optimize material recovery while maintaining clean material cycles. This approach is supported by Kral et al. (2013), who emphasize the importance of *optimizing* rather than *maximizing* the amount of secondary resources.

The goals set by the directives create a gap between the amount of waste that could be recycled and the available capacity of the present waste sector. This gap is currently filled by energy recovery or disposal which will be reduced or restricted in future. This restriction could inadvertently introduce contaminated substances into material cycles. The accumulation of contaminated materials deflected from landfills and waste-to-energy facilities negatively impacts both the quality of

the secondary material and the environment (Kral et al., 2013). The European Environment Agency emphasizes the importance of maintaining clean material cycles for a well-functioning circular economy, both from a safety and economic perspective. Contaminants can remain in anthropogenic cycles for decades (European Environment Agency, 2017). Therefore, contaminated materials need to be identified and separated from waste streams, and they must be directed to safe disposal, known as final sinks.

Conversely, some materials currently being disposed may have potential future value. If these materials cannot be recycled at present, safe storage is necessary allowing for delayed recycling that can help to ensure optimum circularity in the long term.

2 INNOVATIVE CONCEPTS IN THE FUTURE CIRCULAR ECONOMY

The currently desired concept of a circular economy is represented by a semi-closed loop where most materials circulate, while a certain amount of raw materials from primary resources enters the cycle, and a certain amount of material is disposed of as residual waste (European Parliament, 2023).

This loop can only accommodate waste materials that are valuable now, all other materials are being disposed despite having potential future value, which shall be changed due to emerging primary resources depletion. The current loop could be supplemented by a new *enhanced material recovery loop*.

This enhanced material recovery loop replaces the current position of residual waste with a system where materials that cannot be accommodated in current waste management system are either stored for delayed recycling (in a temporary material hub) or directed to a safe disposal (known as final sink).

This concept significantly reduces the need for extraction of primary resources and further minimizes the amount of disposed waste, thereby enhances the sustainability and efficiency of the circular economy in the long term.

2.1 *Temporary material hub*

The concept of *temporary material hubs* describes a time-restricted repository for materials that currently have limited recycling options.

According to the Waste Framework Directive, *temporary storage* – limited to a maximum of three years – applies to a preliminary storage of waste before its transport to a waste facility (European Parliament and the Council, 2008). Conversely, the concept of *temporary material hubs* should ensure that materials lacking immediate value or suitable recycling technologies are stored for a longer time period until more effective recycling methods become available. The idea of this kind of waste storage has also been discussed by Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (2019), particularly regarding the storage of waste carbon-reinforced polymers for longer periods of time to await advancements in recycling technologies. In this context, *temporary storage* was also used by Sapsford et al. (2023) to describe the concept of storage of mineral-rich wastes in landfill-like repositories in order to be remedied later.

In general, effective recycling of materials is based on three pillars:

- environmental protection,
- availability of adequate technologies,
- and economic feasibility and/or existing market.

These pillars are essential, as highlighted by Merrington (2017). If any one of the pillars is missing, recycling is not feasible and the respective material must be disposed of. However, the situation can change as materials may become valuable in future due to increased price of primary resources or resources depletion (economic feasibility) or due to development of new recycling technologies (availability of adequate technologies). The Joint Research Centre's Technical Report predicts that almost all polymer chemical-recycling technologies will achieve positive net

earnings before 2040. This will be driven by both the increased costs of virgin material and the reduction in technology costs.

The costs of producing virgin plastics are expected to rise by 71% between 2019 and 2040, primarily due to increases in fossil fuel prices. Conversely, the cost of recycling technologies is anticipated to decrease by 37,5% over the same period (Garcia-Gutierrez et al., 2023; Werner et al., 2022).

The report also concludes that recycling/material recovery is a preferable option for plastic waste in terms of mitigating climate change. However, the situation is less clear for other environmental categories as current recycling technologies are energy-intensive. This is expected to improve with advancements in EU-energy mix and reductions in technology costs (Garcia-Gutierrez et al., 2023; Werner et al., 2022).

While economic feasibility and the availability of adequate technologies are likely to improve, environmental feasibility may change less significantly in future. Ongoing research continues to identify more substances as harmful, as demonstrated by the European Chemicals Agency regularly adding new substances to "The Candidate List of substances of very high concern". The list currently contains 240 substances, with recent updates including 4 substances in January 2022, 1 substance in June 2022, 9 substances in January 2023, 2 substances in June 2023 and 5 substances in January 2024 (European Chemicals Agency, 2024).

The presence of only two recycling pillars and the absence of the third creates a gap currently being filled by energy recovery or disposal. The concept of a temporary material hub could address this gap by prioritizing delayed recycling when technologies and economic feasibility are lacking.

However, when environmental feasibility is also absent, the concept of final sinks (see chapter 2.2) steps in.

Current examples of materials that could be stored in temporary material hubs until their recycling becomes feasible include composite materials, which are increasingly used in various industries. One emerging sector is renewable energy, where composites are used for wind power utilisation – in wind blades. These products, made of carbon- or glass-reinforced polymers, currently lack adequate recycling technologies and are often co-incinerated in cement kilns, incinerated in waste-to-energy facilities or landfilled (European Commission, 2023).

Another example is incineration bottom ash (IBA), an unavoidable secondary mineral waste from waste incineration. Approximately 0.2-0.25 tons of IBA are produced per ton of waste (Lamers, 2015; Reig et al., 2023). Current technologies do not allow for the economically feasible recycling of valuable elements contained in IBA, with 40% of the total mass currently being landfilled (Joseph et al., 2018).

Projected improvements in future justify the postponement of disposal in order to await the development of adequate recycling solutions.

For example, waste composites, and wind blades in particular, are currently difficult to accommodate in a circular economy due to the lack of feasible recycling technologies. Despite the inherent value of composite material, there are no technologies that can feasibly extract of individual materials without degrading their structure. Current recycling methods often compromise the integrity of the original structure, limiting the potential use of secondary feedstock in other applications. For example, pyrolysis can reduce the fibre tensile strength of glass-reinforced polymers by up to 64% and carbon-reinforced polymers' by up to 85% (Composites UK, 2016; Limburg & Quicker, 2016). Additionally, the precursor used to manufacture carbon fibres significantly influences the final costs (Nunna et al., 2019), contributing over 50% to the total costs of the final product (Ellringmann et al., 2016; Nunna et al., 2019). Producing virgin carbon fibres is also highly energy-intensive, requiring approximately 1150 MJ/kg, whereas fibre recycling demands only 10% of this energy (Salas et al., 2023). Therefore, improving recycling technologies and consequently the quality of recycled feedstock is highly desirable.

Valuable waste material could be stored in temporary material hubs for pre-defined time period until it can be feasibly recycled, which would "patch" the gap currently being filled by disposal or energy recovery, as visualized in Fig. 1.

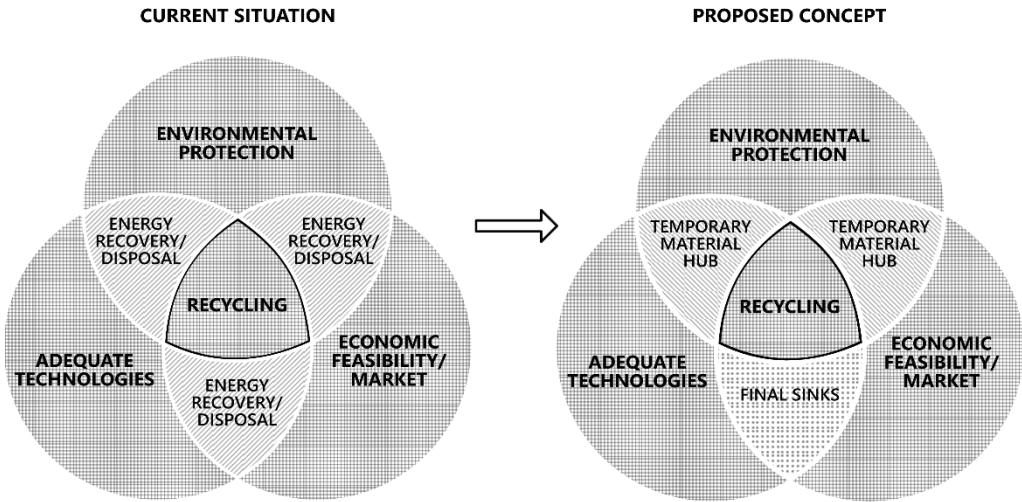


Fig. 1: Temporary material hubs and final sinks enhancing material recovery

Regulations can help bridge the gaps for missing pillars in recycling efforts. An example of a regulatory incentive is the minimum content requirement for recycled material in packaging (European Parliament, 2024). The Single-Use Plastics Directive mandates that by 2025, beverage PET bottles must contain at least 25% of recycled plastic, based on an average for all PET bottles sold in a member state (European Parliament and the Council, 2019). This legislation is expected to drive up the price of recycled PET, potentially surpassing that of virgin PET (European Environment Agency, 2022).

2.2 Final sinks

Not all materials can be feasibly recycled, even in the future – e.g., without contaminating material cycles and causing environmental damage. For such materials, safe final disposal is essential to protect the environment, human health but also the circular economy. This function can be provided by the concept of final sinks, which are described as sinks either destroying a substance completely or holding it for a very long time period (Kral et al., 2013). Currently, landfills and waste-to-energy facilities serve as final sinks. For example, state-of-the-art waste incineration plants are appropriate final sink for some persistent organic pollutants such as polybrominated diphenyl ethers, and many other hazardous organic substances (Stanisavljevic & Brunner, 2021; Vyzinkarova & Brunner, 2013). Even inorganic substances can use incineration plants as their final sinks. Final sinks can be both natural and anthropogenic (Stanisavljevic & Brunner, 2021). In the future, conventional landfill might be substituted by so-called sustainable landfills. The concept of sustainable landfilling is based on the thesis that such facilities require only a restricted amount of aftercare, that could end in the foreseeable future without passing this duty to the forthcoming generations (Laner et al., 2012). Scharff (2007) claims that the conventional model of landfill aftercare is not sustainable according to Brundtland Report's definition of sustainability: "*Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.*" (International Institute for Sustainable Development, 2024). It addresses the consequence of surpassing the environmental burden to the next generations (Scharff, 2007). Inhibiting the natural degradation processes in landfills prolongs the need for aftercare and raises concern about the consequences of the breakdown of physical barriers, which could create problems for landfill operators and future generations (Allen, 2001).

Final sinks serve as safe disposal for certain materials (e.g., lacking environmentally safe recycling) after adequate pre-treatment and together with the concepts of temporary material hubs, they ensure optimized material recovery while keeping the material cycles clean (see Fig. 1).

3 CONCLUSIONS

The transition towards a circular economy must intensify efforts to enhance material recovery while preventing the material cycles from contamination. Current legislation demands diverting waste from disposal (landfills), yet it does not adequately address the gap between the amount of waste diverted and the available capacity of alternative solutions. The advancement and decreasing costs of new technologies, coupled with projected increases in primary resources costs justify the temporary storage of waste for delayed recycling. Materials deemed to lack future value or recyclability and are harmful will be safely disposed of in engineered final sinks designed for long-term containment and environmental protection after adequate pre-treatment. Optimized material recovery, coupled with safe disposal solutions, will minimize environmental impact, conserve resources, and support the principles of a circular economy.

REFERENCES

- Allen, A. (2001). Containment landfills: The myth of sustainability. *Engineering Geology*, 60(1–4), 3–19. Scopus. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00084-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00084-3)
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). (2019). *Entsorgung faserhaltiger Abfälle—Abschlussbericht*. https://www.laga-online.de/documents/bericht-laga-ausschuss-entsorgung-faserhaltige-abfaelle_juli-2019_1574075541.pdf
- Composites UK. (2016). Composites Recycling – Where are we now? *End of Life and Recycling | Composites UK*. <https://compositesuk.co.uk/industry-support/environmental/end-of-life-and-recycling/>
- Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the Landfill of Waste (2018). <http://data.europa.eu/eli/dir/1999/31/2018-07-04/eng>
- Directive - 2019/904 - EN - SUP Directive - EUR-Lex (2019). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>
- Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives (Text with EEA Relevance), OJ L (2008). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02008L0098-20240218>
- Ellringmann, T., Wilms, C., Warnecke, M., Seide, G., & Gries, T. (2016). Carbon fiber production costing: A modular approach. *Textile Research Journal*, 86(2), 178–190. <https://doi.org/10.1177/0040517514532161>
- European Chemicals Agency. (2024). *All news—ECHA*. https://echa.europa.eu/news-and-events/news-alerts/all-news/-/asset_publisher/yhAseXkvBI2u/
- European Commission. (2020). *Strategic Plan 2020–2024*. https://commission.europa.eu/system/files/2020-10/env_sp_2020_2024_en.pdf
- European Commission. (2023). *More circular, less carbon: Chemical recycling holds promise for wind-turbine blade waste*. https://environment.ec.europa.eu/news/more-circular-less-carbon-chemical-recycling-holds-promise-wind-turbine-blade-waste-2023-10-19_en
- European Environment Agency. (2017). *Circular by design—Products in the circular economy—European Environment Agency* (Publication 6/2017). <https://www.eea.europa.eu/publications/circular-by-design>
- European Environment Agency. (2022). *Investigating Europe's secondary raw material markets—European Environment Agency* [Publication]. <https://www.eea.europa.eu/publications/investigating-europes-secondary-raw-material>
- European Parliament. (2023, May 24). *Circular economy: Definition, importance and benefits | News | European Parliament*. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>
- European Parliament. (2024, March 4). *Deal on new rules for more sustainable packaging in the EU | News | European Parliament*. News - European Parliament. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20240301IPR18595/deal-on-new-rules-for-more-sustainable-packaging-in-the-eu>
- Garcia-Gutierrez, P., Amadei, A. M., Klenert, D., Nessi, S., Tonini, D., Tosches, D., Ardente, F., & Saveyn, H. (2023, February 17). *Environmental and economic assessment of plastic waste recycling*. JRC Publications Repository. <https://doi.org/10.2760/0472>
- International Institute for Sustainable Development. (2024). *Sustainable Development*. International Institute for Sustainable Development. <https://www.iisd.org/mission-and-goals/sustainable-development>

- Joseph, A. M., Snellings, R., Van den Heede, P., Matthys, S., & De Belie, N. (2018). The Use of Municipal Solid Waste Incineration Ash in Various Building Materials: A Belgian Point of View. *Materials*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/ma11010141>
- Kral, U., Kellner, K., & Brunner, P. H. (2013). Sustainable resource use requires “clean cycles” and safe “final sinks.” *Science of The Total Environment*, 461–462, 819–822. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.094>
- Lamers, F. (2015). Treatment of Bottom Ashes of Waste-to-Energy Installations – State of the Art. *TK Verlag - Fachverlag Für Kreislaufwirtschaft*. <https://ask-eu.de/Artikel/27666/Treatment-of-Bottom-Ashes-of-Waste-to-Energy-Installations-State-of-the-Art.htm>
- Laner, D., Fellner, J., & Brunner, P. (2012). Site-specific criteria for the completion of landfill aftercare. *Waste Management & Research : The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 30, 88–99. <https://doi.org/10.1177/0734242X12453610>
- Limburg, M., & Quicker, P. (2016). *Entsorgung von Carbonfasern – Probleme des Recyclings und Auswirkungen auf die Abfallverbrennung* – [Print, online]. Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz 2016, Nietwerder. TK-Verlag.
- Merrington, A. (2017). 9—Recycling of Plastics. In M. Kutz (Ed.), *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition)* (pp. 167–189). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00009-2>
- Nunna, S., Blanchard, P., Buckmaster, D., Davis, S., & Naebe, M. (2019). Development of a cost model for the production of carbon fibres. *Helijon*, 5, e02698. <https://doi.org/10.1016/j.helijon.2019.e02698>
- Reig, M., Vecino, X., Valderrama, C., Sirés, I., & Luis Cortina, J. (2023). Waste-to-energy bottom ash management: Copper recovery by electrowinning. *Separation and Purification Technology*, 311, 123256. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123256>
- Salas, A., Berrio, M. E., Martel, S., Díaz-Gómez, A., Palacio, D. A., Tuninetti, V., Medina, C., & Meléndrez, M. F. (2023). Towards recycling of waste carbon fiber: Strength, morphology and structural features of recovered carbon fibers. *Waste Management*, 165, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.017>
- Sapsford, D. J., Stewart, D. I., Sinnett, D. E., Burke, I. T., Cleall, P. J., Harbottle, M. J., Mayes, W., Owen, N. E., Sardo, A. M., & Weightman, A. (2023). Circular economy landfills for temporary storage and treatment of mineral-rich wastes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*. <https://doi.org/10.1680/jwamr.22.00008>
- Scharff, H. (2007). *The Role Of Sustainable Landfill In Future Waste Management Systems*. Sardinia 2007 - XI International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Sardinia, Italy. https://www.nswai.org/docs/The_Role_Of_Sustainable_Landfill_In.pdf
- Stanisavljevic, N., & Brunner, P. H. (2021). Megacities need both: Circular economy and final sinks! *Waste Management & Research*, 39(12), 1437–1439. <https://doi.org/10.1177/0734242X211058344>
- Vyzinkarova, D., & Brunner, P. H. (2013). Substance Flow Analysis of Wastes Containing Polybrominated Diphenyl Ethers. *Journal of Industrial Ecology*, 17(6), 900–911. <https://doi.org/10.1111/jiec.12054>
- Werner, M., Narayanan, A., Rabenschlag, O., Nagarajan, P., Saboo, R., Banatao, R., Moedritzer, S., Zilnik, D., Wong, T., & Meza, M. (2022). *Closing the Plastics Circularity Gap—Full Report*. Google. <https://bbia.org.uk/wp-content/uploads/2022/04/closing-plastics-gap-full-report.pdf>

CONTACT

Romana Kopecká

romana.kopecka@boku.ac.at

Institute of Waste Management and Circularity

BOKU University

<https://boku.ac.at/en/>

Digitaler Produktpass als Qualitätszertifikat und für die Nachverfolgbarkeit von Produkten und Materialien

Michael Krisper¹

¹⁾ Pro2Future GmbH, Area Cognitive Products, Graz, Österreich

KURZFASSUNG: Die Umsetzung von Nachhaltigkeit in der gesamten Liefer- und Wertschöpfungskette erfordert die Nachweisführung der Herkunft, der CO₂-Emissionen, des Energieverbrauchs sowie des Materialeinsatzes von Produkten und Gütern. Die Herausforderung besteht darin, dass jede Wirtschaftsdomäne unterschiedliche Anforderungen hat: Lebensmittel sind nur kurz haltbar, während Gebäude eine Lebensdauer von 50 Jahren und mehr aufweisen. Stahl wird kontinuierlich hergestellt, während Elektronik in diskreten Produkten verkauft wird. Getreide und Whisky werden in Säcken, Tanks, Fässern und Flaschen geerntet, destilliert, gelagert und abgefüllt. Abfall wird in Containern, Kübeln und Säcken angeliefert und transportiert, aber kontinuierlich verarbeitet. Hinzu kommt, dass die verwendeten Datenformate und Technologien mit der Zeit veralten, proprietär sind oder inkompatibel werden. Weiters müssen Daten manchmal schnell und offline gelesen werden, während es in anderen Fällen wichtig ist, die Authentizität und Aktualität der Daten sicherzustellen. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, schlagen wir die Einführung eines dualen Online-/Offline-Passes für digitale Produkte mit interoperablen Blockchain-Protokollen und konvertierbaren und rückverfolgbaren Chargen und Einheitenlogik, um kontinuierliche und diskrete Produkte und Materialflüsse abzubilden.

1 EINLEITUNG

Am 18. Juli 2024 tritt die Ökodesign-Verordnung in Kraft (**ESPR – „Ecodesign for Sustainable Products Regulation“**) (European Parliament, Council of the European Union, 2024). Diese Verordnung gibt den Rahmen für Informations- und Leistungsanforderungen für nachhaltige und kreislauforientierte Produktwirtschaft vor. Mit ihr wird ein weiterer Meilenstein im Sinne des **Circular economy action plan (CEAP)** (European Commission, Directorate-General for Environment, 2020) und dem European Green Deal gelegt. In dieser Verordnung ist auch der **Digitale Produktpass (DPP)** (Gayko & Helfritz, 2023) beschrieben, der für einige Produktgruppen bereits priorisiert vorgeschrieben ist und dann schrittweise für viele weitere Domänen implementiert werden soll. Ziel ist es, die Kreislaufwirtschaft und Wiederverwendbarkeit von Produkten und Materialien zu fördern. Erreicht werden soll dies durch die Nachverfolgbarkeit von Produkten und Materialien sowie das Sammeln von Informationen über verwendete Materialien, CO₂-Abdruck sowie Energieaufwände und weiterer ökologischer und produktspezifischer Informationen. Dies unterstützt natürlich auch das Berichtswesen im Rahmen von **ESRS (European Sustainability Reporting Standards)** (European Commission, Directorate-General for Financial Stability, Financial Services and Capital Markets Union, 2023) und **CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive)** (European Parliament, Council of the European Union, 2022). Als erste Produktgruppen wird der DPP für Batterien, Textilien, sowie Elektronikprodukten schlagen (2027 bzw. 2028). In weiteren Schritten soll der DPP auch für Möbel, Reifen, Waschmittel, Chemikalien, sowie in der Eisen/Stahl/Aluminium-Industrie und vielen weiteren Produktgruppen bis 2030 und darüber hinaus eingeführt werden. Diese Verordnung stellt nun jede Branche vor die Herausforderung, in den nächsten Jahren entsprechende Systeme zu implementieren, die den Anforderungen der EU genügen, aber auch den jeweiligen Anforderungen der Branchen. Im CIRPASS Projekt (CIRPASS Consortium, 2023) wurden hierzu großangelegt Stakeholder und Branchenanalysen durchgeführt, welche im CIRPASS2 Projekt (CIRPASS2 Consortium, 2024) weitergeführt werden. Im vorliegenden Artikel betrachten wir einige dieser Anforderungen im Detail, und geben ein paar Lösungsvorschläge, um diese zu implementieren.

2 PROBLEMSTELLUNG UND HERAUSFORDERUNGEN

Die Ökodesign-Verordnung unterteilt verschiedene Produktgruppen und damit auch Branchen der Wirtschaft und Industrie. Dies ist sinnvoll, da es hier unterschiedlichste technische und wirtschaftliche Anforderungen gibt, die es zuerst zu lösen gilt. Ein paar Beispiele seien hier genannt:

- **Lebensdauer bzw. Produktalterung:** Im Lebensmittelsektor geht es um schnell verderbliche Güter, während im Bausektor Gebäude auf 30–50 Jahre ausgelegt sind und halten müssen. Speziell Lebensmittel sind in der aktuellen Verordnung zwar ausgenommen, werden langfristig sicherlich ebenfalls den Produktpass umsetzen. Hier gibt es ohnehin bereits seit Jahrzehnten Bestrebungen, um Rückverfolgbarkeit und Produktinformationen für den Konsumenten verfügbar zu machen.
- **Nutzungsdauer von Datenformaten und Datenträgern:** Für viele Produktgruppen ist langfristige Speicherung und Lesbarkeit wichtig. Elektronische Datenträger halten im Schnitt 10–20 Jahre, Versionsinkompatibilitäten treten mit der Zeit auf, und aufgrund des Effekts des „Digitalen Verfalls und Datenverlust“ sind Dateien manchmal bereits ein paar Jahre später nicht mehr lesbar (Haslop, Schnabel, & Aydin, 2016).
- **Integration / Inklusion:** In allen Wirtschaftsbranchen gibt es bereits bestehende Prozesse, und vertragliche marktübliche Modalitäten entlang der Wertschöpfungskette. Der Digitale Produktpass soll so flexibel und inklusiv gestaltet sein, dass das System einfach in bestehende Lieferketten integrierbar ist.
- **Kontinuierliche Materialflüsse vs. Diskrete Produkte vs. Gebinde/Container:** Der DPP muss alle möglichen Losgrößen, Container, sowie Einzelprodukte abbilden können. Mischungen, Teilungen, Verarbeitungsschritte auf kontinuierlichen sowie diskreten Waren und Produkten müssen unterstützt werden.
- **Unabhängigkeit:** Ein DPP-System darf nicht abhängig von einem einzelnen Unternehmen oder einer einzelnen Regierung sein, sondern muss dezentral, technologieagnostisch, und länderübergreifend für alle Stakeholder gleichermaßen zur Verfügung stehen.
- **Geheimhaltung/Zugriffsrechte:** Während im Rahmen der Kreislaufwirtschaft manche Daten weitergegeben werden MÜSSEN, gibt es auch Daten, die einer Geheimhaltung bzw. einem eingeschränkten Zugriff unterliegen. Der DPP soll also öffentliche Informationen zur Verfügung stellen, aber auch die Funktionalität von Zugriffsrechten und Geheimhaltungskonzepten unterstützen.
- **Fälschungen/Betrug:** Um die Vertrauenswürdigkeit von digitalen Produktpässen zu gewährleisten, müssen diese durch technische Maßnahmen unfälschbar, rückverfolgbar und korrekt sein. Weiters soll damit Authentifikation und Verifikation der Echtheit möglich sein.

3 LÖSUNGSVORSCHLAG

Um die oben genannten Herausforderungen zu lösen, schlagen wir ein System vor, dass auf einer Kombination von mehreren Technologien basiert:

- IPFS – Interplanetary File System
- interoperable Blockchain / CCIP
- Gebinde/Einheitenlogik
- Dauler offline/online Produktpass

3.1 Datenspeicherung im IPFS

Der Digitale Produktpass soll als strukturierter Datensatz abgebildet und im sogenannten **IPFS (Interplanetary File System)** abgespeichert werden. IPFS ist ein dezentrales redundant ausgelegtes Dateisystem, welches auf der Distributed-Hash-Table (DHT) Technologie basiert, und es erlaubt Daten unveränderlich dezentral abzuspeichern und anderen Teilnehmern Zugriff darauf zu geben (Chen, Li, Li, & Zhang, 2017). Wenn Produktdaten aktualisiert werden, muss **inkrementell eine neue Version des Produktpasses** erstellt werden, was gleichzeitig auch eine

Historie darstellt. Zwar können bestehende Daten nicht mehr aktualisiert werden, jedoch können neue Versionen auf alte Datenblöcke verweisen, um so eine Nachverfolgbarkeit (redundant zur Blockchain) zu erreichen.

3.2 Blockchain Technologie

Weiters soll **eine Blockchain** (Gaikwad, 2020) als Nachweis der Inhaberschaft und Herkunft eines Produkts verwendet werden (ähnlich wie es bei NFTs – non-fungible-tokens – gemacht wird) (Idelberger & Mezei, 2022). Da Blockchain-Technologie sich aber langfristig weiterentwickeln wird, muss gewährleistet werden, dass die Chain auch gewechselt werden kann bzw. mehrere Blockchains kompatibel zueinander sind: Hier kommt das **Cross-Chain Interoperability Protocol (CCIP)** (Chainlink Foundation, 2024) ins Spiel. Mithilfe von CCIP ist es möglich, Commodities zwischen Blockchains hin und her zu transferieren und somit langfristige Unabhängigkeit von einer einzelnen Blockchain zu ermöglichen. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die beiden parallelen Speicher-Technologien: IPFS und Blockchain. Außerdem zeigt es die Interoperabilität von mehreren Blockchains.

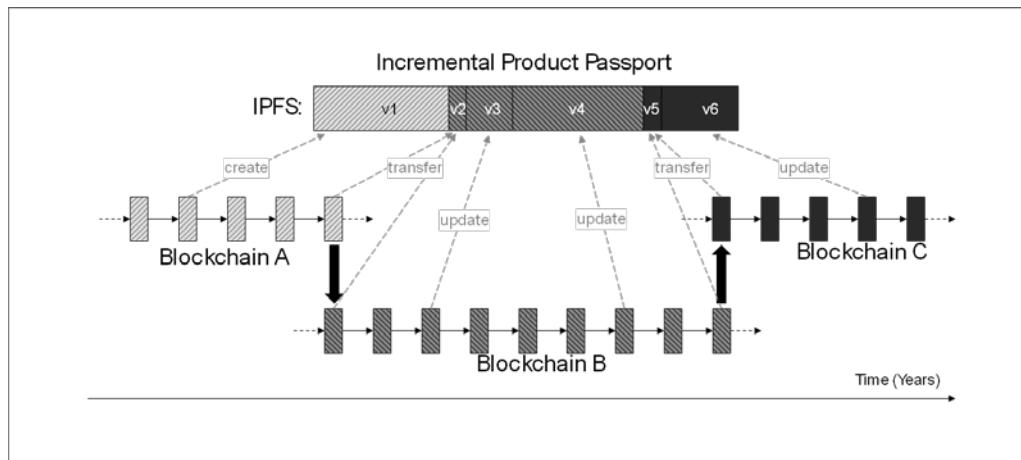


Abb. 1: Cross Chain Kompatibilität und Interoperabilität zur langfristigen Erhaltung der Funktionalität und Daten. Die Daten selbst sind unveränderlich, aber inkrementell in IPFS abgelegt, während Authentizität, Ownership und Echtheit kompatibel und transferierbar in Blockchains sichergestellt werden

3.3 Gebinde- und Einheiten-Logik

Um Warenflüsse und Verarbeitungsschritte abzubilden, muss eine Einheiten- bzw. Gebinde-Logik implementiert werden: Es muss möglich sein, Produkte in Gebinden zusammenzufassen, zum Beispiel in Containern, Paketen, Trucks, Fässer, Flaschen, Packungen. Weiters muss es möglich sein Materialmengen zu konvertieren, zu verarbeiten, zu teilen, und zu mischen. Beispielsweise Plastikabfall sortenrein trennen, aufbereiten, abpacken, auf Paletten oder Containern ausliefern und dann in anderen Firmen weiterverarbeiten. Hierzu schlagen wir ein System vor, dass auf SI-Einheiten in Kombination mit „Gebinden“ und Chargen-Nummern basiert. Abbildung 2 veranschaulicht einen Schritt der Lieferkette: Wie verhält sich die Nachverfolgbarkeit von Produkten von der Anlieferung, über die Verarbeitung bis hin aus Auslieferung. Ausgehend von der Grundinheit der Product-ID (oder allgemeiner einer Chargen-Nummer), kann ein Produkt verarbeitet oder mit anderen Produkten „vermischt“ oder „kombiniert“ werden (je nachdem ob es sich um ein kontinuierliches oder diskretes Produkt handelt). Bei kontinuierlichen Vorgängen werden die dahinterliegenden SI-Einheiten kombiniert und aktualisiert. Wird einem Tank 100 Liter entnommen,

so wird dessen Menge um 100 Liter reduziert, und ein neues Produkt mit 100 Litern erstellt (es muss hier natürlich sichergestellt werden, dass Material den physikalischen Regeln folgt und nicht aus nichts entstehen kann). Wird ein Produkt „verpackt“ oder assembliert, dann wird dessen kontinuierliche Menge vielleicht auf eine Einheit 1 reduziert, um zu einem diskreten Produkt zu werden. Auf diese Weise können Produkte verändert, vermischt oder geteilt werden. Auch Verluste oder Materialschwund können abgebildet werden. Bei jedem dieser Verarbeitungsschritte werden die Meta-Daten angereichert um zum Beispiel der Energiemenge, die für diesen Verarbeitungsschritt aufgewandt wurde, oder um die CO₂-Emissionen, die bei diesem Arbeitsschritt verursacht wurden. So entsteht ein nachvollziehbares Netzwerk aus Verarbeitungsschritten, das kontinuierliche sowie diskrete Produkt unterstützt. Die Granularität kann domänenspezifisch angepasst sein. Während es für manche Branchen Sinn ergibt, einzelne Drähte oder Kilogramm Kupfer zu zählen, sind für andere nur ganze Computerchips oder gar fertig assemblierte Komponenten interessant.

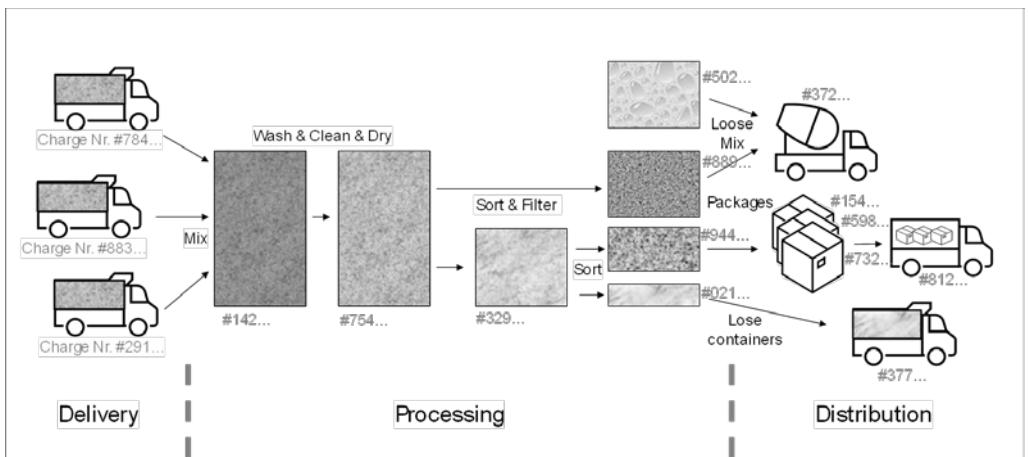


Abb. 2: Diskrete vs. kontinuierliche Verarbeitung und Lieferung in losen Mengen und Gebinden/Containern zur Berücksichtigung realer Losgrößen. Verarbeitung kann kontinuierlich erfolgen, Ab- und Anlieferung in abgepackten Mengen. Die Verarbeitungslogik für Konvertierung stellt das Mengengleichgewicht sicher

3.4 Dualer Offline/Online-Produktpass

Der letzte Aspekt, den wir in diesem Artikel betrachten möchten, ist die Inklusivität und die Geheimhaltung: In hocheffizienten Anlieferungs-, Ablieferung- und Logistikprozessen ist es oft nötig Produkte schnell scannen und überprüfen zu können, ohne langwierig online nachschlagen zu müssen. Für solche Prozesse ist es notwendig, dass der Produktpass lokal auf dem Produkt (oder dem Gebinde) zur Verfügung steht und lesbar ist. Das könnte zum Beispiel mittels RFID-Technologie (Glover & Bhatt, 2006) oder einer SmartCard umgesetzt werden. Im Extremfall könnte dafür auch ein QR-Code auf das Produkt aufgebracht/eingebrannt werden, um die Daten „optisch“ lesen zu können. Wichtig hierbei ist jedoch eine Verbindung zum online gespeicherten Digitalen Produktpass, um auf die aktuelle Version zugreifen zu können und Zertifikate und Nachweise live prüfen zu können. Bezuglich Geheimhaltung könnte ein Unternehmen sich intern eine eigene Struktur bzw. Datenbank aufbauen, die zwar mit dem öffentlichen Produktpass verknüpft ist, aber eine Autorisierung mit entsprechendem Zugriffsrechte-Konzept erfordert. So können für ausgewählte Klienten und Unternehmen Daten gespeichert werden, die nicht öffentlich gemacht werden sollen. Abbildung 3 zeigt eine Übersicht über die hier genannten Konzepte.

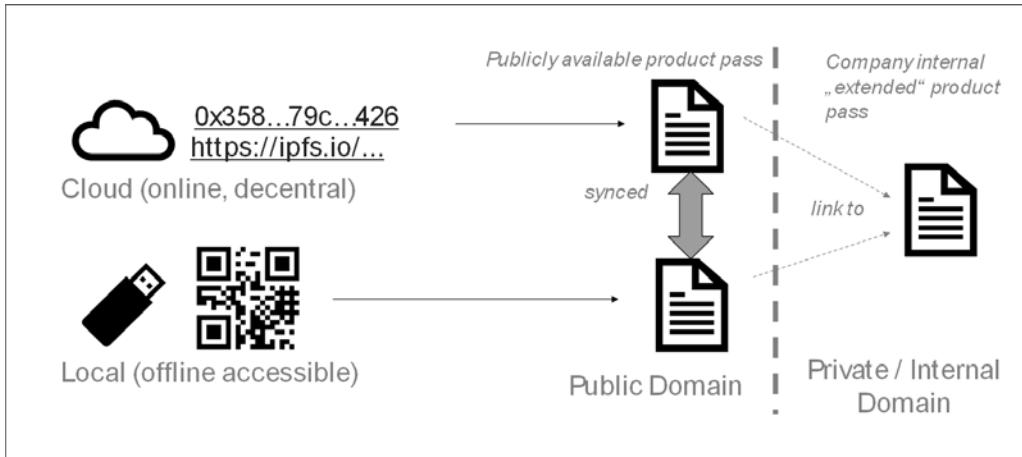


Abb. 3: Dualer Online-/Offline Produktpass für den praktikablen Einsatz. Der offline Produktpass kann für effiziente An-/Ablieferung bequem und schnell gescannt werden. Durch den Abgleich mit dem online Pass ist aber auch die Datenaktualität sichergestellt, und durch Verknüpfung mit dem privaten Produktpass können Unternehmen Zusatzdaten speichern, ohne die Daten veröffentlichen zu müssen

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Artikel haben wir die vielfältigen Anforderungen an den Digitalen Produktpass für verschiedene Marktdomänen dargestellt. Wir haben die jeweiligen Herausforderungen abstrahiert und gruppiert, und einen möglichen Lösungsvorschlag dafür skizziert, der hier noch einmal zusammengefasst wird: Um die Nachverfolgbarkeit, Echtheit und Authentizität unfälschbar nachzuweisen wird die interoperable Speicherung (CCIP) von Tracing-Informationen in der Blockchain empfohlen. Da darin aber keine großen Datenmengen gespeichert werden können und häufige Transaktionen zu hohen Kosten führen würden, wird empfohlen, die eigentlichen Produktdaten in IPFS zu speichern, welches einen dezentralen, nicht änderbaren, redundanten Datenspeicher implementiert. Die Tracing-Informationen der Blockchain verweisen dabei jeweils auf die gespeicherten Datenblöcke im IPFS. Um kontinuierliche sowie diskrete Material- bzw. Produktflüsse und deren Umwandlung beziehungsweise Verarbeitung abzubilden, benötigt man Gebinde- und Einheitenlogik, die es erlaubt Produkte in verschiedenen SI-Einheiten abzubilden und konvertieren bzw. in Gebinden beliebiger Größe zusammenzufassen oder aufzusplitten. Um größtmögliche Flexibilität und offline Funktionalität zu gewährleisten, ist es außerdem nötig, zusätzlich zum online gespeicherten Produktpass auch lokale Informationen am Produkt selbst redundant anzubringen (den sogenannten „Offline-Pass“). Beide Versionen müssen verbunden sein und sollten regelmäßig abgeglichen werden, um die Aktualität zu gewährleisten. Um zu ermöglichen, dass Unternehmen auch erweiterte (potenziell schützenswerte) Daten speichern können, könnte ein privater Produktpass mit dem öffentlichen Produktpass verknüpft werden.

In vielen Domänen gibt es bereits starke Bestrebungen, den digitalen Produktpass zu implementieren (und viele haben es schon implementiert), jedoch wird es noch ein langer Weg, bis es hier ein einheitliches, langfristiges und branchenübergreifendes System gibt. Durch Verordnungen und Projekte in dieser Richtung helfen die Europäischen Initiativen aber sehr stark, um das in den nächsten 5–10 Jahren durchzusetzen. Die dargestellten Lösungsvorschläge stellen einen weiteren Schritt in diese Richtung dar, um eine praktikable und branchenübergreifende globale Nachverfolgbarkeit aller Waren inklusive der benötigten Energieaufwände und ökologischen Fußabdrücke zu erzielen.

LITERATURVERZEICHNIS

- Chainlink Foundation. (15. 07 2024). *Chainlink CCIP*. Von Chainlink: <https://docs.chain.link/ccip> abgerufen
- Chen, Y., Li, H., Li, K., & Zhang, J. (2017). An improved P2P file system scheme based on IPFS and Blockchain. *IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 2652-2657. Von <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:30737401> abgerufen
- CIRPASS Consortium. (3 2023). CIRPASS – Digital Product Passport. Von <https://cirpassproject.eu/> abgerufen
- CIRPASS2 Consortium. (2024). CIRPASS2. Von <https://cirpass2.eu/> abgerufen
- European Commission, Directorate-General for Environment. (2020). A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe.
- European Commission, Directorate-General for Financial Stability, Financial Services and Capital Markets Union. (2023). *Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU of the European Parliament and of the Council as regards sustainability reporting standards*. European Commission.
- European Parliament, Council of the European Union. (12 2022). *Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as regards corporate sustainability reporting (Text with*. Von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32022L2464> abgerufen
- European Parliament, Council of the European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products*. European Parliament, Council of the European Union.
- Gaikwad, A. (2020). Overview of Blockchain. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 7.
- Gayko, J., & Helfritz, B. (2023). *A Landscape of Standards for the Digital Product Passport*. Von <https://www.standict.eu/digital-product-passport-standards-report> abgerufen
- Glover, B., & Bhatt, H. (2006). *RFID Essentials*. O'Reilly Media, Inc.
- Haslop, B., Schnabel, M. A., & Aydin, S. (2016). Digital Decay. *International Journal of Parallel Emergent and Distributed Systems*, 149-156.
- Idelberger, F., & Mezei, P. (2022). Non-fungible tokens. *Internet Policy Review*. Von <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:248104989> abgerufen

Mehrweg-Bouteille – Konzeption und Einführung eines Mehrweg-Systems für die 0,75-Liter-Weinflasche in Österreich

Victoria Menedetter¹ & Christian Pladerer¹

¹⁾ Österreichisches Ökologie-Institut, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Ob Milch, Limonade oder Bier - die Mehrwegflasche erlebt zurzeit ein Revival. Im Vergleich dazu gibt es bei Wein kaum Angebote in Mehrweg-Gebinden. Und das, obwohl Wein aufgrund des hohen Marktanteils inländischer Weine in Österreich prädestiniert für ein Mehrwegsystem wäre. In dem Projekt „Mehrweg-Bouteille“ hat sich ein Team aus erfahrenen Akteuren der Wein-, Logistik-, Nachhaltigkeits- und Verpackungsbranche zusammengeschlossen, um ein Mehrwegsystem für die Bouteille (0,75 l Flasche) für Wein zu entwickeln und am österreichischen Markt zu etablieren. In der Konzeptphase erarbeitet das Team seit Juli 2023 Lösungsansätze für die Herausforderungen wie Logistik, Reinigung und Verbrauchergewohnheiten um diese anschließend in der Pilotphase 2025 umzusetzen. Durch die „Mehrweg-Bouteille“ sollen positive ökologische Effekte (Abfallvermeidung, Ressourcenschonung, CO₂-Reduktion) erzielt und die Weinbranche animiert werden, auf nachhaltige Mehrweglösungen umzusteigen.

1 EINLEITUNG

Nachhaltigkeit, Klimaschutz und Ressourcenschonung werden in den nächsten Jahren die entscheidenden globalen Themen sein. Dabei spielt die Kreislaufwirtschaft eine zentrale Rolle. Reuse und Mehrweg sind die Schlüsselfaktoren für eine nachhaltige und zukunftsfähige Wirtschaftsweise. Der Großteil der Getränkeverpackungen in Österreich wird zurzeit jedoch in Einweggebinden angeboten. Obwohl regionale Mehrwegverpackungen einen klaren Vorteil in Bezug auf Abfallvermeidung, Ökobilanz und Wirtschaftlichkeit gegenüber Einwegverpackungen aufweisen, liegt der Mehrweganteil von Getränkeverpackungen bei lediglich 20 % (Wirtschaftskammer Österreich 2023). Die Vorbereitung zur Wiederverwendung steht in der Abfallhierarchie des Abfallwirtschaftsgesetzes nach der Abfallvermeidung an zweiter Stelle (§ 1 Abs. 2 S. 2 AWG). Entwicklungen am Getränkemarkt, wie beispielsweise die Einführung der Mehrweg-Milchflasche, neue Mineral- und Limonadenflaschen, sowie die Anfang 2024 eingeführte einheitliche 0,33 l Mehrweg-Bierflasche, zeigen, dass ein Bedarf für Mehrweglösungen besteht (Brau Union Österreich AG 2024).

Bei Wein ist die Mehrwegquote in Österreich allerdings sehr gering, und das obwohl die Voraussetzungen in Bezug auf die Regionalität gegeben wären. 2022 lag der Marktanteil von inländischen Weinen im Lebensmitteleinzelhandel bei 67,5 %, im Gastronomie-Bereich sogar bei 90,5 % (Österreich Wein Marketing GmbH 2022). Dennoch gibt es kaum Mehrwegsysteme am Markt. Ein zentrales Hindernis besteht darin, dass es keine normierten Weinflaschen gibt, die unabhängig von Hersteller:in und Lieferant:in retourniert werden können. Eine Wiederverwendung der Flaschen brächte daher einen hohen Sortier- und Kostenaufwand mit sich. Hinzu kommen offene Haftungs-, Hygiene- und Sicherheitsfragen sowie ökonomische Bedenken. Nichtsdestotrotz gibt es sowohl in Österreich als auch in anderen Ländern vereinzelte Beispiele von regionalen Mehrwegsystemen für Wein. Dazu gehört in Österreich die „Steiermarkflasche“ - eine pfandlose Allweg-Weinflasche, die in der Steiermark von rund 300 Weinbaubetrieben verwendet wird und von der jedes Jahr 5 Millionen Stück verkauft werden (Jammerlegg 2015). In Katalonien gab es ein wissenschaftlich begleitetes, vierjähriges EU-Projekt mit einem 20-monatigen Pilotversuch, in dem die Machbarkeit eines nachhaltigen Mehrwegsystems für die katalanische Weinindustrie überprüft wurde (Rewine 2021). Im deutschen Bundesland Baden-Württemberg ist seit einigen Jahren eine 1-Liter-Mehrweg-Weinflasche im Umlauf. Die im März 2023 neu eingeführte 0,75-Liter-Mehrwegflasche und die Eröffnung einer Flaschenwaschanlage mit einer Kapazität von 24

Mio. Flaschen macht deutlich, dass in Deutschland ein Mehrwegsystem für Weinflaschen sowohl von Winzer:innen als auch von der Bevölkerung nachgefragt wird (Wein-Mehrweg eG 2023).

1.1 Ökologischer Nutzen eines Mehrwegsystems für Wein

Einweg-Glasflaschen haben nur eine kurze Lebensdauer, da sie nach einmaliger Nutzung entsorgt werden. Durch das Glasrecycling werden die Rohstoffe zwar im Kreislauf gehalten, dennoch werden durch das Einschmelzen und die Herstellung neuer Flaschen hohe Mengen an Energie benötigt. Derzeit fallen in Österreich durch den Konsum inländischer Weine in 0,75-Liter-Gebinden rund 118 Mio. Einweg-Glasflaschen an (Österreich Wein Marketing GmbH 2022). Im Unterschied zum Recycling ermöglicht ein Mehrwegsystem die Kreislaufführung des bestehenden Gebindes, wodurch bei einer angenommenen Mehrwegquote von 20 % rund 9,7 Mio. kg Glas-Abfälle pro Jahr, verursacht durch Weinflaschen, vermieden werden könnten (eigene Berechnung, Daten: Österreich Wein Marketing GmbH 2022, Pölz & Rosner 2023).

Es wurden bereits zahlreiche Ökobilanzen zu verschiedenen Getränkeverpackungen erstellt, aus denen sich ableiten lässt, dass Mehrwegsysteme aus ökologischer Sicht umstritten an der Spitze stehen. Neben der Abfallvermeidung können durch die mehrmalige Nutzung der Gebinde auch Ressourcen, Energie und CO₂-Emissionen gespart werden. Die in der Glasproduktion vorwiegend eingesetzte Energiequelle ist Erdgas, welches einerseits teuer importiert wird und andererseits eines der größten Treiber in der Klimabilanz ist. Studien zeigen, dass das auch für den Weinsektor gilt (Pölz & Rosner 2023).

Gemäß einer Studie der HBLA für Wein- und Obstbau gemeinsam mit dem Umweltbundesamt entfallen in der Weinproduktion rund 48 % der CO₂-Emissionen auf die Einweg-Glasflasche. Das entspricht bei einer 0,75 l Einwegflasche (600g/Flasche, 100 % fossile Energieträger) 0,570 kg CO₂-Äquivalenten pro Flasche. Im Vergleich dazu beträgt der CO₂-Fußabdruck einer 0,75 l Mehrwegflasche (0,370 kg/Flasche, 75 % Recyclinganteil, Wiederbefüllungsrate 12 Zyklen) 0,287 kg CO₂-Äquivalente (Pölz & Rosner 2023). Ausgehend vom österreichischen Weinkonsum im Inland von 0,75-Liter-Flaschen (ca. 118 Mio. Flaschen/Jahr) fallen rund 67,1 Mio. kg CO₂ pro Jahr allein durch den Einsatz von Einwegflaschen im Weinsektor an. Werden bloß 20 % dieser Flaschen durch Mehrweg ersetzt, könnten jährlich rund 12,3 Mio. kg CO₂-Emissionen eingespart werden (eigene Berechnung, Daten: Österreich Wein Marketing GmbH 2022, Pölz & Rosner 2023).

Ebenso wie andere Einweggebinde tragen auch Einweg-Glasflaschen zum Problem des zunehmenden Littering (achtloses Wegwerfen von Getränkeverpackungen) bei. Die Reduktion von Einweg-Glasflaschen ist daher auch ein gewisser Beitrag zur Bekämpfung dieses Problems (Stoifl & Oliva 2020).

2 DIE ÖSTERREICHISCHE MEHRWEG-BOUTEILLE

Das Projekt Mehrweg-Bouteille zielt darauf ab, ein nachhaltiges Mehrwegsystem für die 0,75-Liter-Weinflasche in Österreich einzuführen und zu etablieren. Das Projekt, das Mitte 2023 begonnen hat, ist auf eine Gesamtdauer von zwei Jahren angesetzt. Der Pilotversuch wird Anfang 2025 starten.

Das Projekt wird von einem vielseitigen Konsortium getragen, das sich aus Expertinnen und Experten der Kreislauf- und Abfallwirtschaft, der Nachhaltigkeitsbranche, der Verpackungsbranche, der Logistik, dem Biofachhandel und dem Weinbau zusammensetzt. Zu den beteiligten Organisationen gehören das Österreichische Ökologie-Institut, der Logistikverbund Mehrweg, Wein und Obst RTD, Circular Analytics, Biogast und Raiffeisen Ware Austria. Das Projekt wird finanziert durch die Abfallvermeidungs-Förderung der Sammel- und Verwertungssysteme für Verpackungen.

In der Konzeptionierungsphase arbeitet das Projektkonsortium eng mit österreichischen Winzer:innen zusammen, um Lösungen für die Herausforderungen eines Mehrwegsystems zu erarbeiten. Diese Lösungen sollen anschließend in der Pilotphase umgesetzt und getestet werden. Ein bedeutender Meilenstein in der Konzeptionierungsphase war das Design der Flasche. Die Winzer:innen einigten sich auf zwei Flaschenformen: die Rheinwein-Flasche und die Bordeaux-Flasche. Die Flaschenhöhe wurde so angepasst, dass sie sich deutlich von Einwegflaschen unterscheidet, um Verwechslungen bei der Rückgabe in Mehrwegautomaten zu minimieren. Für das Pilotprojekt wird zunächst nur die Rheinwein-Flasche verwendet, um die Herstellungskosten gering zu halten. Die Transportverpackung wird aus Mehrweg-Kunststoffkisten bestehen, wie sie auch bei Bier verwendet werden. Die Details hierzu sind noch in Bearbeitung. Derzeit arbeitet das Projektkonsortium an der Erarbeitung eines Logistik- und Marketingkonzepts sowie der Eingang auf ökonomisch und ökologisch sinnvolle Vertriebswege. Zudem wird ein Businessplan erstellt. Diese Planungen sollen sicherstellen, dass das Mehrwegsystem sowohl wirtschaftlich tragfähig als auch umweltfreundlich ist.

Die Pilotphase wird Anfang 2025 mit ausgewählten Winzer:innen starten und sechs Monate dauern. In diesem Zeitraum wird das erarbeitete Konzept getestet und evaluiert. Die Erkenntnisse aus der Evaluierung sowie Handlungsempfehlungen für die Umsetzung werden in den Abschlussbericht einfließen. Dieser Bericht soll weiteren Winzer:innen und Stakeholdern den Umstieg auf das Mehrwegsystem erleichtern.

2.1 Projektziele und Innovationscharakter

Ziel des Projekts ist es, ein Mehrwegsystem für Wein zu konzipieren, am österreichischen Markt zu etablieren und dadurch:

- Abfall zu vermeiden sowie Ressourcen zu schonen und durch eine Verringerung des Energieverbrauchs CO₂-Emissionen zu reduzieren,
- positive volkswirtschaftliche Effekte (Sicherung von Arbeitsplätzen, Wertschöpfung, Reduktion der Erdgas-Importe) sowie betriebswirtschaftlichen Nutzen (Kosteneinsparung und eventuell Erschließung neuer Kundensegmente) für die am Projekt beteiligten Winzer:innen zu generieren,
- den Boden dafür zu bereiten, dass das eingeführte Mehrwegsystem zu Projektende in den regulären Betrieb übergeführt und für weitere Weinbaubetriebe geöffnet werden kann,
- zu demonstrieren, dass die Einführung von Mehrwegsystemen auch für Wein sinnvoll und (auch ökonomisch) machbar ist,
- Akteure zur Nachahmung inspirieren,
- und basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen und Erfahrungen konkrete Empfehlungen für die Ausweitung des Mehrwegsystems zu erarbeiten.

Der Innovationscharakter besteht darin, dass es momentan noch keine standardisierte 0,75-Liter-Mehrwegflasche für Wein am österreichischen Markt gibt. Als bestehendes System ist die „Steiermarkflasche“ zu nennen. Diese ist jedoch ausschließlich für steirischen Wein konzipiert worden. Das in diesem Projekt entwickelte Mehrwegsystem soll für den gesamten österreichischen Markt zugänglich sein, sodass – ganz nach dem Vorbild der Bierflasche – alle österreichischen Winzer:innen die Möglichkeit haben, sich an ein gemeinsames Mehrwegsystem anzuschließen und damit zu einer kreislauffähigen Weinwirtschaft beizutragen.

3 ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt Mehrweg-Bouteille ist ein wichtiger Schritt in Richtung Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung im Weinbau in Österreich. Durch die enge Zusammenarbeit von Expert:innen aus der Industrie und Winzer:innen sowie einer gründlichen Planung und Evaluierung soll ein effektives und umweltfreundliches Mehrwegsystem etabliert werden. Die Erkenntnisse und Ergebnisse

des Projekts werden maßgeblich dazu beitragen, den Weinbau in Österreich nachhaltiger zu gestalten.

LITERATURVERZEICHNIS

- Brau Union Österreich AG. (02. Februar 2024). *Mehrweg: Vetropack und Brau Union Österreich mit 0,33-Liter Lösung für die gesamte Brauwirtschaft* [Pressetext]. Von <https://presse.brauunion.at/news-mehrweg-vetropack-und-brau-union-oesterreich-mit-033-liter-loesung-fuer-die-gesamte-brauwirtschaft?id=193028&menuid=882&l=deutsch> abgerufen
- Jammernegg, S. (27. Februar 2015). *Steiermarkflasche: Eine Erfolgsgeschichte*. Von <https://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/beitrag/12215826/70175297>. Abgerufen am 02.07.2024
- Österreich Wein Marketing GmbH. (2022). *Dokumentation Österreich Wein*. Abgerufen am 28. Juli 2024 von <https://www.oesterreichwein.at/>
- Pölz, W., & Rosner, F. (2023). Calculation of the CO2 footprint using the example of Austrian wine. *Mitteilung Klosterneuburg*, 73, 152-167.
- Rewine. (2021). *LIFE 15 ENV/ES/000437 - Final report*. <http://www.rewine.cat/en/results-and-resources>. Abgerufen am 03. 07 2024
- Stoifl, B., & Oliva, J. (2020). *Littering in Österreich*. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- Wein-Mehrweg eG. (2023). *Wein-Mehrweg eG*. Von startet Mehrweg-Pool und Pfandsystem für 0,75l Weinflaschen: <https://www.wein-mehrweg.de/>. Abgerufen am 02.07.2024.
- Wirtschaftskammer Österreich. (2023). *Zukunft Kreislaufwirtschaft - Nachhaltigkeitsagenda für Getränkeverpackungen*. Abteilung für Umwelt- und Energiepolitik. Wien: WKO.

KONTAKT

Victoria Menedetter, BSc.
menedetter@ecology.at
+43 699 152 361 16
Kreislauf- und Abfallwirtschaft
Österreichisches Ökologie-Institut
www.ecology.at

PROJEKT KONSORTIUM



HBLA und Bundesamt
Klosterneuburg
Wein- und Obstbau



Gefördert durch:



Post-war waste management in the Ukraine

Olena Hanoshenko ^{1,2} & Marion Huber-Humer ¹

¹⁾ BOKU-University of Natural Resources and Life Sciences, WAU, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

²⁾ National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Department of Applied Ecology and Environmental Management, Poltava, Ukraine

ABSTRACT: The full-scale invasion of the territory of Ukraine by the Russian Federation is accompanied by the pollution and destruction of environmental components, destruction of the socio-economic sphere, and infrastructure facilities. Concerning waste management, there is a constant generation of construction/demolition waste, the quantitative and qualitative composition of which is currently difficult to assess. The characteristics and composition of destruction waste generated as a result of military actions differ from ordinary construction waste. Waste streams may contain contaminants after the detonation of explosive devices which makes it difficult to identify and sort such waste. Therefore, due to the change in daily lifestyle and consumption behavior, municipal solid waste (MSW) generation and composition are expected to change. A lot of infrastructure in the waste management sector has been destroyed, which means that big amounts of unsorted and untreated waste currently end up in landfills, most of which are uncontrolled and not state-of-the-art.

1 INTRODUCTION

The impact of military actions on the infrastructure of Ukrainian cities has resulted in the partial or complete destruction of buildings and structures across a large part of Ukraine. Residential buildings have suffered the most, and it is worth noting that the facts of devastation due to constant shelling are still recorded almost daily (United Nations Ukraine, 2023; OECD, 2022; KSE, 2022). The waste left after the destruction caused by military aggression is different from "ordinary" construction waste, as it consists of (potentially dangerously contaminated) residues of materials of different structure and origin, which makes it difficult to sort and reuse them. We can find metal and glass, facade decoration materials, reinforcing mesh, mineral wool, interior decoration materials, wall materials, roofing, household items, and wood fragments. Individually, all of these residues could be used, but in their current state they require very careful sorting. This is quite problematic in the current conditions and volumes (Ivaniuta, 2023; Decentralization in Ukraine, 2022).

The problem of uncontrolled waste management in Ukraine existed partly already before the war. The current practice of handling household waste is focused on its removal and disposal in landfills and dumps, most of which do not meet the requirements of environmental safety, and are also uncontrolled "temporary" landfills of household waste. In addition, the lack of recycling systems leads to the loss of large volumes of resource-intensive (valuable) materials. With the outbreak of war, this situation has worsened, despite the adoption of very important regulations on the waste management system after February 2022.

It must be noted that the data on the amount of construction waste is constantly changing, and the final estimates will be possible only after the war is over. Thus, the purpose of the study is to assess, model or selectively measure the generation and composition of post-war demolition/construction waste as well as MSW during and after the war as a basis for further planning and decision-making.

2 DESCRIPTION OF THE CURRENT SITUATION

An important aspect of the study was the consequences of the impact of military actions on the waste management system and construction waste in particular. (Kolesnichenko, 2023;

Hubareva, 2022). Considering the state of destruction and the number of destroyed facilities, the country has an urgent problem of generating a huge amount of construction waste. Step-by-step instructions for handling demolition waste (Resolution of the Cabinet of Ministers No. 1073, 2022) have already been developed for Ukrainian communities affected by military actions. In most of these areas, special sites have been set up to store "sorted" waste. However, there is an urgent need to assess the generation, sorting effectiveness, and composition of such waste. Moreover, due to the change in daily lifestyle and consumption behavior, municipal solid waste (MSW) generation and composition are expected to change. And finally, a lot of infrastructure in the waste management sector has been destroyed, which means that large amounts of unsorted and untreated waste currently end up in landfills, most of which are uncontrolled.

2.1 *Destruction of infrastructure and building sector caused by the war*

As of January 2024, the total amount of direct damage to Ukraine's infrastructure during the two years of war was about \$155 billion (KSE, 2024). This estimate also includes the damage caused by the destruction of the Kakhovka hydroelectric power plant in June 2023. However, it is worth noting that the increase in the number of damaged and destroyed infrastructure, housing, industry, energy, education, and healthcare facilities is still going on.

Ukraine's housing fund has suffered the most losses, and the number of damaged and destroyed residential buildings is increasing every day due to hostilities and shelling. As of 2024, the number of such buildings exceeds 250,000, including 222,000 private houses, more than 27,000 apartment buildings, and 526 dormitories. It is estimated that the direct damage from the destruction of these facilities is \$58.9 billion, which is \$4.8 billion more than at the end of 2023.

The report by the Kyiv School of Economics states that most of the destruction was recorded in Donetsk, Kyiv, Luhansk, Kharkiv, Chernihiv, and Kherson regions. Seventy-eight small, medium, and large private enterprises, as well as 348 state-owned enterprises, 3,800 educational institutions, 1,800 cultural institutions, 580 state, and local government buildings, 50 public service centers (PSCs), 48 social centers, 31 boarding schools, 31 shopping centers, and many other facilities were destroyed or damaged (KSE, 2024).

According to the Ecodozor information platform, the damage and destruction of settlements in March 2024 alone is shown in Figure 1 (Ecodozor, 2024).

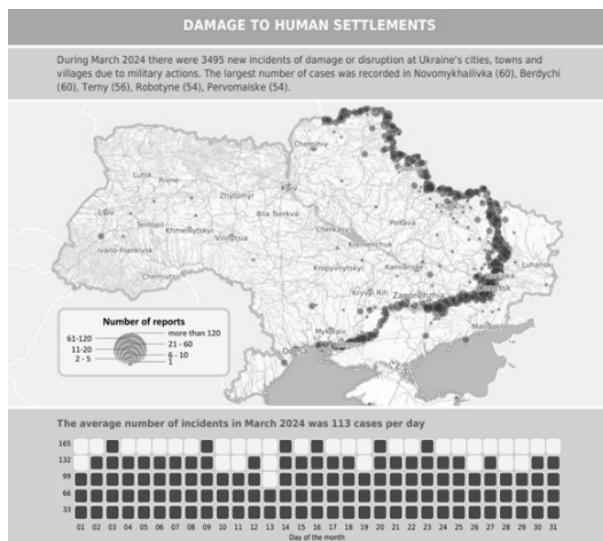


Fig. 1: Damage to human settlements, March 2024

Ecodozor - information platform is continuously improving, with data regularly added and updated. The platform's development and maintenance are ensured by Zoï Environment Network (Switzerland) with support from the Organization for Security and Co-operation in Europe, the UN Environment Programme, and the REACH humanitarian initiative.

The information is based on media reports, supplemented by information from government agencies, academic and non-governmental organizations, and other sources. The developers and partners strive to ensure the quality and completeness of the information but are not responsible for the accuracy of the source data used. However, thanks to such platforms, we understand the consequences of the destructive impact of military aggression in Ukraine.

Figures 2 and 3 show evidence of the destruction of Ukrainian settlements (Dubrovenko, 2024; Kucherenko, 2022).



Fig. 2: Mariupol city, CNN



Fig. 3: Ukrainian independent news agency (UINA)

2.2 Current Waste Management organization and situation in Ukraine

Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1073 of September 27, 2022, approved the Procedure for Waste Management resulting from damage (destruction) of buildings and structures as a result of hostilities, terrorist acts, sabotage, or work to eliminate their consequences (hereinafter referred to as the Procedure) (Resolution of the Cabinet of Ministers No. 1073, 2022).

The document states that the procedure for managing demolition waste is introduced in the territories where active phases of hostilities are absent or completed, is temporary and significantly simplified compared to the management of other types of waste. It is aimed at carrying out recovery work to eliminate the consequences of armed aggression and hostilities during martial law and during the reconstruction period within 90 calendar days after its termination or cancellation. Local self-government bodies are responsible for identifying and accounting for destruction waste, as well as organizing the management of such waste.

Following the Procedure, the operations of handling demolition waste include:

1. primary clearing of territories (collection of demolition waste, including, if possible, sorting of individual components of demolition waste)
2. transportation of demolition waste from the place of its generation to waste management facilities or temporary storage facilities;

3. final (after dismantling of damaged (destroyed) objects) clearing and cleaning of the territories (if necessary);
4. storage of destruction waste at temporary storage sites or other waste management facilities (until their utilization or disposal);
5. treatment (processing) of demolition waste and/or its neutralization (if necessary);
6. utilization of demolition waste (use of waste as secondary material or energy resources);
7. removal of demolition waste, including its disposal.

In addition to the Procedure, which contains step-by-step instructions, experts from the U-LEAD program (Ukraine - Local Empowerment, Accountability, and Development, which is a program of cooperation between the Ukrainian government, the European Union and its member states Germany, Poland, Denmark, and Slovenia) created a brochure - a guide to managing demolition waste (Kucherenko; 2022). It contains the basic information in a clear and understandable form. Accordingly, now every community on the ground can properly organize the disassembly and dismantling of damaged or destroyed objects, know how to sort and store demolition waste and how to keep records of such waste.

The accounting of demolition waste is carried out at the place of its generation or temporary storage sites or other waste management facilities in the form according to Annex 2 (of the Procedure). The authorized bodies shall submit information on construction and demolition waste to the regional state administrations monthly.

Generalized information on demolition waste is submitted by the Kyiv military (Kyiv city) and regional military (state) administrations to the Ministry of Infrastructure. In addition, the authorized body publishes information on the identification and accounting of demolition waste on its official website.

Thus, there is a certain algorithm for post-war waste management, which includes information on the types of waste, possible problems and threats in their management, rules for separation and sorting, and measures to organize temporary storage facilities.

It is worth distinguishing two groups of waste left behind after the destruction caused by military actions, as they differ from the usual construction waste.

1. Typical waste:

- structural materials, such as bricks, concrete, steel, wood, plasterboard, slate, roofing material, etc;
- parts from water supply and sewage systems
- parts of electrical networks, including electrical poles, wires, electrical equipment, and transformers;
- waste, soil, fallen trees, branches, etc;
- damaged vehicles and military equipment.

2. Specific waste:

- furniture, household appliances, household chemicals, carpets, etc., including burnt and damaged ones
- office furniture, office equipment, including burnt and damaged furniture
- chemicals, industrial waste, raw materials and products, production equipment
- road surface;
- medical waste, including epidemically dangerous waste
- chemical plant protection products and fertilizers.

An important aspect is the duration of response and recovery phases after the destruction of infrastructure, as they are crucial in making decisions on waste management after the war:

1. Emergency phase - 0-72 hours after the destruction.
2. Early recovery phase - approximately 72 hours after the destruction.
3. Recovery phase - after the end of armed aggression or military danger.

During each phase, the actions to be taken and the key issues to be resolved are clearly defined, with mandatory compliance with safety requirements. The result of these actions should be the elimination of all waste left after the destruction and the sustainable operation of the waste management system.

In accordance with the approved Waste Management Procedure and the developed procedure of action, it should become possible to regulate the issue of waste management generated as a result of military operations. Thus, local governments are responsible for organizing and coordinating the management of such waste in their respective territories.

According to local governments, as of the beginning of 2024, about 600 thousand tons of demolition waste have been accumulated at temporary storage sites and landfills. These are the volumes accumulated only in the territory controlled by Ukraine, excluding waste generated in the temporarily occupied territories and territories of active hostilities (Ministry of Development of Communities, Territories, and Infrastructure of Ukraine, 2024).

As noted above, the accounting of waste from destruction should be carried out by the authorized bodies at the place of its generation or temporary storage or other waste management facilities in the form according to Annex 2 to the Procedure. In general, such accounting should be carried out at temporary storage sites for the destruction waste.

However, in fact, the following situation is actually observed in practice: the authorized bodies do not properly keep records of waste generated on the territory of their communities. Such records are kept only in the process of removing waste at the places of its temporary storage, while many wastes remain at the places of their generation and thus are not included in official statistics, since they are not recorded at the place of generation. Consequently, sorting is not carried out properly, so it is currently difficult to obtain high-quality secondary raw materials for further processing (EPL, 2024).

Figure 4 shows a current household waste collection site, figure 5 shows spontaneous dumps of household waste and waste from the destruction after de-occupation in Gostomel (photo provided by Tetiana Bilan, head of the municipal enterprise "Gostomel Housing and Communal Services Department") (Stukalo, 2023).



Fig. 4: Household waste collection point



Figure 5. Uncontrolled „temporary“ landfills for household waste

Given the importance and relevance of the waste management issue, and the lack of practical experience of communities in waste management during martial law, it is worth paying attention to the typical problems and challenges faced by communities (Chernysh, 2022):

1. Changes in a legal and regulatory framework.
2. Reduction of revenues for services due to migration of a part of the population abroad or reduced solvency of community residents.
3. The impact of IDPs on solid waste generation, e.g., additional volumes of solid waste, changes in the distribution of solid waste generation across the territory of settlements, non-compliance with the rules of solid waste management.
4. Temporary inability of local authorities and service providers to respond promptly to the challenges of unauthorized solid waste dumping.

On June 19, 2023, the Cabinet of Ministers approved the procedure for household waste management under martial law in communities where military operations have been or are ongoing. The new procedure provides structured actions for the arrangement of temporary waste storage sites with appropriate environmental, fire safety, and security requirements.

3 OUTLOOK AND NEXT NECESSARY STEPS FOR IMPROVEMENT OF WAR AND POST-WAR WASTE MANAGEMENT

Currently, Ukraine does not have clear, understandable, and informative statistics on the quantitative and qualitative composition of demolition waste, and the existing data is not complete and does not allow for a correct assessment of the situation. In our opinion, it will be possible to characterize the material composition of waste only if there is relevant data on waste accounting from communities and information on the material intensity of buildings of different types. To do this, it is necessary to characterize the housing stock by certain indicators, such as the distribution of houses by year of construction, data on the area, and a number of stories of houses, as well as to analyze the classification of residential buildings depending on the quality of housing and available engineering equipment (Order of the State Committee for Construction, Architecture and Housing Policy of Ukraine, 1998).

By combining the collected information on building structures of different categories, their material consumption, and destroyed buildings, one will be able to pre-investigate and identify the list and approximate amount of waste generated as a result of the destruction.

Waste management is currently complicated by the destruction of infrastructure, the movement of internally displaced persons (IDPs), and the decline in economic activity. During active hostilities, garbage collection vehicles, biogas plants, and sorting lines are destroyed or damaged. Thus, waste management in Ukraine is currently a priority area of work for local governments, and most territorial communities need to improve their understanding of the role and responsibility in waste management. Therefore, this issue is becoming increasingly relevant and requires the development of a high-quality waste management system at the local level.

Since there is currently limited information on deconstruction and demolition waste as well as the composition of buildings of different categories, it is difficult to estimate the overall picture, especially concerning the material intensity of categories of buildings and structures that are currently underrepresented by data sources and therefore subject to further research.

In the frame of a 2-year MSC4Ukraine fellowship in Austria, a scientifically based concept for modern and future-targeted (post-war) Ukrainian waste management and landfill aftercare systems will be developed. Research questions are mainly targeted at (1) How to scientifically assess/measure MSW generation and composition in post-war/post-disaster regions; (2) What are suitable waste management concepts (including modern collection and recycling technologies as well as organizational/business models) to transfer and implement in the case study region Poltava (Ukraine); (3) Which landfill technologies, emission reduction methods and reliable monitoring and aftercare concepts for landfills are available and can be further developed/adapted so that they can be applied under the conditions at Ukrainian landfills.

Major expected outcomes are the development of an implementation guideline for applying modern waste management and landfilling concepts in the case study region Poltava in Ukraine after the war.

Currently, during 2023-2024, the joint Ukrainian-Austrian research project "Solid municipal waste composition research and its resource potential" is being implemented. The project aims to determine the component composition of municipal waste and its resource potential for the further selection of the necessary infrastructure for the collection, transportation, and treatment of municipal waste. The project will also provide a basis for planning and conducting a sorting analysis of MSW to create a reliable database for MSW, which can also help estimate future waste streams. Thus, the project aims to develop the MSW system in the cities of the Poltava region, taking into account the experience gained in more experienced countries such as Austria and other EU countries.

In the Poltava region and other regions of Ukraine, waste management problems are significant not only because of the resource-intensive economy and the long-standing lack of effective waste management solutions but also because of the deterioration of the situation due to military operations in a large part of Ukraine.

The major part of solid waste is disposed of in landfills or even dumps, and the absence of a recycling system leads to the loss of significant amounts of resource-rich materials. Therefore, an important basis for improving the quality of collected materials should be the development of separate waste collection with subsequent processing, using European experience in this area. For example, during the development of the strategic document "Regional Waste Management Plan for Poltava Region until 2030", the scientists of the National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic" assessed the landfills and dumps in the region. The total number of landfills and dumpsites as of the beginning of 2022 was 709 (RWMP Poltava Region, 2021).

The next important step is that the development of the solid waste management system in Poltava region should be based on substantiated data. Therefore, detailed studies of the composition of the generated solid waste in different communities are needed to assess the resource potential and implement appropriate technical and organizational solutions in the field of solid waste management.

An important and necessary step may be the assistance of other countries, through the introduction of European practices and experience in reforming and improving the waste management system in Ukraine. And the process of post-war economic development should be used for Ukraine's fundamental transition to a green and clean economy and should be built on modern circular economy principles to preserve resources.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to express our gratitude to the MSCA4Ukraine team for the support of researchers who moved from Ukraine and the funding of the conducted research (Grant: MSW – PostWar, № 7813015388).

This scholarship scheme is implemented by a consortium comprising Scholars at Risk Europe (SAR Europe) based at the University of Maynooth, Ireland (project coordinator), the German Alexander von Humboldt Foundation (AvH), and the European University Association (EUA).

REFERENCES

- Chernysh O. (2022) U-LEAD with Europe Programme. Waste management in wartime: tips for municipalities (INFOGRAPHIC). Available at: <https://u-lead.org.ua/en/news/48>
- Decentralization (2022) Waste management in hromadas destroyed by armed aggression - U-LEAD experts provided recommendations. Available at: <https://decentralization.gov.ua/news/15081> (accessed February 2024).
- Dubrovenko A. (2024) Two years of war - what are the losses of Ukraine from the invasion of the Russian Federation and the rating of the most affected regions. Available at: <https://fin.novyny.live/dva-roki-viini-aki-zbitki-ukrayini-vid-vtorgnennia-rf-ta-reiting-naibilish-postrazhdalikh-oblastei-154222.html>

- Ecodozor (2024) Environmental consequences and risks hostilities in Ukraine. www.ecodozor.org
- EPL (2024) Status of Demolition Waste Management in Ukraine as of April 2024. Available at: <https://epl.org.ua/announces/stan-povodzhennya-z-vidhodamy-vid-rujnuvan-v-ukrayini-stanom-na-kviten-2024-roku/>
- Hubareva V. (2022a) Waste from the war: what is it and how to deal with it? Available at: <https://rubryka.com/article/waste-from-war/> (accessed March 2024).
- Ivaniuta S. (2023) On the organization of waste management resulting from the war. National Institute for Strategic Studies. Available at: <https://niss.gov.ua/en/node/4871>
- Kolesnichenko O. (2023) A trillion-dollar problem. What Ukraine will do with hundreds of thousands of tons of garbage created by Russians. Available at: <https://www.epravda.com.ua/publications/2023/06/19/701281/> (accessed March 2024).
- KSE (2022) Direct damage caused to Ukraine's infrastructure during the war has reached over USD 105.5 billion. Available at: <https://kse.ua/about-the-school/news/direct-damage-caused-to-ukraine-s-infrastructure-during-the-war-has-reached-over-105-5-billion/> (accessed February 2024).
- KSE (2024) Report on direct infrastructure damage from the destruction caused by Russia's military aggression against Ukraine as of the beginning of 2024. Available at: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf
- Kucherenko S. (2022) Raise from the ruins: what to do with the remains of bombed-out buildings and why construction waste can't just be "buried" in a landfill. Available at: <https://mind.ua/publications/20242694-pidnyati-z-ruyin-shcho-robiti-iz-zalishkami-rozbomblenih-budinkiv>
- Management of infrastructure destruction waste (2022) Available at: https://ulead.org.ua/storage/admin/files/841c56a91cd9f15bb94c0816ac1b22b9.pdf?fbclid=IwAR2XfvJn1dNN74NYr61L3c1-MXWKrwqNmw6Gul_dEtyorFnUvj9Oal9SKjM
- Ministry of Development of Communities, Territories and Infrastructure of Ukraine (2024). The Ministry of Development of Communities, Territories and Infrastructure, together with representatives of local self-governments, discussed the principles of waste management from destruction. Available at: <https://mtu.gov.ua/news/35389.html>
- OECD (2022) Environmental impacts of the war in Ukraine and prospects for a green reconstruction. Available at: <https://www.oecd.org/ukraine-hub/policy-responses/environmental-impacts-of-the-war-in-ukraine-and-prospects-for-a-green-reconstruction-9e86d691/> (accessed February 2024).
- Order of the State Committee for Construction, Architecture and Housing Policy of Ukraine (1998) September 30, 1998 No. 215. On the approval of the Unified Classifier of residential buildings depending on the quality of housing and available engineering equipment.
- RWMP Poltava Region (2021) Regional Waste Management Plan in Poltava Region until 2030. <https://www.adm-pl.gov.ua/advert/oprilyudnennya-dlya-obgovorennya-proektu-regionalniy-plan-upravlinnya-vidhodami-u-poltavskiy>
- Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (2022) No. 1073 of September 27, 2022 «On Approval of the Procedure for Waste Management Generated in Connection with Damage (Destruction) of Buildings and Structures as a Result of Hostilities, Terrorist Acts, Sabotage or Works to Eliminate Their Consequences and Amendments to Certain Resolutions of the Cabinet of Ministers of Ukraine».
- Stukalo O. (2023) Under the impact of war: what to do with waste from destruction in communities? Available at: <https://rubryka.com/article/vidhody-vid-rujnuvan-u-gromadah/>
- United Nations Ukraine (2023) Rapid Damage and Needs Assessment. Available at: <https://ukraine.un.org/en/224376-ukraine-rapid-damage-and-needs-assessment> (accessed December 2023).

Verunreinigungen auf in der Papierindustrie gelaufenen Pressfilzen

Alexia Tischberger-Aldrian¹, Karin Schinner¹, Nicole Weber¹, Ivica Duretek², Klaus Haiden³, Birthe Denneler⁴ & Jan Freudenberg⁴

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

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

³⁾ Andritz Fabrics and Rolls GmbH, Gloggnitz, Österreich

⁴⁾ Andritz Fabrics and Rolls GmbH, Reutlingen, Deutschland

KURZFASSUNG: Pressfilze werden als Bespannungstextilien für Papiermaschinen in der Papierindustrie verwendet und fallen alle 30-100 Tage als Abfälle an, die derzeit thermisch verwertet werden. Die Pressfilze stehen in der Papiermaschine in direktem Kontakt mit der Papierbahn und nehmen während der Nutzungsphase zahlreiche, im Papierherstellungsprozess zur Anwendung kommende Stoffe auf. Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse der Untersuchungen von Pressfilzen aus Produktionslinien für unterschiedliche Papiere (Verpackungs-, Hygiene- und grafische Papiere) vorgestellt. Diese sind für die abfallrechtliche Bewertung sowie als Informationsgrundlage für einen möglichen Recyclingprozess von besonderer Bedeutung.

1 BESPANNUNGSTEXTILien IN DER PAPIERINDUSTRIE

Die Zellstoff- und Papierindustrie gehört zu den weltweit größten Industriezweigen. In Europa werden über 90 Mio. Tonnen Papier in rd. 940 Fabriken erzeugt (Austropapier 2017). Allein in Österreich werden im Jahr ca. 2 Mio. Tonnen Zellstoff und 4,6 Mio. Tonnen Papier in 23 Werken produziert (Austropapier 2024). Grundsätzlich lassen sich Papiere in folgende Hauptprodukte einteilen: Verpackungspapiere, grafische Papiere (z.B. Zeitungsdruckpapier, Offsetpapier, Buchdruckpapier), Spezialpapiere (z.B. Etikettenpapier, Fotopapier, Thermopapier) und Hygienepapiere (z.B. Taschentücher, Küchentücher, Handtücher). (SL 2016)

In Europa fallen jährlich etwa 11 Mio. Tonnen unterschiedlichste Abfälle in mehreren Prozessstufen der Zellstoff- und Papiermühlen an (u.a. Holzrückstände, Aufschlusslösungen, Schlämme) (Amândio MST, 2022). Zu diesen Abfällen zählen auch sogenannte Bespannungstextilien, dazu gehören Trockensiebe, Formersiebe und Pressfilze. Letztere stehen im Fokus des vorliegenden Beitrags.

Eine Umfrage mit österreichischen Papierherstellern (Tischberger-Aldrian & Weber 2024) ergab, dass die Pressfilze im Regelfall an Entsorgungsunternehmen übergeben werden, die sie einer thermischen Verwertung zuführen. Manchmal werden sie auch als Unterlagen oder Abdeckungen für den internen Gebrauch verwendet.

Die Pressfilze erfüllen die nachfolgenden drei grundlegenden Funktionen: a.) Sie unterstützen die Entwässerung der Papierbahn, b.) sie stützen die Papierbahn und c.) sie transportieren die Papierbahn und fungieren quasi als Förderband. (Dasgupta & Ray 2009)

Pressfilze bestehen aus einem inneren Gewebe, das ein- oder doppellagig ausgeführt werden kann, und einer genadelten Struktur an der Oberseite und der Unterseite des Gewebes. (Blechschmidt & Naujock 2010) Sowohl das Vlies als auch das innere Gewebe bestehen im Regelfall aus künstlichem Polyamid. (Håkansson 2021)

Prinzipiell sind alle Papiermaschinen individuell für ihren jeweiligen Zweck designed, die Grundstruktur ist jedoch ähnlich und enthält eine Formpartie sowie eine Pressenpartie und eine Trockenpartie. (Håkansson 2021)

In der Formpartie wird die Papierbahn geformt und das überschüssige Wasser aus dem Papierbrei entfernt. In diesem Bereich kommen Formersiebe zum Einsatz. Hier wird der Trockenstoffgehalt der Papierbahn von etwa 1 % auf 20 % erhöht. Nach der Formpartie wird die Papierbahn zur Pressenpartie weitertransportiert. Hier wird das Papier auf den Pressfilzen liegend durch Walzen gepresst und das Wasser in Walzenspalten (sog. Nips) ausgetragen. Im Bereich der Pressenpartie wird der Trockenstoffgehalt der Papierbahn auf etwa 45 % erhöht.

Im Anschluss an die Pressenpartie folgt die Trockenpartie, wo Trockensiebe zum Einsatz kommen. In der Trockenpartie wird die Papierbahn auf dem Trockensieb liegend gegen beheizte Zylinder gepresst. In diesem Bereich erhält die Papierbahn einen Trockensubstanzgehalt von etwa 95 %. (Peltomäki 2020)

Bespannungstextilien nutzen sich mit der Zeit ab, wobei folgende Faktoren eine Rolle spielen:

- a) Kompression: Wenn ein Pressfilz den Walzenspalt durchläuft, wird er komprimiert und kann mit der Zeit seine ursprüngliche Form nicht mehr annehmen. Durch diese Kompression verliert der Pressfilz jedoch die Fähigkeit Wasser aufzunehmen.
- b) Verunreinigungen: Mit der Nutzung lagern sich darin Papierfasern, Chemikalien, Harze sowie Staub ab und verstopfen den Pressfilz dadurch zunehmend.
- c) Verlust des Vlieses: Durch die Reibung an Papier, Walzen oder Saugkästen verlieren die Pressfilze mit der Zeit ihr Vlies (d.h. ihre Wattierung).
- d) Ungleichmäßigkeiten: Durch die Abnutzung wird der Pressfilz ungleichmäßig bzw. löst sich im schlimmsten Fall auf.

Die Einsatzdauer der Pressfilze variiert von Unternehmen zu Unternehmen stark und liegt laut Umfrage bei österreichischen Papierherstellern (Tischberger-Aldrian & Weber 2024) bei 30-100 Tagen.

Während ihrer Nutzungsphase lagern sich diverse Verunreinigungen in den Pressfilzen ab. 2022 wurden in Österreich 1.110.054 Tonnen an Chemikalien in der Faserstoff- und Papierherstellung eingesetzt (Austropapier 2023). Die größten Anteile davon verbleiben im Papier, werden im Kreislauf geführt oder verlassen über das Abwasser die Produktion. Ein Teil der eingesetzten Chemikalien akkumuliert in den Bespannungstextilien. (Blechschmidt & Naujock 2010). Bei den Pressfilzen kommt hinzu, dass sie durch den direkten Kontakt mit der Papierbahn durch die eingesetzten Harze und Chemikalien z.T. stark eingefärbt werden. (Håkansson 2021).

In der Literatur ist die Art und Menge der Verunreinigungen auf den Pressfilzen mit wenigen Ausnahme (z.B. Calciumcarbonat, Kaolin) kaum untersucht. Informationen über die Art und Menge der eingesetzten Chemikalien in der Papierherstellung sind Know-How der jeweiligen Unternehmen und werden im Normalfall nicht offen gelegt. Für die abfallrechtliche Einstufung der Pressfilze (z.B. bei Verbringung) sowie im Rahmen eines Recyclingprozesses, wie er im Rahmen des Forschungsprojektes „ReFibreValue“ entwickelt wird, ist es jedoch essentiell, nähere Informationen zu den enthaltenen Verunreinigungen zur Verfügung zu haben. Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse der chemischen Charakterisierung von gelaufenen Pressfilzen vorgestellt. Zudem werden die vorhandenen Farbstoffklassen identifiziert, was für den Waschprozess im Zuge des Recyclingprozesses von Bedeutung ist.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Versuchsmaterialien

Insgesamt standen sechs verschiedene Pressfilze zur Verfügung, davon war einer neuwertig (P_n), der Rest war in unterschiedlichen Papiermaschinen zur Herstellung verschiedener Produkte genutzt worden. Die Produktionslinien umfassten grafisches Papier (P_G), Tissue (Hygienepapier (P_T) und drei verschiedene Packaging-Linien (Verpackungspapiere, Karton) (P_{P1}, P_{P2}, P_{P3}) (vgl. Abbildung 1).

2.2 Chemische Charakterisierung der Pressfilze

Sowohl der neuwertige als auch die gelaufenen Pressfilze wurden analytisch charakterisiert. Zum einen wurden die folgenden Parameter mittels folgender Methoden im Feststoff gemessen: Br, Cl, F und S mittels IC (DIN EN ISO 10304-1) nach kalorimetrisches Aufschluss (ÖNORM EN 14582), Metalle nach Totalaufschluss (ÖNORM EN 13656) mittels ÖNORM EN ISO 17294-2,

Chrom VI nach EPA 3060 A und DIN 38405-24, MBAS im Feststoff nach ÖNORM EN 903 (Feststoff wurde hier direkt für Extraktion eingesetzt).

Zum anderen wurden die folgenden Parameter mittels folgender Methoden im Eluat (klassisch 1:10, 24 h) gemessen: Anionen mittels DIN EN ISO 10304-1, MBAS nach ÖNORM EN 903, TIC und TOC nach ÖNORM EN 1484, elektrische Leitfähigkeit nach DIN EN 27888, pH-Wert nach ISO 10523 und Metalle nach ÖNORM EN ISO 17294-2.

Zusätzlich wurden die Pressfilze P_N , P_G , P_T und P_{P1} auch noch in einem Unterauftragslabor für Textilprüfung auf verschiedene organische Stoffe (vgl. Ergebnisse) untersucht.

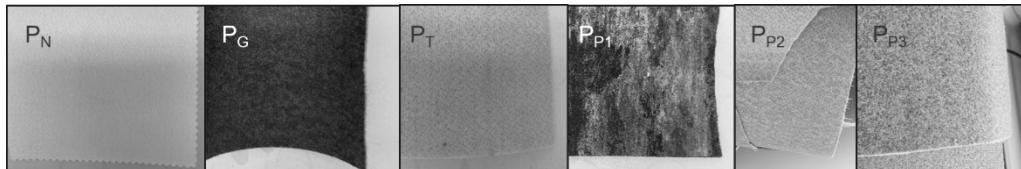


Abb. 1: Untersuchte Pressfilze - ungebraucht (P_N) und gebraucht (P_G , P_T , P_{P1} , P_{P2} , P_{P3})

2.3 Identifikation der Farbstoffe in den Pressfilzen

Die Prüfung aller Pressfilzproben erfolgte qualitativ nach ÖNORM EN ISO 16373-1 (ASI 2016) auf das Vorhandensein von folgenden Farbstoffen: Säurefarbstoffe, basische Farbstoffe, Metallkomplexfarbstoffe, Azofarbstoffe, Direktfarbstoffe, Reaktivfarbstoffe, Dispersionsfarbstoffe, Schwefelfarbstoffe, Küpenfarbstoffe, Anilinschwarz, Chromfarbstoffe.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Ergebnisse der untersuchten Pressfilze sind in Tabellen 1 (Feststoffgehalte) und 2 (Eluatgehalte) dargestellt, wobei die jeweiligen Messwerte des neuwertigen Pressfilzes von den gebrauchten Pressfilzen abgezogen wurde, um lediglich die Kontaminationen auf den gelaufenen Pressfilzen zu erfassen.

Die nachfolgenden Parameter lagen im Eluat für sämtliche Pressfilze unter der Bestimmungsgrenze: Nitrit (< 5,0), Ammonium (< 0,5 mg/kg), Chrom VI (< 2,0 mg/kg), Phenolindex (< 0,1 mg/kg), Pd, Ag, Cd, Co, Sb, Hg, Ti (< 0,010 mg/kg), Sn und Te (< 0,020 mg/kg).

Die nachfolgenden Parameter lagen im Feststoff für sämtliche Pressfilze unter der Bestimmungsgrenze: Brom (< 1100 mg/kg), Fluor (< 75 mg/kg), Be, Se und As (< 2,5 mg/kg), Co, Mo, Pd, Ag, Sb, W, Hg, Ti (< 0,25 mg/kg) sowie Sn und Te (0,5 mg/kg),

Grundsätzlich sind die Kontaminationen der Pressfilze abhängig von der Papierproduktionslinie, in der sie gelaufen sind (vgl. Feststoffgehalte Tabelle 2). So unterscheiden sich einerseits die Art der vorhandenen Stoffe als auch die Menge für die unterschiedlichen Papiere. Tendenziell sind P_{P2} und P_{P3} am stärksten belastet, diese wurden bei der Produktion von Kartonagen und Verpackungspapieren eingesetzt, bei der traditionell auch „minderwertigeres“ Altpapier als Rohstoff zum Einsatz kommt und der Eintrag von vor allem Schwermetallen dadurch verstärkt wird.

Hohe Calcium-, Aluminium-, Magnesium und Siliziumfeststoffgehalte lassen sich auf die Verwendung von häufig verwendeten Füllstoffen wie z.B. Calciumcarbonat, Kaolin, Bentonit und Talcum zurückführen. Schwefel und Calcium könnten theoretisch auch über Füllstoffe wie Gips stammen. Titan ist primär auf Titandioxid zurückzuführen. Barium wird klassischerweise über Bariumsulfat („Blanc fix“) eingetragen. (SL 2016)

Auch das Vorhandensein von Magnesiumsulfat (Hilfsmittel) bzw. Aluminiumsulfat (Retentionsmittel) sind in P_{P1} bzw. P_G und P_{P1} möglich (vgl. Tabelle 2 Eluatgehalte).

Kommt Altpapier zum Einsatz, werden häufig anionische Tenside als Flotationsmittel (SL 2016) eingesetzt (vgl. P_{P3}).

Die Studie von Pivnenko et al. (2016) zur Untersuchung von Altpapier ergab, dass Cd, Co und Ni in höheren Konzentrationen in Kartonverbunden (6,1 mg/kg) und Kartonagen aus Wellpappe

(67 mg/kg) gefunden wurden. Auch bei den Pressfilzen weisen jene höhere Schwermetallgehalte auf, bei denen Altpapier verwendet wird.

Phosphor könnte über Polyphosphate, die als Dispergiermittel zum Einsatz kommen (SL 2016), auf die Pressfilze eingetragen worden sein.

Tab. 1: Feststoffgehalt der untersuchten Pressfilze

Parameter	Einheit	P _G	P _T	P _{P1}	P _{P2}	P _{P3}
Chlor	mg/kg	< 10	40	11	< 10	130
Schwefel	mg/kg	70	360	1260	410	190
MBAS	mg/kg	< 7,0	< 7,0	< 7,0	< 7,0	26
Li	mg/kg	< 0,5	< 0,5	0,41	< 0,5	< 0,5
Na	mg/kg	< 0,5	75	46	38	< 0,5
Mg	mg/kg	145	345	275	2965	365
Al	mg/kg	74	10	1342	4752	720
Si	mg/kg	< 0,5	350	920	6140	1075
P	mg/kg	24	165	39	185	175
K	mg/kg	16	11	28	121	26
Ca	mg/kg	6460	< 50	4830	600	7100
Ti	mg/kg	0,40	2,2	30	109	704
V	mg/kg	< 0,25	< 0,25	0,27	2,0	0,095
Cr	mg/kg	< 0,25	2,1	3,0	2,5	4,2
Mn	mg/kg	0,40	0,8	20	109	66
Fe	mg/kg	9,0	77	518	228	50
Ni	mg/kg	< 0,25	0,80	< 0,25	1,2	2,4
Cu	mg/kg	0,96	0,28	2,2	3,7	57
Zn	mg/kg	< 2,5	10,8	42	66	5,5
Sr	mg/kg	14	0,36	8,1	5,5	18
Cd	mg/kg	< 0,25	< 0,25	< 0,25	0,29	0,15
Ba	mg/kg	0,20	< 0,25	9,2	77	7,6
Pb	mg/kg	< 0,25	< 0,25	2,6	0,13	0,13

Die nachfolgenden organischen Stoffe wurden nur an den Pressfilzen P_N, P_G, P_T, P_{P1} untersucht. Für diese untersuchten Proben lagen folgende Parameter unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze:

Alkylphenole und bestimmte Alkylphenolethoxylate (APEO) (< 4,0 mg/kg), Verbotene Azo-Farbstoffe, abspaltbare und bestimmte frei verfügbare Arylamine (< 10 mg/kg) sowie Anilin (< 10 mg/kg), verschiedene Phthalate (< 0,01 %), zinnorganische Verbindungen (< 0,05 mg/kg), freies und teilweise abspaltbares Formaldehyd (< 10 mg/kg), SCCP (C10-C13) und MCCP (C14-C17) (< 0,0025 %), Siloxane (D4, D5 und D6) (< 0,01 %), Konservierungsmittel CIT und MIT (< 0,2 mg/kg) und Glyoxal (< 5 mg/kg).

Für die Proben P_N, P_G und P_T lagen die Ergebnisse für chlorierte Phenole und Bisphenole unter der Bestimmungsgrenze (PCP, TeCP, TrCP, DCP, MCP < 0,01 mg/kg; OPP 2 mg/kg; Bisphenole < 0,2 mg/kg), in P_{P1} konnten jedoch 0,02 mg/kg 4-Chlorphenol, 0,05 mg/kg 2,4,6-Trichlorphenol, 0,05 mg/kg 2,3,4,6-Tetrachlorphenol und 2,11 mg/kg Pentachlorphenol sowie 7,78 mg/kg Bisphenol A und 9,31 mg/kg Bisphenol S nachgewiesen werden.

Phenole werden auf unterschiedliche Weise im Papierherstellungsprozess genutzt (u.a. als Additive bei der Herstellung von Thermopapier, als Tenside im Druckprozess). Pivnenko et al. (2016) fanden Bisphenol A in verschiedenen Fraktionen von Altpapier in Konzentrationen von 0,53 bis 4800 mg/kg. In der Produktionslinie, in der P_{P1} verwendet wurde, werden höhere Anteile an Altpapier eingesetzt. Es liegt nahe, dass der Eintrag von Bisphenol A und Bisphenol S in den Pressfilz durch Altpapier erfolgen.

Die Identifikation der vorliegenden Farbstoffe ergab folgende Ergebnisse: In P_G konnten ein Säurefarbstoff und ein entwickelter Dispersionsfarbstoff nachgewiesen werden. In P_{P1} konnte ebenfalls ein Säurefarbstoff festgestellt werden und in P_T ein Reaktivfarbstoff. Zudem liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Metallkomplexfarbstoff in P_{P1} und P_T vor.

Laut Blechschmidt & Naujock (2010) sind die am häufigsten in der Papierindustrie eingesetzten Farbstoffe Säurefarbstoffe, basische Farbstoffe, Azofarbstoffe und Direktfarbstoffe, wobei je nach Art der erzeugten Papierprodukte unterschiedliche Farbstoffe verbreitet sind. So werden beispielsweise Säurefarbstoffe hauptsächlich bei graphischem Papier und Verpackungspapier eingesetzt. Basische Farbstoffe werden hingegen häufig bei Karton und Verpackungspapier und Azofarbstoffe bei graphischem Papier und Hygienepapier eingesetzt.

Tab. 2: Eluatgehalte der untersuchten Pressfilze

Parameter	Einheit	P _G	P _T	P _{P1}	P _{P2}	P _{P3}
Bromid	mg/kg	< 5,0	18	< 5,0	< 5,0	5,1
Chlorid	mg/kg	< 5,0	40	10	< 5,0	< 5,0
Fluorid	mg/kg	10	< 5,0	< 5,0	< 5,0	5,1
Nitrat	mg/kg	4,0	< 10	< 10	< 10	< 10
o-Phosphat	mg/kg	< 5,0	175	< 5,0	< 5,0	50
Sulfat	mg/kg	< 5,0	85	85	15	46
TIC	mg/kg	149	43	232	90	154
Elektrische Leitfähigkeit	mS/cm	0,13	0,075	0,24	1,4	0,66
pH-Wert	-	7,7	6,8	7,7	7,3	7,5
MBAS	mg/kg	< 1,0	< 1,0	< 1,0	2,0	2,2
Li	mg/kg	< 0,020	< 0,020	0,21	< 0,020	0,031
Na	mg/kg	< 0,5	93	29	5,0	< 0,5
Mg	mg/kg	< 0,5	< 0,5	6,0	< 0,5	< 0,5
Al	mg/kg	1,6	< 0,5	3,2	< 0,5	< 0,5
Si	mg/kg	< 10	< 10	7,0	14	4,5
P	mg/kg	< 10	59	1,3	2,6	30
K	mg/kg	13	11	4,2	15	26
Ca	mg/kg	329	29	529	89	234
Ti	mg/kg	< 0,010	< 0,010	0,0030	< 0,010	0,12
V	mg/kg	< 0,010	< 0,010	0,0060	0,0080	< 0,010
Cr	mg/kg	< 0,010	< 0,010	0,0040	0,0030	< 0,010
Mn	mg/kg	< 0,010	0,43	0,50	1,1	3,9
Fe	mg/kg	< 0,10	< 0,10	1,9	0,11	0,11
Co	mg/kg	< 0,010	< 0,010	0,037	< 0,010	< 0,010
Ni	mg/kg	< 0,010	0,028	0,029	0,051	0,017
Cu	mg/kg	0,018	0,015	0,10	0,22	8,5
Zn	mg/kg	< 0,10	10,8	0,15	< 0,10	0,16
Sr	mg/kg	0,56	0,10	1,0	0,30	2,0
Mo	mg/kg	< 0,010	< 0,010	0,062	0,019	0,041
Ba	mg/kg	0,089	0,049	0,37	0,20	1,5
W	mg/kg	0,0080	< 0,010	0,0010	0,0090	< 0,010
Pb	mg/kg	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	0,050

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Eine eindeutige Identifikation der auf den Pressfilzen vorhandenen chemischen Stoffen auf Basis der durchgeführten Untersuchungen und erhaltenen Ergebnissen ist nicht möglich. In Verbindung mit entsprechenden Informationen aus der Literatur lässt sich auf das Vorhandensein von einigen Stoffen wahrscheinlich schließen (Calciumcarbonat, Bariumsulfat usw.). Aufgrund der Vielzahl von eingesetzten Stoffen im Rahmen des Papierherstellungsprozesses und weil die Art und Menge der verwendeten Stoffe von den Unternehmen im Regelfall nicht preis gegeben werden, ist die Herkunft der in die Pressfilze eingetragenen Elemente und Verbindungen nicht immer nachvollziehbar.

Der vorliegende Beitrag gibt jedoch einen Eindruck der zu erwartenden Elemente und Verbindungen, die insbesondere für eine abfallrechtliche Bewertung sowie den Recyclingprozess von Bedeutung sind.

DANKSAGUNG

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des Projektes „ReFibreValue“ (Bridge 1 no. 895423), gefördert von der FFG, erstellt.

LITERATURVERZEICHNIS

- Amândio, M.S.T., Pereira, J.M., Roocha, J.M.S., Serafim, L.S., Xavier, A.M.R.B. (2022) *Getting Value from Pulp and Paper Industry Wastes: On the Way to Sustainability and Circular Economy*. Energies 2022, 15, 4105.
- ASI (Austrian Standards International) (2016) *ÖNORM EN ISO 16373-1 Textilien — Farbstoffe, Teil 1: Allgemeine Grundlagen der Prüfung farbiger Textilien zur Farbstoff-Identifikation*.
- Austropapier (2017) Papier aus Österreich - Branchenbericht 2016/2017. https://www.advantageaustria.org/zentral/branchen/z_old/holz-und-papier/zahlen-und-fakten/Branchenbericht_Austropapier_2016_2017_DE.pdf (letzter Zugriff: 26.06.2024).
- Austropapier (2023) *Branchenbericht der Österreichischen Papierindustrie 2022*. 20 April 2023.
- Austropapier (2024) *Daten & Fakten rund um Papier & Zellstoff*. Downloadbar unter: <https://austropapier.at/service-presse-daten-fakten-produkte/> (letzter Zugriff: 26.06.2024).
- Blechschmidt, J., Naujock, H.J. (2010) *Taschenbuch der Papiertechnik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. München.
- Dasgupta, S. & Ray, N. (2009) *Designing of Forming Fabric Considering Paper Making Aspects*. IPPTA Journal. Vol. 21, No. 4, Oct.-Dec., 103.
- Håkansson, A.L. (2021) *Paper Machine Press Felt Monitoring – A Case Study on PM2 in Karlsborg*. Master Thesis. Luleå University of Technology.
- Peltomäki, J. (2020) *Life Cycle Assessment of Press Felt and Filtration Products*. Master Thesis. Tampere University.
- Pivnenko, K., Olsson, M. E., Götze, R., Eriksson, E., Astrup, T. F. (2016) *Quantification of chemical contaminants in the paper and board fractions of municipal solid waste*. Waste Management, 51, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.008>.
- SL (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie) (2016) *Branchenbezogene Merkblätter zur Altlastenbehandlung – Altlasten 23: Papier- und zellstoffherstellende Industrie*. Stand 11/2016. Downloadbar unter: https://www.boden.sachsen.de/download/23_PAPIERINDUSTRIE.pdf (letzter Zugriff: 27.06.2024).
- Tischberger-Aldrian, A. & Weber N. (2024) *Umfrage mit österreichischen Papierherstellern im Zeitraum März bis April 2024*. Unveröffentlicht.

KONTAKT

Alexia.tischberger-aldrian@unileoben.ac.at

Podcast mit näheren Infos zum Projekt „ReFibreValue“: <https://www.andritz.com/spectrum-en/spectrum-podcast/season-2-spectrum-podcast/spectrum-podcast-season-2-episode-17>

Abbau von PFAS durch nicht-thermisches Plasma in einem Blasensäulenreaktor

Jan Back¹, Rania Bakry², Johanna Freilinger², Maria Fürhacker³, Sebastian Handl³, Claudia Hledik³, Simon Jabornig⁴, Marc Koch¹, Jana Marx^{1,2}, Madeleine Larch¹, Thomas Obholzer⁵, Maximilian Pupp^{1,5}, Marco Rupprich⁵ & Martin Spruck¹

¹⁾ MCI – Die unternehmerische Hochschule, Department Umwelt-, Verfahrens- & Energietechnik, Innsbruck, Österreich

²⁾ Leopold-Franzens-Universität Innsbruck (LFU), Institut für Analytische Chemie und Radiochemie, Innsbruck, Österreich

³⁾ Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Institut für Siedlungswasserbau, Industriewasserwirtschaft und Gewässerschutz, Wien, Österreich

⁴⁾ SFC Umwelttechnik GmbH, Salzburg, Österreich

⁵⁾ Ixoness GmbH, Innsbruck, Österreich

KURZFASSUNG: Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) sind persistente organische Chemikalien, die zu erheblichen negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt führen. Daher wurden in verschiedenen Richtlinien der EU (Trinkwasserrichtlinie, Vorschlag zur Grundwasserrichtlinie, Vorschlag zur Umweltnormenrichtlinie) Grenzwerte festgelegt. Um diese Grenzwerte einhalten zu können, muss die Freisetzung von PFAS an ihren Punktquellen, d. h. an kontaminierten Standorten und Kläranlagen, kontrolliert werden. Bisher wurden Mikroverunreinigungen und andere Schadstoffe erfolgreich durch erweiterte Oxidationsverfahren wie nicht-thermisches Plasma (NTP) aus verschiedenen Wassermatrizen entfernt. Der Abbau von PFAS ist jedoch aufgrund der extrem stabilen C-F-Bindung eine besondere Herausforderung. In diesem Beitrag wurden im Rahmen des KPC-Projekts PFAS-Trap Abbauversuche der Substanz Perfluoroctansäure (PFOA) mit NTP durchgeführt, wobei eine Reduktion von bis 94 % in 1440 min gemessen wurden. Es wird ein Verfahrenskonzept vorgestellt. Die Rolle des Austrags mit der Plasma-führenden Luft konnte nicht abschließend geklärt werden und bedarf weiterer Untersuchungen.

1 EINLEITUNG

Ewigkeitschemikalien, wie beispielsweise Perfluoroctansäure (PFOA), werden mit einem hohen toxischen Potential für den Menschen assoziiert (Zhu et al., 2024). Dabei spielt speziell die langfristige Persistenz in der Umwelt eine entscheidende Rolle. PFOA und PFSA konnten im Trinkwasser in Konzentrationen im ng/L bis µg/L-Bereich nachgewiesen werden (Wee und Aris, 2023). Aus diesem Grund wurden EU-weite Grenzwerte in der Trink- und Grundwasserrichtlinie eingeführt. Um diese Grenzwerte einhalten zu können, ist der Rückhalt der Chemikalien am Ort der Freisetzung essentiell. Eine mögliche Methode für den Abbau von Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) ist die Anwendung von Plasma. Dabei werden die Verbindungen zu Abbauprodukten degradiert (Singh et al., 2019). Speziell die Anwendung von nicht-thermischem Plasma (NTP) ist eine vielversprechende Technologie, bei der sowohl oxidative, als auch reduzierende Reaktionspfade auftreten. Insbesondere kann NTP in Bezug auf die Energieeffizienz mit anderen erweiterten Oxidationsverfahren (AOP) konkurrieren (Palma et al., 2022). Unterschiedliche Plasmaverfahren zeigten bereits vielversprechende Ergebnisse für die Entfernung von PFOA. Beispielsweise konnten in einem Blasensäulenreaktor Abbauraten von bis zu 90 % für PFOA erzielt werden (Alam et al., 2023). Mit atmosphärischem Plasma konnte PFOA und Perfluorooctansulfonsäure in einem radialen Plasmaentladungsreaktor auf weniger als 1 % der Ausgangskonzentration reduziert werden (Saleem et al., 2022). Durch die Anwendung eines Lichtbogenplasmas konnten für alle langketigen PFAS (>8 perfluorierte Kohlenstoffe) innerhalb einer Stunde Abbauraten von bis zu 90 % und eine Entfluorinierung von bis zu 25 % beobachtet

werden (Lewis et al., 2020). In dieser Studie wurde der Abbau von 1 mg/L PFOA mittels in Umgebungsluft extern generiertem NTP in einem Blasensäulenreaktor durchgeführt.

2 MATERIALIEN UND METHODEN

Für den Abbau mittels NTP wird eine Versuchsanlage bestehend aus einem 10 L Vorlagebehälter (Feed), einem Blasensäulenreaktor und einer NTP-Einheit verwendet, wie in Abbildung 1 dargestellt. Der Feed mit einer Ausgangskonzentration c_0 von 1 mg/L wird mit einem Volumenstrom von 5 L/min im Kreis gepumpt, woraus sich eine Verweilzeit von 1 min für PFOA in dem 5 L-Reaktor ergibt. Die Probenahme des rezirkulierten Feeds erfolgt über einen Kugelhahn direkt vor dem Feedbehälter. Während der ersten 30 min wird der Feed ohne Belüftung betrieben, um ein Gleichgewicht im System einzustellen. Anschließend wird der Reaktor für 240 min mit reiner Luft betrieben, bevor der Plasma-Generator eingeschaltet wird und nun die reaktive Luft den Reaktor für 1440 min durchströmt. Dabei wird ein Diffusor mit einem Luftvolumenstrom von 40 L/min und eine Ionisierung mittels dielektrischer Barriere-Entladung bei 40 W verwendet. Die Abluft des Reaktors wird in die Atmosphäre entlassen.

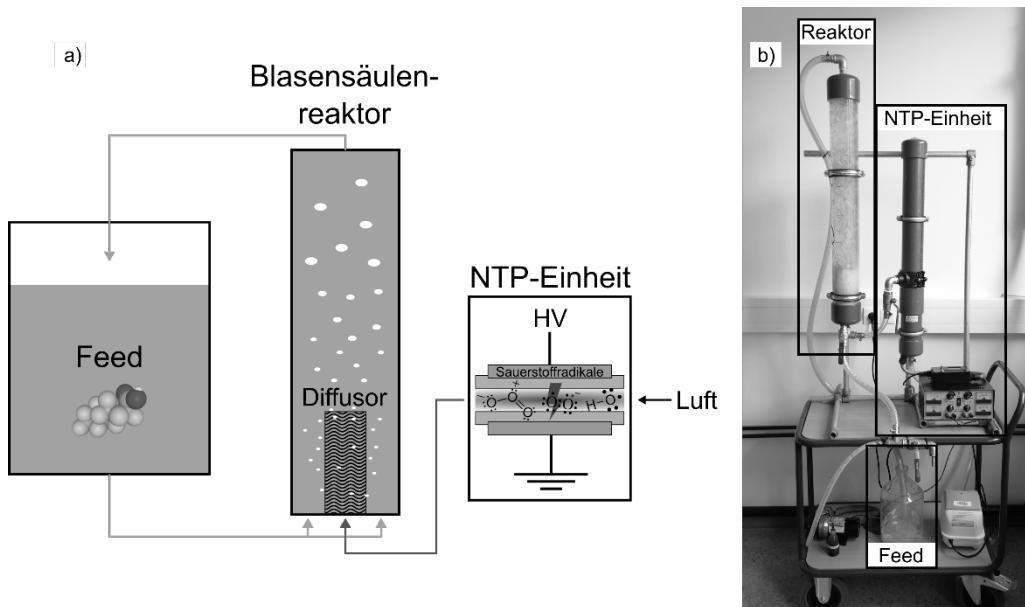


Abb. 1: Versuchsschema und Versuchsaufbau des PFAS-Abbaus mittels NTP

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

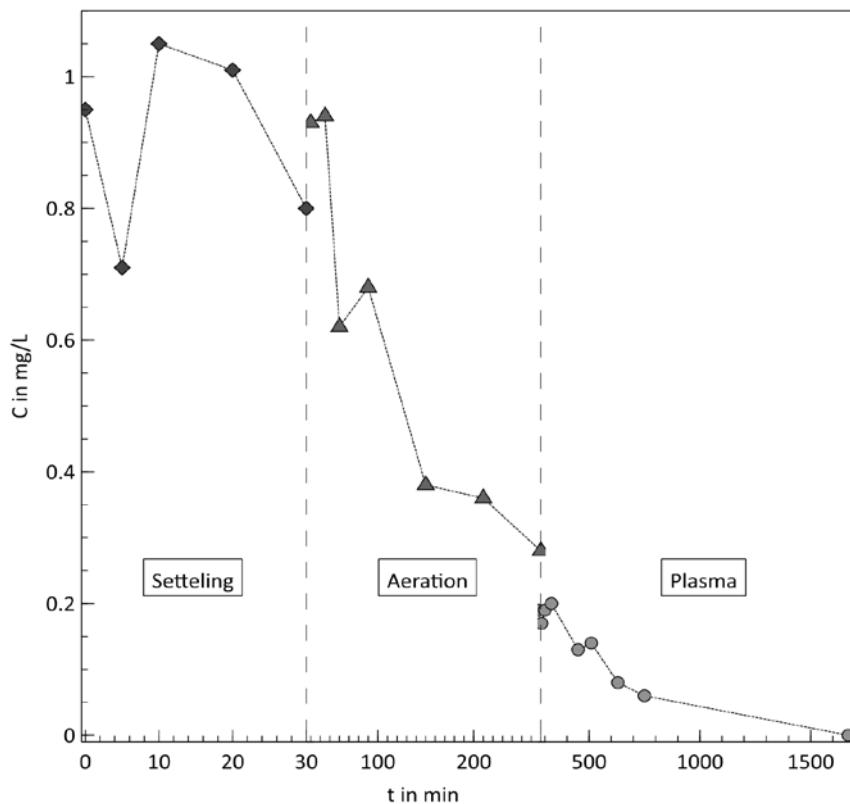


Abb. 2: Konzentrations-Zeit-Profil von Perfluoroctansäure (PFOA) im Blasensäulenreaktor während 30 min Setteling, 240 min Belüftung und 1440 min Behandlung mit NTP. (Luft Volumenstrom $\dot{V} = 40$ L/h, Ausgangskonzentration $c_0 = 1$ mg/L und Verweilzeit im Blasensäulenreaktor $t = 1$ min)

Der Abbau von PFOA über den Verlauf von 1670 min (Abbildung 2) zeigt zunächst eine Stabilisierung der Konzentrationen während der ersten 30 min. Die reine Belüftung des Reaktors zeigte eine Reduktion der Konzentration in Bezug auf die Anfangskonzentration von 72 %. Das Plasma steigerte diesen Abbau auf 94 %. Trotz der Reduktion durch das verwendete Plasma wurde der größte Anteil an PFOA durch die Belüftung der Anlage möglicherweise ausgetragen. Vorversuche mit diesem Prozess resultierten in Abbauraten von Methylenblau von ≥ 99 % innerhalb von 16 min. Um ähnliche Ergebnisse für persistente Stoffe wie PFOA zu erreichen, muss versucht werden, den Austrag durch die Belüftung des Reaktors zu reduzieren. Die Ergebnisse zeigen die Komplexität und Herausforderungen, die die Entfernung von PFAS aus aquatischen Systemen mit sich bringen.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Der Abbau von PFOA mittels NTP zeigt, dass speziell die Belüftung des Reaktors eine entscheidende Rolle in der Reduktion der Konzentration spielt. Dennoch konnte mithilfe des dispergierten NTP eine Verringerung der Konzentration von bis zu 94 % über 24 h erzielt werden. Der Abbau der Ewigkeitschemikalien stellt die Verfahrenstechnik vor Herausforderungen, die durch die Optimierung des Verfahrens speziell in Bezug auf die Belüftung des Reaktors weiter untersucht werden sollen.

LITERATURVERZEICHNIS

- Alam, David; Lee, Samuela; Hong, Jungmi; Fletcher, David F.; McClure, Dale; Cook, David et al. (2023): Experimental investigations of Per- and Poly-fluoroalkyl substances (PFAS) degradation by non-thermal plasma in aqueous solutions. In: *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11 (6), S. 111588. DOI: 10.1016/j.jece.2023.111588.
- Lewis, Asa J.; Joyce, Thomas; Hadaya, Maher; Ebrahimi, Farshad; Dragiev, Ivan; Giardet-ti, Nickolas et al. (2020): Rapid degradation of PFAS in aqueous solutions by reverse vor-tex flow gliding arc plasma. In: *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 6 (4), S. 1044–1057. DOI: 10.1039/C9EW01050E.
- Palma, Davide; Richard, Claire; Minella, Marco (2022): State of the art and perspectives about non-thermal plasma applications for the removal of PFAS in water. In: *Chemical Engineering Journal Advances* 10, S. 100253. DOI: 10.1016/j.cej.2022.100253.
- Saleem, Mubbshir; Tomei, Giulia; Beria, Matteo; Marotta, Ester; Paradisi, Cristina (2022): Highly efficient degradation of PFAS and other surfactants in water with atmospheric RA-dial plasma (RAP) discharge. In: *Chemosphere* 307 (Pt 2), S. 135800. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135800.
- Singh, Raj Kamal; Fernando, Sujan; Baygi, Sadjad Fakouri; Multari, Nicholas; Thagard, Selma Mededovic; Holsen, Thomas M. (2019): Breakdown Products from Perfluorinated Alkyl Substances (PFAS) Degradation in a Plasma-Based Water Treatment Process. In: *Environmental science & technology* 53 (5), S. 2731–2738. DOI: 10.1021/acs.est.8b07031.
- Wee, Sze Yee; Aris, Ahmad Zaharin (2023): Environmental impacts, exposure pathways, and health effects of PFOA and PFOS. In: *Ecotoxicology and environmental safety* 267, S. 115663. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2023.115663.
- Zhu, Xu; Li, Hui; Luo, Yu; Li, Yu; Zhang, Jin; Wang, Zhenyu et al. (2024): Evaluation and prediction of anthropogenic impacts on long-term multimedia fate and health risks of PFOS and PFOA in the Elbe River Basin. In: *Water research* 257, S. 121675. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121675.

KONTAKT

Dr. Jan Back
jan.back@mci.edu

Department of Environmental, Process & Energy Engineering
MCI – The Entrepreneurial School

Stilllegung und Rekultivierung von Deponien mit geringem Gefährdungspotential im Land Brandenburg

Ulrich Stock¹ & Roman Dinslage²

¹⁾ ehem. Landesamt für Umwelt Brandenburg, Abteilung Technischer Umweltschutz, Potsdam, Deutschland

²⁾ intecus GmbH Ingenieurgesellschaft für technischen Umweltschutz, Potsdam, Deutschland

KURZFASSUNG: Laut Auskunft der Europäischen Kommission [1] befinden sich im EU-Territorium bis zu 500.000 Abfalldeponien. Eine Strategie zum Umgang mit diesen Deponien hat die Kommission nicht. Auch Brandenburg stand nach 1991 vor der Frage, wie mit den etwa 3000 betriebenen und 2000 stillgelegten Deponien umzugehen war.

Der Vortrag schildert den dabei beschrittenen Weg. Es mussten Lösungen gefunden werden, wie in kurzer Zeit mit einfachen Mitteln eine Vielzahl von Deponien mit meist geringem Gefährdungspotentials gesichert werden konnten. Im Vortrag werden die angewandte Methodik sowie Ausführungsbeispiele beschrieben.

Das Problem der vielen kleinen Abfalldeponien spielt auch in den Abfallwirtschaften anderer Mitgliedstaaten der EU eine große Rolle.

1 EINLEITUNG

Im Rahmen einer umfassenden Erhebung in den Jahren 1992/93 wurden in Brandenburg 5193 Ablagerungsstandorten erfasst. Bis zur politischen Wende verfügte fast jede Gemeinde über eine Deponie. Diese wurden von den Gemeindeämtern verwaltet, weshalb diese Deponien als „Bürgermeisterdeponien“ bezeichnet wurden.

Das Brandenburger Umweltministeriums legte schon 1991 diejenigen Deponien fest, die für die weitere Abfallablagerung genutzt, dafür ertüchtigt und auf den Stand der Technik gebracht werden sollten und verfügte die Betriebseinstellung aller anderen Deponien. Damit erhob sich die Frage, was mit den Tausenden stillgelegter bzw. stillzulegender Deponien geschehen soll.

2 BEWERTUNG DES GEFÄHRDUNGSPOTENTIALS

In den Jahren 1992/93 wurden hunderte Gefährdungsabschätzungen für Deponien erarbeitet. Vorgaben existierten nicht, das Untersuchungsprogramm richtete sich meist nach den zur Verfügung stehenden Mitteln. Trotz großer Unterschiede bei den Untersuchungsprogrammen ergab sich ziemlich schnell ein einheitliches Bild: Das Gefährdungspotential der kleinen Deponien im ländlichen Raum ist gering.

Trotzdem war es aus 2 Gründen notwendig, die Sicherung und Rekultivierung dieser Deponien in Angriff zu nehmen:

- Unterbindung des weiteren Betriebs dieser Deponien
- Wiedereinordnung der für die Abfallablagerung genutzten Flächen in die Landschaft.

3 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN, GRUNDSÄTZLICHE VORGEHENSWEISE

Vorgaben für die Sicherung und Rekultivierung der Bürgermeisterdeponien, auf die das Landesumweltamt Brandenburg (LUA, heute: Landesamt für Umwelt LfU) hätte zurückgreifen können, gab es nicht. Die Anwendung der Vorgaben der Technischen Anleitung (TA) Abfall (1990) oder der TA Siedlungsabfall (1993), die sich am Stand der Technik für große Deponien orientierten, hätte zu vollkommen unangemessenen Ergebnissen geführt.

Die Deponieverordnung (2009) schließt Deponien, deren Ablagerungsbetrieb vor dem 01. Januar 1997 beendet wurden, aus dem Geltungsbereich aus (§ 1 Abs. 3 Nr. 3 DepV) [4]. Die Vorschriften zu Oberflächenabdichtungen müssen daher nicht verpflichtend angewendet werden. In einer Richtlinie [5] hat das LUA Kategorien unterschiedlichen Gefährdungspotentials definiert und für jede Kategorie Mindestanforderungen an die Sicherung und Rekultivierung festgelegt. Die jeweilige Deponie ist nach Prüfung im Einzelfall einer bestimmten Kategorie zuzuordnen und es sind konkrete Anforderungen an die Sicherungsmaßnahmen abzuleiten.

Beim Vorhandensein einer Gefährdungsabschätzung kann die Zuordnung zu einer der Kategorien auf der Basis der Gefährdungsabschätzung erfolgen.

Auf der Grundlage dieser Richtlinie hat das LUA bis zum Jahresende 1997 mehrere hundert Stilllegungsanordnungen gegenüber den Gemeinden als Deponieinhaber erlassen. Seit 1998 liegt die Zuständigkeit für die Bürgermeisterdeponien bei den Unteren Abfallwirtschaftsbehörden der Landkreise.

4 KATEGORISIERUNG UND ABLEITUNG DER MASSNAHMEN

4.1 Kategorisierung

Bei der Bewertung und Zuordnung sind folgende Kriterien maßgeblich zu beachten:

- abgelagertes Abfallvolumen,
- Deponieinhalt: Art und Teilmengen der abgelagerten Stoffe,
- geologische und hydrogeologische Verhältnisse im Deponiebereich und deren Umfeld:
 - * Lage des Grundwasserspiegels in Bezug auf den Deponiekörper,
 - * Geschütztheitsgrad des/der Grundwasserleiter
- Lage zu Trinkwasserschutzgebieten,

Folgende Kriterien können außerdem für die Kategorisierung herangezogen werden:

- Geometrie (Aufhaldung oder Verfüllung, flache Ablagerung),
- Lage hinsichtlich sensibler Nutzungen
- Lage zu sonstigen Schutzgebieten: Landschaftsschutzgebiete, Naturschutzgebiete, geplante Nachnutzung (einschl. der unmittelbaren Deponieumgebung).

Es werden die Kategorien A1, A2, B1 und B2 unterschieden.

Deponien mit geringem Gefährdungspotential werden der Kategorie A, Deponien mit höherem bzw. hohem Gefährdungspotential der Kategorie B zugeordnet (siehe Tabellen 3 und 4).

Tab. 1: Zuordnung zu den Kategorien A1 und A2

A1	
Art der abgelagerten Abfälle	Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, unkontaminiertes Bau- schutt
Nutzung	Sensible Nutzungen werden nicht betroffen
Deponievolumen	< 25.000 m ³
Lage zu Trinkwasserschutzzonen (TWSZ)	Außerhalb von TWSZ oder innerhalb von TWSZ 2023/3
Grundwasserleiter	Geschützt oder ungeschützt
A2	
Art der abgelagerten Abfälle	Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, unkontaminiertes Bau- schutt
Nutzung	Sensible Nutzungen werden nicht betroffen
Deponievolumen	25.000 m ³ – 150.000 m ³
Lage zu Trinkwasserschutzzonen (TWSZ)	außerhalb von TWSZ oder innerhalb von TWSZ II oder TWSZ III/1
Grundwasserleiter	Innerhalb von TWSZ III/2 geschützt oder ungeschützt ausreichend geschützt

Tab. 2: Zuordnung zu den Kategorien B1 und B2

	B1
Art der abgelagerten Abfälle	Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Bauschutt, keine Abfälle mit hohem Schadstoffpotential
Deponievolumen	80.000/150.000 m ³ /150.000 m ³ – 500.000 m ³
Lage zu Trinkwasserschutzonen (TWSZ)	außerhalb von TWSZ oder innerhalb von TWSZ II oder TWSZ Innerhalb von TWSZ III/2 III/1
Grundwasserleiter	geschützt oder ungeschützt ausreichend geschützt
	B2
Art der abgelagerten Abfälle	Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Bauschutt, Anteile von Abfällen mit hohem Schadstoffpotential
Deponievolumen	> 500.000 m ³
Lage zu Trinkwasserschutzonen	innerhalb von TWSZ II oder TWSZ III/1 gleichgültig
Grundwasserleiter	ungeschützt Deponiebasis im Grundwasser Überschwemmungsgebiet

Die für die Kategorisierung der Deponien benötigten Angaben können aus vorliegenden Unterlagen (Betriebstagebücher, Karten, sonstige Aufzeichnungen) unter Nutzung der Kenntnisse des für den Betrieb zuständigen Personals oder – wenn vorhanden – aus den Ergebnissen einer Gefährdungsabschätzung abgeleitet werden.

Die Erarbeitung von Gefährdungsabschätzungen ist immer geboten bei

- Deponievolumina > 150.000 m³
- Hinweisen auf die Ablagerung gefährlicher Abfälle mit wassergefährdenden Inhaltstoffen.

Es können von der Kategorisierung abweichende Maßnahmen zur Sicherung und Rekultivierung festgelegt werden, wenn die Ergebnisse einer Gefährdungsabschätzung dies rechtfertigen (z.B. bei der Kombination großes Deponievolumen – ungefährliche Abfälle)

4.2 Maßnahmen zur Sicherung und Rekultivierung der Deponien

4.2.1 Kategorien A1, A2

Der geordnete Abschluss kann durch einfache Sicherungsmaßnahmen erfolgen, die im Wesentlichen die Rekultivierung des Geländes zum Ziele haben.

Unter „einfachen Sicherungsmaßnahmen“ sind zu verstehen:

1. oberflächiges Absammeln von Schrott und Sperrmüll, der einer zugelassenen Entsorgungsanlage zuzuführen ist,
2. einfache Profilierung des Deponiekörpers und Herstellung eines Planums und/oder
3. Aufbringen einer Profilierungs- bzw. Ausgleichsschicht,

Nach der Profilierung soll der Deponiekörper ein leicht geneigtes Oberflächenprofil aufweisen. Es dürfen keine Mulden vorhanden sein, in denen sich Oberflächenwasser sammeln kann.

Die Oberfläche ist bei Ablagerungen der Kategorie A2 so zu profilieren, dass sie ein Gefälle von mindestens 5 % zum Rand aufweist. Böschungen dürfen nicht steiler als 1:3 sein.

Für die Herstellung der Profilierungs- bzw. Ausgleichsschicht kann nichtbindiger Erdaushub oder unbelasteter Bauschutt verwendet werden.

Die für die Durchführung der Sicherungsmaßnahmen Verantwortlichen und die zuständigen Behörden haben sicherzustellen bzw. zu kontrollieren, dass nur unkontaminiertes Erdaushub, Bauschutt und Mutterboden o.ä. verwendet werden.

4. Aufschüttung einer wenigstens 50 cm mächtigen kulturfähigen Schicht und Grasansaat oder Bepflanzung mit z.B. Strauchwerk oder anderen Flachwurzlern,

5. Installation von Grundwasserüberwachungspegel (nur bei Anlagen der Kategorie A2).

Es ist gegebenenfalls durch Entwässerungsgräben am Fuß des Deponiekörpers sicherzustellen, dass bei Starkregen abfließendes Wasser benachbarte Flächen nicht überflutet.

Die Installation von Grundwasserüberwachungspegeln für nachfolgende, längerfristige Grundwasserüberwachungsmaßnahmen ist nach Art und Umfang entsprechend den standortspezifischen Erfordernissen zu konzipieren und durchzuführen.

4.2.2 Kategorien B1, B2

In Brandenburg sind Deponien der Kategorie B typisch für Kleinstädte, größere Gemeinden oder Gemeindeverbände. Deponien der Kategorie B1 sollen im Unterschied zu solchen der Kategorie A eine Oberflächenabdichtung mit einem dichtenden Element erhalten. Dieses dichtende Element kann eine mineralische Dichtungsschicht, eine überlappend verlegte Kunststoffdichtungsbahn oder ein sonstiges Dichtungselement, vorzugsweise ein solches, welches Gegenstand eines Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards ist, sein.

Folgende Sicherungsmaßnahmen sind auszuführen:

1. oberflächiges Absammeln von Schrott und Sperrmüll
2. Profilierung einschließlich Böschungs- und Randgestaltung

Die Oberfläche der Deponie ist so zu profilieren, dass sie nach Abklingen der Setzungen ein Gefälle von mindestens 5 % zum Rand aufweist. Die Profilierung kann durch Aufschüttung von Bauschutt oder Erdaushub oder durch Umlagerung des Mülls erfolgen.

Falls erforderlich, sind die Böschungen so abzuflachen, dass die Standsicherheit des Deponiekörpers gewährleistet ist und Erdarbeiten auf den Böschungen durchgeführt werden können (in der Regel Neigungen nicht größer als 1:3).

3. Oberflächenabdichtungssystem

Bei Aufbringung einer mineralischen Dichtungsschicht haben sich folgende Anforderung an den Durchlässigkeitsbeiwert herauskristallisiert: im Mittel $5 \cdot 10^{-8}$ m/s bis $5 \cdot 10^{-9}$ m/s, zulässige Gesamt-Schwankung um den Mittelwert: eine Zehnerpotenz.

Ein Eignungsnachweis ist zu erbringen.

Die letzte Schicht unterhalb der Dichtung muss als gaswegssame Schicht ausgebildet sein, entweder durch entsprechende Auswahl des Profilierungsmaterials oder Aufbringung einer gaswegsamen Ausgleichsschicht.

Die Dränage des auf der Dichtung aufgestauten Wassers muss sichergestellt sein. Es ist eine Rekultivierungsschicht aufzubringen, deren Mächtigkeit und Beschaffenheit Frostsicherheit der Dichtung und Begrünung der Deponie ermöglicht.

Die Dichtung ist vor mechanischer Beschädigung und/oder Erosion zu schützen.

4. Fassung und Ableitung des Oberflächenwassers

Oberflächenwasser ist schadlos abzuführen. Dazu sind geeignete Entwässerungselemente vorzusehen. Über die Dimensionierung ist ein Nachweis zu führen. Die Ableitung oder Versickerung hat so zu erfolgen, dass ein seitliches Eindringen von Oberflächenwasser in den Deponiekörper ausgeschlossen ist.

Deponien, die der Kategorie B2 zugeordnet werden müssen, sind nach den Vorgaben der geltenden Rechtsnorm für die Sicherung der Deponiekategorie II stillzulegen. Zum Zeitpunkt der Herausgabe der Richtlinie war geltende Rechtsnorm die Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASie), seit 2009 ist es die Deponieverordnung (DepV).

5 FALLBEISPIELE

5.1 Deponie Paaren (Landkreis Havelland)

Die Deponie Paaren nimmt eine Fläche von ca. 1,6 ha ein, auf der ca. 50.000 m³ Siedlungsabfälle und Bauschutt abgelagert wurden. Der Deponiebetrieb wurde 1991 eingestellt. Die Bewertung des Gefährdungspotentials führte zur Einstufung in die Kategorie A.

Die Oberfläche der Deponie wurde von Schrott beräumt. Böschungen wurden zurückgebaut und eine Umprofilierung auf eine Böschungsneigung von 1 : 3 vorgenommen. Anschließend wurde das Plateau der Deponie profiliert und die Rekultivierungsschicht aufgebracht. Je 2.000 m³ des angelieferten Materials wurde eine Mischprobe entnommen und auf die Einhaltung der zulässigen Schadstoffbelastung untersucht.

Bei dem für die Profilierung eingesetzten Material handelte es sich um unbelasteten Erdaushub, der bei einer Baumaßnahme des Unternehmens in der Nähe der Deponie anfiel. Insgesamt kamen für Profilierung und Rekultivierungsschicht 30.000 m³ Erdstoffe zum Einsatz.

Finanziert wurde die Maßnahme einschließlich Grundstücksankauf, Ingenieurleistungen und Qualitätsüberwachung durch das ausführende Bauunternehmen. Es setzte dafür die Mittel ein, die es für die Entsorgung des auf der Deponie verwerteten Erdaushubs hätte aufwenden müssen. Die Kosten für die 1996 ausgeführte Deponiesicherung betrugen 150.000 DM.

5.2 Deponie Klausdorf (Landkreis Teltow-Fläming)

Die Deponie Klausdorf wurde seit den frühen 60er Jahren des 20. Jahrhunderts bis zum 1. Juli 1991 betrieben. Auf einer Fläche von 4,5 ha wurden 420.000 m³ Abfall abgelagert, zur Ablagerung kamen Hausmüll, Bauschutt, Asche und Schrott sowie Aushubmassen aus einem Tontagebau. Es liegen keine Informationen über die Ablagerung gefährlicher Abfälle vor.

Der obere, lokal ausgebildete Grundwasserleiter ist durch die Deponie beeinflusst. Der Hauptgrundwasserleiter ist durch eine etwa 20 m mächtige bindige Schicht geschützt, zwischen beiden Grundwasserleitern besteht keine Verbindung. Die Deponie liegt außerhalb von Trinkwasserschutzzonen. Deponiegas wurde nicht festgestellt.

Eine Gefährdungsabschätzung wurde angefertigt. Dazu wurden 25 Rammkernsondierungen zur Erkundung der geologischen Verhältnisse abgeteuft und 5 Grundwasserbeobachtungsstellen installiert. 2 wurden später für die Grundwasserndauerbeobachtung ausgebaut.

Auf der Basis der beschriebenen Richtlinie hätte die Deponie wegen des relativ großen Deponievolumens in die Kategorie B1 eingestuft werden müssen. Die Gefährdungsabschätzung begleit jedoch, dass die Deponie nur über ein geringes Gefährdungspotential verfügt, so dass das LUA die Deponie letztendlich als A2-Deponie bewertete. Hauptargument war der hohe Geschütztheitsgrad des Hauptgrundwasserleiters.

Es wurden folgende Maßnahmen ausgeführt:

- Entfernung von Schrott und Sperrmüll von der Deponieoberfläche
- Profilierung des Deponiekörpers mit dem Ziel einer Mindestneigung von 5°. Letztendlich hatten die Hänge Neigungen von 1:12 bis 1:5.).
- Anlegen eines die Deponie umlaufenden Entwässerungsgraben zur gefahrlosen Ableitung von Oberflächenwasser
- Aufbringen einer Rekultivierungsschicht, bestehend aus 50 cm rekultivierungsfähigem Boden. Maßstab für die Festlegung der zulässigen Schadstoffbelastung war die Belastung benachbarter Böden.

Es wurden für die Profilierung und Rekultivierung 160.000 m³ Profilierungsmaterial und 25.000 m³ Bodenmaterial eingesetzt [8]. Die Baumaßnahmen wurden in den Jahren 1996/97 ausgeführt. Angaben zu den Kosten liegen dem Autor nicht vor.

5.3 Deponie Langer Rücken (Landkreis Dahme-Spreewald)

Die Deponie Langer Rücken wurde von 1920 bis 1978 von der Stadt Lübben betrieben. Auf einer Fläche von 3,4 ha wurden 210.000 m³ Siedlungsabfälle und Bauschutt abgelagert.

Der Deponiekörper steht auf einem geringmächtigen, unbedeckten Grundwasserleiter, wobei die Aufstandsfläche wattenförmig ausgebildet ist. Unterhalb befindet sich eine stauende Schicht. Schadstoffe können daher sowohl durch Niederschlagswasser, das den Deponiekörper über die Oberfläche durchströmt, als auch durch seitlich aus dem unbedeckten Grundwasserleiter zuströmendes Wasser ausgetragen werden. Grundwasserbeobachtungen weisen eine stetige, deponiebürtige Grundwasserbelastung nach. Die Stadt Lübben und der Landkreis Dahme-Spreewald schlossen daher 2016 zunächst einen öffentlich-rechtlichen Vertrag und 2018 eine Sanierungsvereinbarung auf der Grundlage des Bundes-Bodenschutzgesetzes ab, die die Sicherung der Deponie beinhalteten.

Die Sicherung erfolgt durch Aufbringung mehrerer Schichten, bestehend aus Boden-Bauschuttgemischen oder nur Boden mit jeweils definierten Anforderungen.

- Grobprofilierungsschicht aus einem Boden-Bauschuttgemisch (Bauschuttanteil maximal 50 %), zur Erzeugung der zur Oberflächenwasserleitung notwendigen Gefälleverhältnisse
- Dichtungsschicht aus einem Lehm-Bauschuttgemisch, 0,5 m mächtig, Durchlässigkeit des Lehms $k < 1 \cdot 10^{-8}$ m/s, verdichtet eingebaut
- Feinprofilierungsschicht aus Boden, 0,5 m mächtig, soll auch Dränfunktion erfüllen mit einer Durchlässigkeit $k > 1 \cdot 10^{-6}$ m/s
- Rekultivierungsschicht aus Mutterboden oder anderem kulturfähigem Boden, 0,25 m mächtig.

Oberflächenwasser wird in einem umlaufenden Gerinne gefasst und über eine Leitung dem Kanalsystem der Stadt Lübben zugeführt. Zur Verhinderung der seitlichen Durchströmung des Deponiekörpers wird im Anstrom der Deponie unterhalb des Gerinnes eine 30 cm breiter Graben ausgehoben, der bis in die Stauerschichten einbindet (2 bis 3 m tief), mit Lehm wieder verfüllt und auf diese Weise eine kleine Dichtwand errichtet.

Das Schichtensystem erfüllt nicht die klassischen Anforderungen einer Oberflächenabdichtung nach Deponieverordnung, das Wasserrückhaltevermögen dürfte deutlich geringer sein. Es stellt aber eine wirksame, dem Gefährdungspotential, den Standortverhältnissen und den Möglichkeiten des Deponieinhabers angepasste Lösung dar. Nach Auskunft der Unteren Bodenschutzbehörde sind die Grundwasserbelastungen spürbar zurückgegangen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Official answer of the EC 28-7-2015, First Seminar about Enhanced landfill mining, 20. October 2015, European parliament, abrufbar von der Internet-Seite www.eurelco.org
- [4] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) vom 27.04.2009, geändert durch Artikel 3 der Verordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598)
- [5] Richtlinie für die Sicherung und Rekultivierung von Deponien mit geringem Gefährdungspotential, Landesumweltamt Brandenburg, 1994 (unveröffentlicht)
- [4] Stock, U. (2023) Stilllegung und Rekultivierung von Deponien mit geringem Gefährdungspotential im ländlichen Raum, 19. Kreislaufwirtschafts- und Deponeworkshop, Zittau

KONTAKT

Dr. Ulrich Stock

Ulrichstock.tus@freenet.de, 0049-151-18717382

Ehemals Abteilungsleiter für Technischen Umweltschutz, Landesamt für Umwelt Brandenburg

Geruchsverbesserung von PCR-Rezyklat

Peter Clemenz¹, Martin Sturm¹ & Maria Schäfer

¹⁾ Hochschule Zittau/Görlitz, ZIRKON, Zittau, Deutschland

KURZFASSUNG: In den letzten 20 Jahren hat sich in der Bundesrepublik Deutschland das Aufkommen an Post-Consumer-Verpackungsabfällen aus Kunststoff verdoppelt. Mit dem Green Deal fordert die EU bis zum Jahr 2030, dass 55 % dieser Verpackungsabfälle recycelt werden. Zusätzlich plant die Europäische Union mit neuen Regelungen für Verpackungen (PPWR) ab 2030 auch für kontakt sensible Verpackungen, also insbesondere für Lebensmittelverpackungen, einen Rezyklatanteil von 30%. Die dazu erforderliche Qualität der Regranulate ist nicht gegeben und gegenwärtig allenfalls mittels chemischen Recyclings zu erreichen. Die Regranulate aus dem mechanischen Recycling von Post-Consumer-Kunststoffverpackungen sind nicht sortenrein, haben einen unangenehmen Geruch und sind am Ende oft teurer als qualitativ hochwertige Neuware. Im Rahmen dieses Projektes werden verschiedene Ansätze zur Verbesserung des Geruchs von PCR-Rezyklat im Labormaßstab erprobt. Als Aufgabematerial dient dabei reales Regranulat aus der Aufbereitung von Post-Consumer-Kunststoffverpackungen. Es erfolgt ein Vergleich zwischen thermischer Behandlung, Soxhletextraktion und der Zugabe von Additiven. Die Bewertung der Proben basiert auf sensorischen Prüfungen und GC-MS-Analysen. Die besten Ergebnisse konnten durch thermische Nachbehandlung des Regranulates erreicht werden. Durch Thermodesorption von geruchsaktiven Substanzen verbesserte sich der Geruch des Materials von „stark störend“ zu „wahrnehmbar, aber noch nicht störend“. Durch die Behandlung mit Lösemitteln und die Zugabe von Additiven, konnten unter größerem Aufwand keine besseren Resultate erreicht werden.

1 AUSGANGSSITUATION

Das stetig steigende Aufkommen von Post-Consumer-Verpackungsabfällen stellt die Recyclingwirtschaft vor dem Hintergrund der seitens der EU geforderten Wiederverwertungsquoten vor erhebliche Herausforderungen. Im Jahr 2021 wurden in der Bundesrepublik Deutschland 3,3 Mio. Tonnen an Kunststoffverpackungen im Abfall registriert, mehr als doppelt so viel wie noch 20 Jahre zuvor (Umweltbundesamt 2024). Um diese erdrückenden Mengen an Plastikmüll im Sinne der angestrebten Kreislaufwirtschaft zu recyceln, ist neben den hohen Anforderungen an die stoffliche Reinheit der Sortierfraktionen insbesondere das Geruchsprofil der Regranulate von großer Bedeutung. Denn oft verhindern unangenehme Störgerüche einen akzeptablen Einsatz des Materials. Die Ursachen für den unangenehmen Geruch der Rezyklate sind vielfältig und haben ihren Ursprung insbesondere in Rückständen aus Nahrungsmitteln, Kosmetika oder Reinigungsmitteln sowie deren mikrobiellen Abbauprodukten. Außerdem können verbliebene Holz- und Papieranhäufungen sowie Druckerfarben während der thermischen Beanspruchung des Materials bei der Extrusion und Regranulierung zu Störgerüchen führen (Tanja Fell 2020). So vielfältig die Ursachen, so einfach die Konsequenz. Wenn das Regranulat am Ende stinkt, will es keiner haben.

Im Internet werben die Betreiber von Recyclinganlagen zur Aufbereitung von Post-Consumer-Kunststoffabfällen mit qualitativ hochwertigen und nachhaltigen Rezyklaten. Doch die Realität ist gegenwärtig eine andere. Denn das mechanische Recycling von stark verunreinigten, gemischten Kunststoffabfällen erfordert eine Vielzahl von ressourcenintensiven Aufbereitungsschritten, das Material erreicht jedoch nicht die Qualität von Neuware. Meist handelt es sich bei dem erzeugten Regranulat um gemischte Polyolefinfraktionen, deren Anteil im Material auch wesentlich vom Anteil in der Aufgabe abhängt. Die nachfolgende Abb. 1 zeigt die Ergebnisse der qualitativen Analyse mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) von 3 dieser aktuell auf dem deutschen Markt erhältlichen Regranulate.

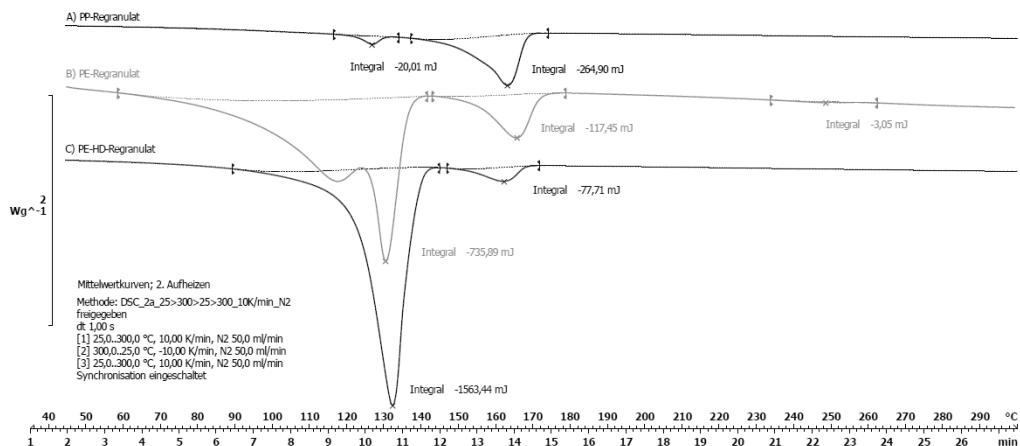


Abb. 1: Qualitative Analyse verschiedener Rezyklate mittels dynamischer Differenzkalorimetrie

Die Regranulate A und C sind hinsichtlich der stofflichen Reinheit vergleichsweise hochwertig. Bei A handelt es sich um Polypropylen (PP) mit einem geringen Anteil Polyethylen hoher Dichte (PE-HD), C besteht hingegen überwiegend aus PE-HD mit einem geringen Anteil PP. Regranulat B, bestehend aus einem PE-Gemisch, PP und einem geringen Anteil Polyamid (PA) oder Polyethylenterephthalat (PET), schneidet am schlechtesten ab. Insbesondere Verunreinigungen mit höherschmelzenden Polymeren im Polyolefin PCR bereiten Probleme bei der Extrusion des Materials. Die Einsatzmöglichkeiten dieser Rezyklate hängen neben den produktsspezifischen Anforderungen insbesondere von den rheologischen Eigenschaften während der Verarbeitung ab. Gegenwärtig ist beim Einsatz derartiger Rezyklate aufgrund der auch schwankenden Qualität des Materials noch immer von einem Down-Cycling auszugehen. Hinzu kommt, dass PCR-Rezyklate, wie eingangs bereits erwähnt, oft einen sehr unangenehmen Geruch aufweisen. Die sensorische Bewertung der untersuchten Regranulate erfolgt nach der vom Verband der deutschen Automobilindustrie formulierten Norm VDA 270, welche Vorgaben zur Beurteilung des Geruchsverhaltens von verschiedenen Werkstoffen des Fahrzeuginnenraums unter Temperatur- und Klimaeinwirkung gibt. Entsprechend geschultes Personal bewertet den Geruch einer Probe anhand der in Tab. 1 dargestellten Notenskala.

Tab. 1: Bewertungsskala bei sensorischer Prüfung nach VDA 270

Note 1	Nicht wahrnehmbar
Note 2	Wahrnehmbar, nicht störend
Note 3	Deutlich wahrnehmbar, aber noch nicht störend
Note 4	Störend
Note 5	Stark störend
Note 6	Unerträglich

Die entsprechende Prüfung der Regranulate kommt zu den folgenden in Tab. 2 aufgeführten Ergebnissen.

Tab. 2: Sensorische Bewertung der Regranulate nach VDA 270 A2

Regranulat A	Note 4,5
Regranulat B	Note 5,0
Regranulat C	Note 4,5

Damit weisen alle 3 untersuchten Regranulate einen Geruch auf, der als „störend“ bis „stark störend“ wahrgenommen wird. Neben der nicht sortenreinen Sortierung und dem schlechten Geruch

kommt hinzu, dass PCR-Rezyklate oft teurer sind als qualitativ hochwertige Neuware (Menzel 2022).

2 METHODEN UND VERSUCHE

Aufgrund des schlechten Geruchs von PCR-Rezyklaten haben bereits viele Anlagenbauer in den letzten Jahren reagiert. Neben einer verbesserten Filtration und Entgasung der Schmelze während der Extrusion, sind auf dem Markt auch bereits separate Module zur Reduzierung von geruchsverursachenden flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) erhältlich. Meist wird das noch warme Regranulat dabei in beheizten Silos auf Temperatur gehalten, um mittels Thermodesorption das Ausgasen der VOCs zu erreichen. Neben diesem thermo-physikalischen Ansatz kommen auch lösemittelbasierte Verfahren zur Beseitigung von Verunreinigungen und Gerüchen bereits zur Anwendung. Eine weitere Möglichkeit ist die Zugabe von Additiven, mit denen die für den unangenehmen Geruch verantwortlichen Substanzen chemisch gebunden oder überdeckt werden.

In diesem Beitrag werden die drei beschriebenen Ansätze zur Geruchsoptimierung unter Einsatz des realen Regranulats B experimentell untersucht. Basierend auf GC-MS-Analysen und der olfaktorischen Bewertung der Proben nach VDA 270, werden nachfolgend die Ergebnisse dargestellt.

2.1 Thermische Behandlung

Die Thermodesorption ist geeignet, um flüchtige Verbindungen im Kunststoff durch den Eintrag von thermischer Energie zu mobilisieren. Die Volatilität einer Verbindung hängt dabei von deren Dampfdruck ab, welcher wiederum stoff- und temperaturabhängig ist (Hauke 2021). Es gilt grundsätzlich, dass mit steigender Temperatur und Verweilzeit eine bessere Thermodesorption von VOCs zu erwarten ist. Die obere Begrenzung der Temperatur richtet sich nach den Schmelzpunkten der beteiligten Polymere und wurde seitens des Praxispartners im Projekt auf maximal 80°C festgesetzt. Die Auswirkungen auf Geruch und VOC-Gehalt von Regranulat B bei dieser Temperatur sind in Abhängigkeit von der Verweilzeit in Abb. 2 dargestellt.

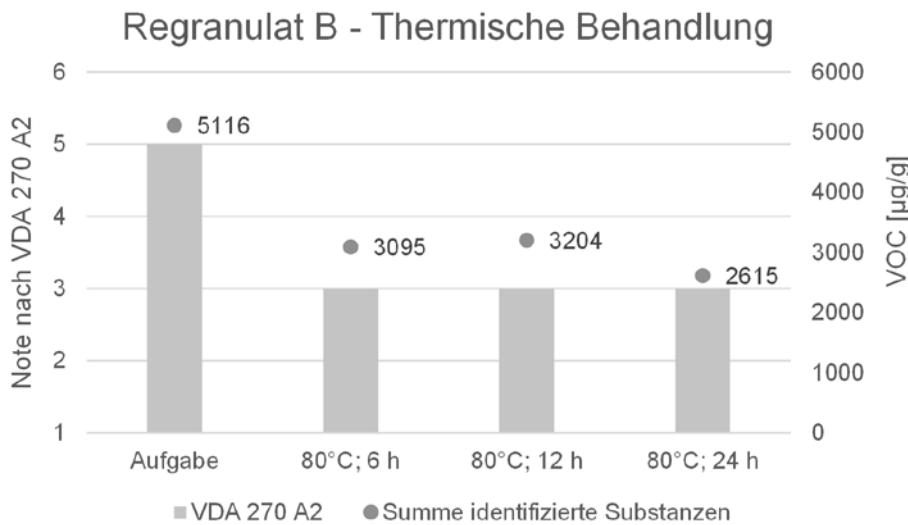


Abb. 2: Thermische Behandlung von Regranulat B - VDA 270 + GC-MS

Die thermische Behandlung des Materials hat einen positiven Effekt. Die behandelten Proben weisen unabhängig von der Verweilzeit einen Geruch auf, der als „deutlich wahrnehmbar, aber noch nicht störend“ wahrgenommen wird. Der mittels GC-MS nachweisbare VOC-Gehalt ist im Vergleich zum Aufgabematerial deutlich reduziert.

2.2 Soxhlet-Extraktion

Bei der Soxhlet-Extraktion handelt es sich um eine Methode zur kontinuierlichen Extraktion löslicher Inhaltsstoffe aus Feststoffen. Es wurden unter Verwendung verschiedener Lösemittel Versuche mit dem Ausgangsmaterial und mit kryogen zerkleinertem Regranulat durchgeführt, welches im Anschluss wieder extrudiert und granuliert wurde. Die Ergebnisse sind Abb. 3 zu entnehmen.

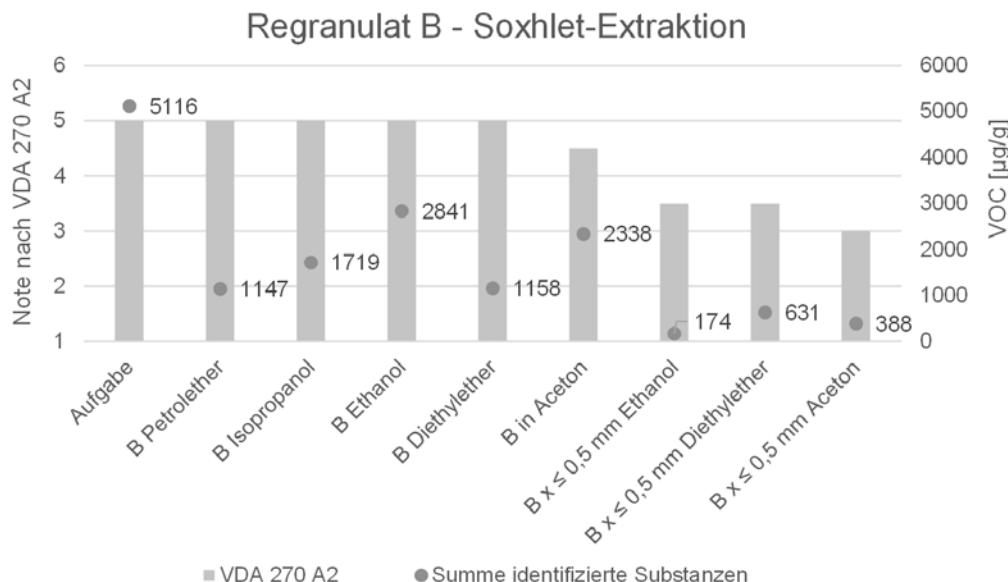


Abb. 3: Soxhlet-Extraktionsversuche mit Regranulat B - VDA 270 + GC-MS

Durch die Behandlung des Ausgangsmaterials mit den ausgewählten Lösemitteln konnte zwar eine Reduzierung des VOC-Gehaltes erreicht werden, nicht jedoch eine Verbesserung des Geruchs. Lediglich die Behandlung mit Aceton hatte einen geringfügigen Effekt. Unter Verwendung von kryogen zerkleinertem Material konnte mit den ausgewählten Lösemitteln der VOC-Gehalt sehr deutlich reduziert werden. Die sensorische Prüfung nach VDA 270 ergab für die Versuche mit Ethanol und Diethylether eine Einstufung zwischen „wahrnehmbar, aber noch nicht störend“ und „störend“. Das beste Ergebnis wurde mit auf $x \leq 0,5$ mm zerkleinertem Material und Aceton erreicht. Der Geruch dieses Materials wurde mit Note 3, „wahrnehmbar, aber noch nicht störend“, bewertet. Eine kryogene Zerkleinerung des Materials nach der Regranulierung ist jedoch praktisch unwirtschaftlich. Die Behandlung von nicht zerkleinertem Regranulat B mit den ausgewählten Lösemitteln, hatte trotz signifikanter Verringerung des VOC-Gehaltes keinen positiven Effekt auf den Geruch des Materials. Auch die Lösemittelbehandlung der vorsortierten Folienfraktion DSD 310, aus welcher das Regranulat B gewonnen wird, führte nach anschließender Extrusion und Granulierung nicht zu einer Verbesserung.

2.3 Zugabe von Additiven

Für diesen Versuch wurde das Aufgabematerial Regranulat B mittels Ultrazentrifugalmühle kryogen auf $x \leq 0,5$ mm zerkleinert und mit verschiedenen Additiven versetzt. Zum Einsatz kamen dabei Löss, Zeolith, gemahlener Kaffeesatz und Aktivkohle. Anschließend wurden die Mischungen extrudiert und granuliert. In Abb. 4 sind Geruch und VOC-Gehalt des aufgegebenen und behandelten Materials gegenübergestellt.

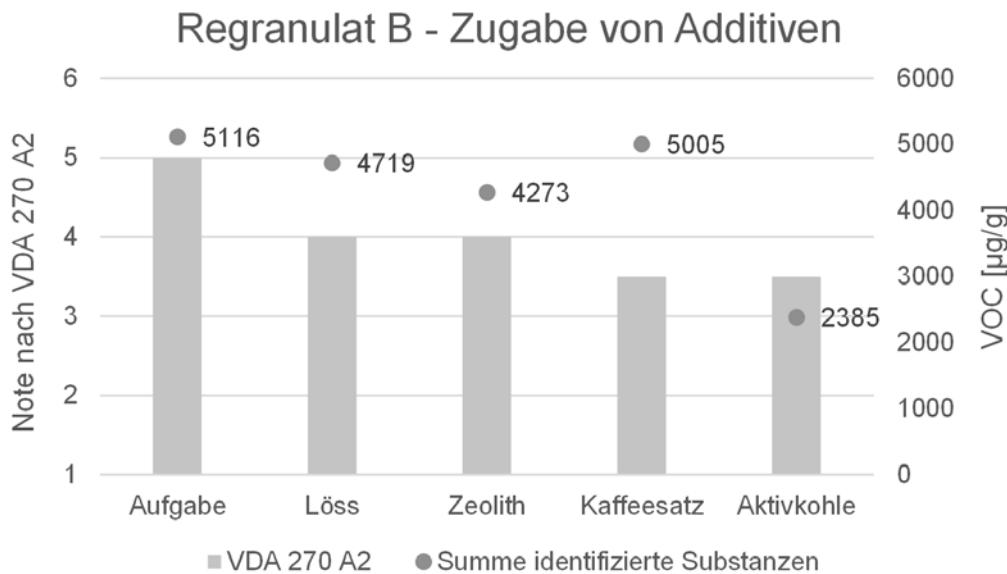


Abb. 4: Zugabe von Additiven zu Regranulat B - VDA 270 + GC-MS

Mit allen zugegebenen Additiven konnte eine Verbesserung des Geruchs erreicht werden. Durch Zugabe von Löss und Zeolith verringert sich der VOC-Gehalt, der Geruch des Materials wird jedoch noch immer als „störend“ bewertet. Gemahlener Kaffeesatz als Zuschlagsstoff bewirkt keine signifikante Absenkung des VOC-Gehaltes. Die Einstufung nach VDA 270 ist jedoch im Vergleich zu den Versuchen mit Löss und Zeolith etwas besser und weist eine Tendenz zu „wahrnehmbar, aber noch nicht störend“ auf. Diese Verbesserung des Geruchs ist vermutlich auf den Desodorierungseffekt des aromatisch riechenden Kaffees zurückzuführen. Die besten Ergebnisse dieser Versuchsreihe wurden durch Zugabe von Aktivkohle erreicht. Der gemessene VOC-Gehalt im Granulat ist im Vergleich zur Aufgabe um die Hälfte reduziert, der Geruch liegt wie bei Kaffee zwischen „störend“ und „wahrnehmbar, aber noch nicht störend“. Die direkte Zugabe von Additiven zur Schmelze während der Extrusion wurde nicht untersucht.

3 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Unter den im Rahmen dieses Projektes untersuchten Ansätzen zur Geruchsverbesserung von PCR Regranulat, konnten durch thermische Desorption, insbesondere vor dem Hintergrund der vergleichsweise einfachen technischen Umsetzung, die besten Ergebnisse erzielt werden. Eine Nachbehandlung des Materials bei 80°C führte ab einer Verweilzeit von 6 Stunden zu einer Verbesserung des Geruchs von Note 5, „stark störend“, zu Note 3, „wahrnehmbar, aber noch nicht störend“.

Die Versuche im Soxhlet-Extraktor waren mit den ausgewählten Lösemitteln ohne vorherige Zerkleinerung des Materials nicht zielführend. Die kryogene Zerkleinerung des bereits fertigen Regranulates und die anschließende Behandlung mit Lösemittel vor dem erneuten Extrudieren und Regranulieren ist jedoch praktisch auszuschließen, da die Kosten von Regranulat bereits jetzt mitunter höher sind, als die für qualitativ hochwertigere Neuware. Es besteht kein direkter Zusammenhang zwischen dem VOC-Gehalt einer Probe und deren Geruch nach VDA 270.

Durch Zugabe der verwendeten Additive konnte eine Verbesserung des Materialgeruchs erreicht werden. Allerdings konnte mit keinem Gemisch am Ende die Note 3, „wahrnehmbar, aber noch nicht störend“ erreicht werden. Auch für die Zugabe der Additive wurde des Regranulat zuvor kryogen zerkleinert. Die Zugabe der Additive direkt während der Extrusion wurde nicht untersucht. Auch die Auswirkungen der Additivzugabe auf die rheologischen und mechanischen Eigenschaften des Materials wurden im Rahmen dieses Projektes nicht betrachtet.

Gegenwärtig ist die Beschaffenheit von Rezyklaten aus Post-Consumer-Kunststoffabfällen, welche durch mechanisches Recycling gewonnen werden, unbefriedigend. Um die von der EU geforderten Quoten für den Einsatz von Rezyklaten zu erreichen, bedarf es daher in den verbleibenden Jahren noch erheblicher Bemühungen, um letztendlich auch die Qualität der Kunststoffprodukte zu gewährleisten. Hinzu kommt, dass Polymere aufgrund ihrer organischen und makromolekularen Struktur anfälliger gegenüber äußeren Faktoren sind und schneller altern als andere Werkstoffe, wie beispielsweise Glas oder Metalle. So schön der Gedanke von einer Kreislaufwirtschaft auch ist, wir können Kunststoffe schon vor diesem Hintergrund nicht beliebig oft recyceln. Neben der Erhöhung der Rezyklatquoten, braucht es daher insbesondere Bemühungen zur Verringerung des Abfallaufkommens und zur Substitution von Polymeren durch alternative Werkstoffe.

Das Projekt wird gefördert vom Bundesministerium für Umwelt und Klimaschutz

LITERATURVERZEICHNIS

- Hauke, B., (2021). Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Menzel, N., (2022). Was ist Kunststoffrezyklat? Von www.plastverarbeiter.de: https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/kunststoffrecycling/was-ist-kunststoffrezyklat744.html abgerufen
- Tanja Fell, E. O., (2020). Geruchsreduktion von post-consumer Kunststoffrezyklaten durch kontrollierte Bakterienkulturen in kreislaufgeführten Waschprozessen. Freising: Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackungen IVV.
- Umweltbundesamt, (2024). [www.umweltbundesamt.de. Von https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehler-abfallarten/verpackungsabfaelle#verpackungen-uberall](http://www.umweltbundesamt.de: https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehler-abfallarten/verpackungsabfaelle#verpackungen-uberall) abgerufen

KONTAKT

Peter Clemenz
Peter.Clemenz@hszg.de
+493583/612-4951
Zittau Institut für Verfahrensentwicklung, Kreislaufwirtschaft, Oberflächentechnik, Naturstoffforschung (ZIRKON)
Hochschule Zittau/Görlitz
<https://zirkon.hszg.de/>

The Role of Circular Economy in Industry 5.0

Susanne Roßkogler¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing and Waste Management, Leoben, Austria

ABSTRACT: The sustainability transformation of industry is one of the greatest challenges facing the European Union. One of the key levers in the transformation is the shift from a linear product life cycle to a circular one. In 2021, it proclaimed the 5th industrial revolution (Industry 5.0 or I5.0) to enable industry to make the transition.

This article examines the connection between I5.0 and the circular economy. Based on the current literature, this article explicitly examines I5.0 technologies that can contribute to achieving a stronger circular economy. After analyzing the results of the research, it becomes clear that some of the technologies have a connection to the circular economy that originated in industry 4.0, but have been expanded to include important functions and fields of application.

1 INTRODUCTION AND BACKGROUND

There is scientific consensus on man-made climate change. There is also a consensus that joint efforts must be made by economy, science and the population in general to avoid critical warming scenarios. The 1.5° Celsius target is already a long way off, but the 2°C target is within the realms of possibility (UNFCCC 2015). Provided that the pathways are followed, the technologies and changes are implemented accordingly (Meinshausen et.al. 2022).

The contribution of industry, especially of energy-intense manufacturing industry, to the increase in greenhouse gases is also undisputed. In the European Union (EU), for example, this sector was responsible for around 22% of EU total greenhouse gas (GHG) emissions in 2019 (EC 2023).

Resource consumption is one of the causes of environmental damage. Mining, processing and transport all contribute to an increase in greenhouse gases. An additional point is Europe's dependence on resources, which must be counteracted (EC 2020a). In Austria, resource consumption is 19 tons per capita, which is around 5 tons per capita above the EU average. In recent decades, resource consumption has remained relatively stable while the economy has grown, but if we look at material consumption as a whole, no absolute reduction has yet been achieved. However, decoupling growth from resource consumption is a desirable goal at both EU and national level (BMK 2020).

1.1 *Green Deal*

Five years ago, the EU presented the Green Deal to counteract the effects mentioned above. The overarching goal is to make the continent climate-neutral by 2050.

In addition to climate change adaptation measures are a "Fit for 55" plan - an industrial strategy plan - which also includes a programme for the circular economy (EC 2019). As mentioned at the beginning, industry makes a significant contribution to emissions, especially the energy-intensive sectors. And here too, solutions have been developed as part of the Green Deal. They address the ecological and digital transformation. These transformations are intended to pave the way from linear production to a circular economy (EC 2020b).

1.2 Circular Economy

In order to fulfil the European targets at national level, the Austrian government has developed the Circular Economy Strategy. It aims to enable sustainable product production, reduce resource consumption and increase resource productivity by 50% by 2030. The circularity rate is also to be increased by 18% in the same period. One point of the circular economy strategy that is particularly worth mentioning for the manufacturing industry is strengthening the exchange of information along the value chain (BMK 2022). In addition to new methodologies, such as life cycle assessment, new digital technologies will also be of particular relevance here.

1.3 Industry 5.0

In 2021, the European Union defined the 5th Industrial Revolution. It is intended to further develop the technologies of the 4th industrial revolution and take their application to a new level. People-centered, sustainable and resilience-enhancing are the hallmarks of the new industrial age (EC 2021a). Industry 5.0 is intended to promote regenerative economic approaches in the area of resources. They are the framework for systemic change. The principles of Industry 5.0 are based on design out waste and pollution, keeping products and materials in the used cycle for as long as possible, regenerating natural systems and promoting carbon sinks. The circular economy as a regenerative economic model is therefore also a pillar of I5.0. It is not intended to be a software update of Industry 4.0 but a real revolution. While the previous industrial revolutions were technology-centered, the current one is defined as value-centered. (EC 2021b).

2 METHOD

This article aims to answer the following questions

- Can the concept of the circular economy contribute to the realization of Industry 5.0?
- And which Industry 5.0 technologies can contribute to achieving a successful circular economy?

An extensive literature search was carried out to answer these questions. As the topic of I5.0 is very new, this provides an overview of the initial research approaches and results.

The literature search was carried out in the two databases Science Direct and Web of Science. It was limited to the following terms: "*circular economy*" and/or "*manufacturing industry*" and/or "*Industry 5.0*" The timeframe was set for "2021 to 2024", before which there was no definition of the latest industrial revolution. Articles that did not contain the term "*Industry 5.0*" were excluded.

All analyzed papers are in English. In total, 46 papers get analyzed according to current research opinion and the role of the circular economy within the definition of I5.0. After a first screening, the papers are examined with regard to the role of the circular economy in I5.0. The technologies used, as well as barriers, enablers and other effects get documented. In the sense of holistic literature research, the selected papers are investigated for I5.0 technologies and their connection to Circular Economy using content analysis.

3 RESULTS

Many of the papers and literature reviews focus on differentiating between I4.0 and I5.0 and on the technologies and innovations. The focus is clearly on the human-centered approach in addition to examining the distinction between the last two industrial revolutions. Hardly any emphasis is given on how I4.0 and I5.0 are applied to achieve different goals, such as the expansion of the circular economy.

Based on the analyzed literature, the study concludes that technologies that can be applied along the entire value chain and transparently communicate the data of the associated products can make a contribution to achieving a better circular economy.

The analysis shows that artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), big data, digital twins, cyber-physical systems (CPS) and blockchain are technologies with potential to contribute to the circular economy (Asif et.al. 2023, Payer et.al. 2024).

An important mechanism that emerged from the research is the investigation of reverse logistics to bring the materials to the right processing point for recycling (Yu & Sun 2024).

The main obstacles to implementing the necessary technologies are the lack of a legal framework, the effort involved in employee training and acceptance, as well as ethical concerns regarding the employees involved (Barata & Kayser 2023, Leng et al. 2022, Mukherjee et.al. 2023).

One task for future studies would be to define key performance indicators in order to quantify the success of the technologies and create a standardized definition. This would require precise analyzes at the different company levels as well as at the different technology levels.

4 SUMMARY

The literature analysis carried out shows that the technologies of I5.0 are already well defined and described. However, there is still little description of the goals to be achieved, such as strengthening the circular economy.

Furthermore, the literature also lacks key performance indicators to quantify the success of the implemented technologies. These will be necessary to evaluate trade-offs and make important decisions for companies, their employees and their economic success.

Whether the revolution is a pure value revolution, or one characterized by further disruptive technologies will and must be the subject of further research.

5 DATA

Data will be made available on request.

REFERENCES

- Asif, M., Searcy, C., Castka, P. (2023) *ESG and Industry 5.0: The role of technologies in enhancing ESG disclosure*. Technological Forecasting and Social Change, Volume 195. <https://doi.org/10.1016/j.technfore.2023.122806>.
- Barata, J., Kayser, I. (2023) *Industry 5.0 – Past, Present, and Near Future*. Procedia Computer Science, Volume 219, p 778-788, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.351>.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Tourismus (BMK), (2020), Ressourcennutzung in Österreich 2020. Wien.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Tourismus (BMK), (2022) *Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie*. Wien.
- European Commission (EC) (2019) *The European Green Deal*. Brussels
- European Commission (EC) (2020a) *Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Ein Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken*. Brussels.
- European Commission (EC) (2020b) *Eine neue Industriestrategie für Europa*. Brussels.
- European Commission (EC) (2021a) *Industry 5.0. What this approach is focused on, how it will be achieved and how it is already being implemented*. Brussels. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en, last access 15.07.2024.
- European Commission (EC) (2021b) *Industry 5.0. A transformation Vision for Europe. Governing Systemic Transformations towards a sustainable industry*. Brussels

- European Commission (EC) (2023) *Greenhouse gas emissions from manufacturing: what difference across countries?* Brussels. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/greenhouse-gas-emissions-manufacturing-what-difference-across-countries-2023-09-29_en last access 15.07.2024.
- Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., Wuest, T., Mourtzis, D., Wang, L., (2022) *Industry 5.0: Prospect and retrospect*. Journal of Manufacturing Systems. Volume 65, p 279-295, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.09.017>.
- Meinshausen, M., Lewis, J., McGlade, C., et al. (2022) *Realization of Paris Agreement pledges may limit warming just below 2 °C*. Nature **604**, 304–309 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04553-z>.
- Mukherjee, A.A., Rai, A., Aggarwal, S., (2023) *Identification of barriers and their mitigation strategies for industry 5.0 implementation in emerging economies*. International Journal of Production Economics, Volume 257, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108770>.
- Payer, R.C., Quelhas, O.L.G., Bergiante, N.C.R., (2024) *Framework to supporting the circular economy in the context of industry 5.0: A proposal considering circularity indicators, digital transformation, and sustainability*. Journal of Cleaner production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142850>.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2015) *The Paris Agreement*. UNFCCC, New York.
- Yu, H., Sun, X., (2024) *Uncertain remanufacturing reverse logistics network design in industry 5.0: Opportunities and challenges of digitalization*. Engineering Application of Artificial Intelligence, Volume 133. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108578>.

CONTACT

Susanne Roßkogler MSc.
susanne.rosskogler@unileoben.ac.at
+436644370477
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben
<https://www.avaw-unileoben.at/de/>

Neue Verbundwerkstoffe aus Biopolymeren und regionalen Naturfasern – ein zukunftsträchtiges Material?

Anett Kupka, Marc Kreh & Maria Schäfer¹

¹⁾ Hochschule Zittau/Görlitz, ZIRKON, Zittau, Deutschland

KURZFASSUNG: Die Entwicklung neuer Materialien, besonders im Kunststoffbereich ist weit verbreitet (Beus et al. 2019). Die Substitution von Glas- und Carbonfasern durch Naturstofffasern einerseits und die Substitution von erdölbasierten Polymeren durch biobasierte sowie abbaubare Grundstoffe andererseits sind zwei Themenfelder in diesem Forschungsbereich, welchem sich die Hochschule Zittau/Görlitz im Rahmen des Projektes LaNDER³ widmet. „**Leben und Produzieren auf dem Industrieniveau des 21. Jahrhunderts mit dem, was die Natur hergibt** – Naturfasern, (Bio)Polymere, Kreislaufwirtschaft und erneuerbare Energien – darin sehen wir unsere Zukunft.“ (Hochschule Zittau/Görlitz 2024). Im Rahmen dieses Forschungsverbundes wurden Fragen zur Kreislauffähigkeit und besonders der Sortierfähigkeit gestellt, welche die Forschungsgruppe am ZIRKON bearbeitet und deren Ergebnisse exemplarisch auf dem Poster dargestellt werden.

1 EINLEITUNG

Faserverbundwerkstoffe erfreuen sich großer Beliebtheit in der Automobilindustrie, aber auch anderen Branchen. Meistens bildet dabei ein Kunststoff die Matrix und die Faser wird eingebettet mit dem vordergründigen Ziel das Matrixmaterial zu verbessern. Die Steifigkeit und Festigkeit wird von Polymeren zum Beispiel durch die Einbringung von Glasfasern oder Carbonfasern deutlich erhöht (Beus et al. 2019). Bei der Einbringung von Naturfasern in die Polymermatrix gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: Zum einen können Langfasern, ähnlich wie Glas oder Carbon, in die Polymermatrix eingebracht werden und damit die Glasfasern/Carbonfaser ersetzen. Zum anderen ist es möglich die Naturfasern in zerkleinriger Form in das Polymer einzubringen. Damit dienen sie als Füllstoff und der Reduzierung des einzusetzenden Polymers. Eine Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit ist bei dieser Variante nicht zu erwarten.

In dem hier vorgestellten Beitrag werden die herkömmlichen, erdölbasierten Polymere als Matrixmaterial mit alternativen Kunststoffen auf biologischer Basis im Verbund mit regionalangebauten Naturfasern als Füllstoff verglichen. Biologisch abbaubare und auf nachwachsenden Rohstoffen basierende Biopolymere bilden eine sinnvolle Matrix für Verbundkunststoffe, wenn man zum Beispiel Verpackungen und Einwegbehältnisse im Blick hat. Jedoch ist auch die Kombination von Biopolymeren und biobasierten Fasern auch für höherwertige Anwendungen aufgrund möglicher CO₂- und Gewichtseinsparungen denkbar.

Neben der reinen Materialherstellung stellt sich bei jedem neuen Material die Frage nach der gesetzlich geforderten Recyclingfähigkeit (Bundesministerium der Justiz 2023). Dabei wird davon ausgegangen, dass biologisch-abbaubare Kunststoff-Naturfaserverbunde im dualen System, als Fehlwurf, zu finden sind. Es gilt daher diese Materialien aus dem Abfallstrom auszuschleusen und anschließend der industriellen Kompostierung zuzuführen. Sie verunreinigen die Kunststofffraktionen, welche einem Recycling zugeführt werden können. Falls es sich um nicht biologisch-abbaubare, aber biobasierte Kunststoffe als Matrix-Material handelt, können diese ebenfalls keinem mechanischen Recycling zugeführt werden. Diese Materialien müssen als Störstoff ebenfalls ausgeschleust und einer thermischen Verwertung zugeführt werden. Ziel der Projektarbeit am ZIRKON ist es daher zu untersuchen, ob es ein Sortierkriterium gibt, nach dem Biopolymerverbunde aus dem Abfallstrom aussortiert werden können.

2 MATERIALIEN

Im Rahmen der Versuche wurden handelsübliche Einwegprodukte, im Projekt entwickelte Materialien (naturfaserverstärkte Kunststoffe) und vergleichend im realen Abfallstrom auftretende Kunststoffe untersucht.

2.1 Materialien Sortierversuche

Für die Sortierversuche wurden kommerzielle biologisch abbaubare Schalen, im Projekt LaNDER³ hergestellte Verpackungsmaterialien aus Kokosfasern, Bananenfasern und Spreustroh sowie Musterstücke aus Polypropylen mit verschiedenen Naturfasern getestet (Tab. 1).

Tab. 1: Materialien Sortierversuche - Übersicht

	Material	Foto	Abmessung	Farbe
A	Agrarreste		Schale, 25 x 13,5 x 4,5 cm	braun-natur
B	Zuckerrohr		Schale 7,5 x 5,3 cm 100ml	weiß
C	Zuckerrohr		Schale 15,5 x 4,6 cm, 380ml	beige
K1-K5	Kokosfaser + Kartoffelstärke		HSZG Muster Verpackung 20x 15 x 1 cm	fasrig, braun
B1-B12	Bananenfaser + Kartoffelstärke		HSZG Muster Verpackung 20x 15 x 1 cm	fasrig, braun
S1 – S3	SpreuStroh + Kartoffelstärke		HSZG Muster Verpackung 20x 15 x 1 cm	fasrig, hellbraun
NFK	PP + verschiedene Naturfasern		HSZG Muster Autoinnenverkleidung	hell-braun

2.2 Materialien Zerkleinerungsversuche

Es wurden naturfaserverstärkte Kunststoffe (50 % Flachs und 50% Polypropylen; Abb.1, A) aus Stanzrückständen einer Autoinnenverkleidung (Muster) mit erdölbasierten Kunststoffen (Polypropylen) aus Autoteilen (Abb. 1, B; manuell demontiert, sortenrein, Stoßstangen, Armaturenbrett) verglichen.

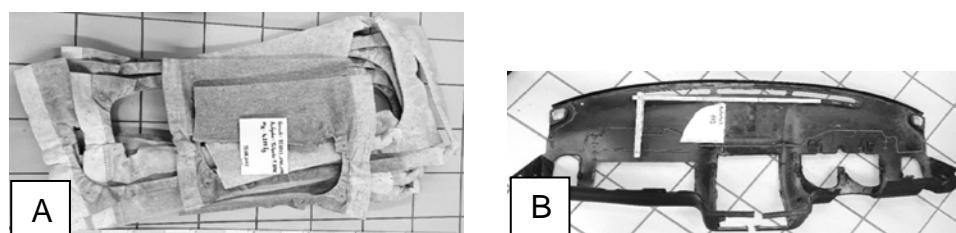


Abb. 1: A Naturfaserversärter Kunststoff (50% PP + 50 % Flachs) B Polypropylen

3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

3.1 Sortierversuche

Neben der reinen Materialherstellung stellt sich bei jedem neuen Material die Frage nach der gesetzlich geforderten Recyclingfähigkeit. Dabei wird davon ausgegangen, dass biologisch-abbaubare Kunststoff-Naturfaserverbunde im dualen System, als Fehlwurf, zu finden sind. Es gilt daher diese Materialien aus dem Abfallstrom auszuschleusen und anschließend der industriellen Kompostierung zuzuführen. Sie verunreinigen die Kunststofffraktionen, welche einem wertstofflichen Recycling zugeführt werden können. Falls es sich um nicht biologisch-abbaubare, aber biobasierte Kunststoffe als Matrix-Material handelt, können diese ebenfalls nur schwer mechanisch recycelt werden. Diese Materialien müssen in der Regel als Störstoff ebenfalls ausgeschleust und einer thermischen Verwertung zugeführt werden. Im Folgenden werden anhand eines Großversuches die Möglichkeiten und die Grenzen der Sortierbarkeit dieser neuen Materialien aufgezeigt.

In einer im Aufbau befindlichen modernen Sortieranlage (Abb. 2) wurden die unter 1.1 aufgeführten Materialien bei verschiedenen Sortierstufen manuell aufgegeben und am Ende der Sortierstrecken entnommen (Abb. 3).



Abb. 2: Blick in die Sortieranlage



Abb. 3: Aufgabe der Teststücke

3.2 Zerkleinerungsversuche

Im Rahmen einer mehrstufigen Zerkleinerung wurden verschiedene Beanspruchungsarten kombiniert (Abb. 4), getestet und die Prozessparameter aufgenommen.

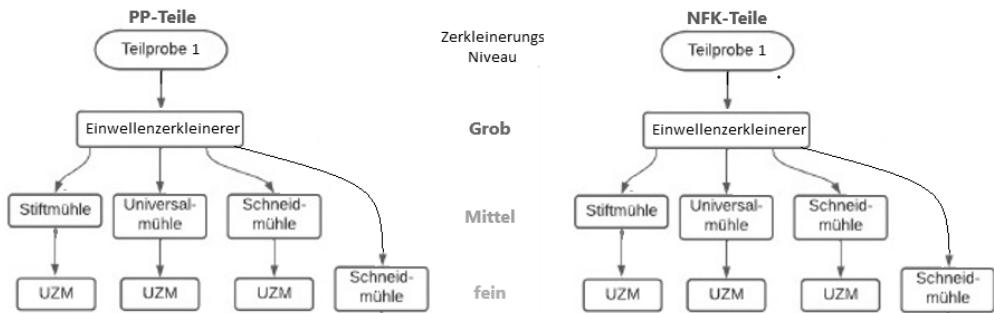


Abb. 4: Versuchsablauf Zerkleinerung

Im Technikum standen mehrere Apparate zur Grob-, Mittel- und Feinzerkleinerung gemäß Tabelle 2 zur Verfügung. Im Bereich der Mittel- und Feinzerkleinerung wurde dem Mahlgut bei Bedarf flüssiger Stickstoff zugegeben, um einen Zerkleinerungsfortschritt durch Versprödung realisieren zu können.

Tab. 2: Verwendete Zerkleinerungsapparate mit technischen Daten

	Einwellen- zerkleinerer	Stiftmühle/ Universalmühle	Schneidmühle Familie Retsch	Ultrazentrifugal- mühle
Modell	Mütek MGZ 630 K	Rekord A	SM300	ZM 200
Max. Leistung	18,5 kW	7,5 kW	3,2 kW	1,1 KW
Leerlaufleistung	3098 W	1420 W (6000 U/min)	744 W (1500 U/min)	190 W (8000 U/min)
Umdrehungszahl	90 U/min	2000 – 6000 U/min	1000 – 3000 U/min	6000 – 12000 U/min
Genutzte Maschenweite	50 mm	5 mm	6, 1 mm	1 - 2 mm

4 ERGEBNISSE

4.1 Sortierversuche

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass die handelsüblichen Einwegartikel Typ A, B und C durch ihr NIR-Spektrum (Cellulose und Papier) überwiegend der Fraktion Papier/Pappe/Kartone/Cellulose zugeordnet werden. Fehlsortierungen können zum Beispiel entstehen, wenn die Oberfläche der Materialien so glatt ist, dass die NIR-Spektren durch zu starke Reflexion überlagert werden. Die Biopolymer-Verbunde aus dem LaNDER³-Projekt mit Fasern aus Banane und Kokos wurden zu über 95 % im NIR erwartungsgemäß der Cellulose-Fraktion zugeordnet. Bei dem Produkt mit Strohfasern war die Zuordnung weniger eindeutig. Die Spektren waren vielfältig und reichten von Papier/Pappe, über Cellulose bis Polyethylenfolie. Eine Identifikation ist dadurch nicht möglich und das Material sollte weiter untersucht und optimiert werden.

Die Faserverbunde, welche im LaNDER³ hergestellt wurden (überwiegend Autotür-Innenverkleidungen mit PP-Matrix) wurden zu 80 % in die PP-Fraktion sortiert. Damit konnte gezeigt werden, dass das Matrixmaterial erkannt, aber die eingebetteten Fasern bei diesem Sortierverfahren nicht detektiert werden (Abb. 5).

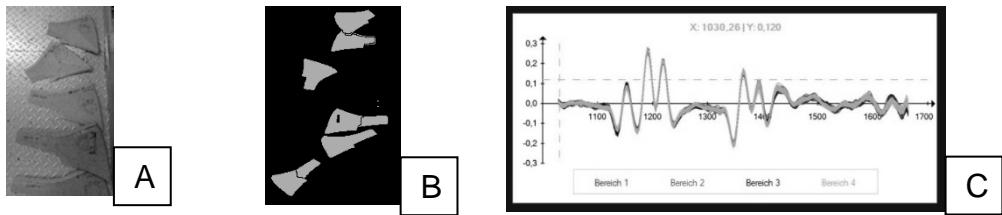


Abb. 5: A PP-Flachs-Musterstücke // B Bandaufzeichnung Klassifizierungsbild // C Spektren PP-NFK-Musterstücke

4.2 Zerkleinerungsversuche

Die massebezogene Zerkleinerungsarbeit nimmt für alle Versuchsmaterialien exponentiell mit der Zielkorngröße zu, wie im Diagramm Abb. 6 zu erkennen ist. Für die Zerkleinerung naturfaserverstärkte Kunststoffe wird mehr Energie benötigt, als für unverstärkte Kunststoffe. Sowohl für die Mittel- als auch die Feinzerkleinerung muss der Prozess gekühlt werden, um zum einen ein Schmelzen der Polymere und ein Verbrennen der Fasern zu verhindern und zum anderen eine Versprödung des Materials zu erreichen. Der Masse durchsatz beider Materialströme ist, durch die Differenz in den Dichten und die das damit verbundene Volumen sehr unterschiedlich.

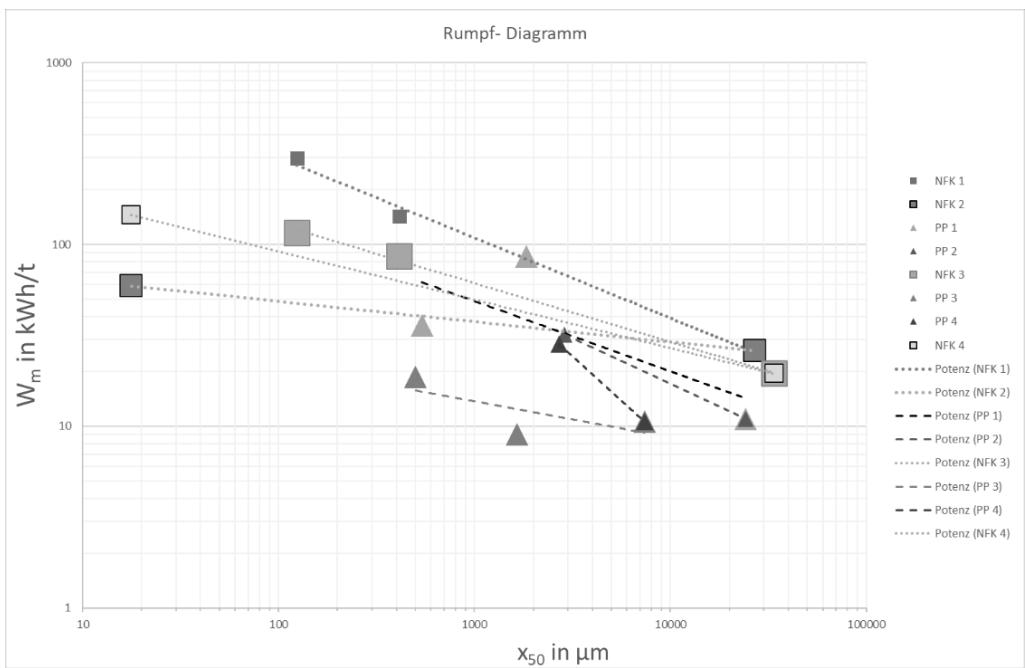


Abb. 6: massebezogene Zerkleinerungsarbeit für stufenweise Zerkleinerung von NFK und PP

Die während der Zerkleinerung aufgenommenen Prozesswerte bilden die Grundlage für die Bilanzierung des Prozesses mittels LCA-Analyse (Umberto, LCA+ 10.0.3). Als Bilanzgrenzen wurden die stufenweise Zerkleinerung gewählt, wie in Abb. 7 dargestellt. Für die Zerkleinerung von Naturfaserverstärktem-PP-Autoteilen werden 2,73 t CO₂-Äquivalente pro t Material eingesetzt und für die Zerkleinerung von recycelten PP-Autoteilen werden 0,0055 t CO₂-Äquivalente pro t Material benötigt.

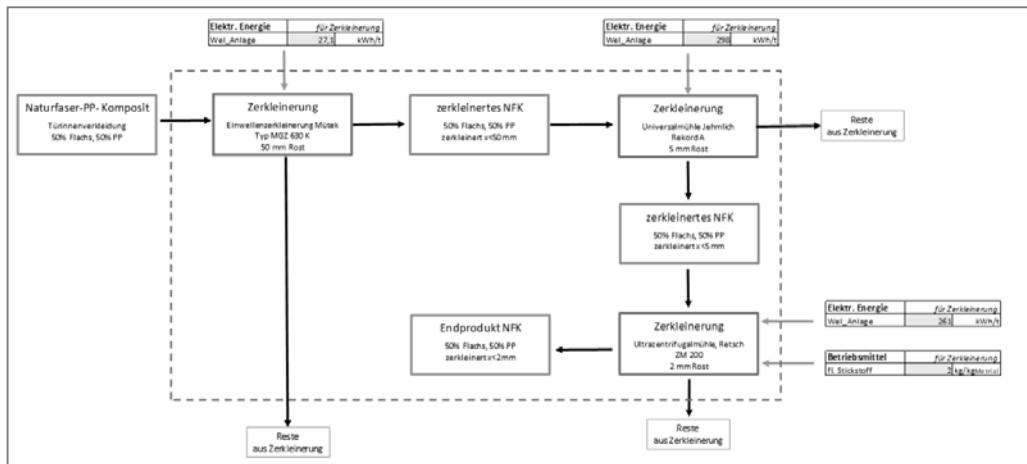


Abb. 7: LCA-Bilanzierung - Prozessschema, Bilanzgrenzen und Stoffströme am Beispiel Zerkleinerung von NFK

5 SCHLUSSFOLGERUNG

Naturfaserverstärkte Materialien werden im Abfallstrom in die Fraktion Papier-Pappe-Kartonage sortiert, wenn die Fasern detektiert werden können. Falls eine Weiterverarbeitung im Prozess „Papierrecycling“ nicht erfolgen kann, muss eine weitere Sortierstufe angeschlossen werden. Wird die Polymermatrix detektiert, dann wird der Kunststoffstrom durch den Anteil an NFK unreinigt. Unter Umständen ist es sinnvoll, eine weitere Sortierstufe, z.B. über die Dichte, zu ergänzen, um den Stoffstrom unverstärkter Kunststoffe kontaminationsfrei wertstofflich im Kreislauf führen zu können.

Die Zerkleinerung ist ein zentraler Prozessschritt einer jeden Aufbereitungstechnologie. Die Zerkleinerung von naturfaserverstärkten Kunststoffen benötigt mehr Energie als die unverstärkter Kunststoffe bezogen auf die gleiche Masse. Die Auswirkungen auf einen Lebenszyklus eines NFK-Bauteiles muss detaillierter untersucht werden.

Das Projekt wird gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.

LITERATURVERZEICHNIS

- Beus, N. d., Carus, M., & Barth, M. (2019). *Carbon footprint and sustainability of different natural fibres for biocomposites and insulation*. Hürth: nova institute GmbH.
- Bundesministerium der Justiz. (2023). Kreislaufwirtschaftsgesetz. Deutschland.
- Hochschule Zittau/Görlitz. (28. 06 2024). LaNDER³. Von <https://lander.hszg.de/> abgerufen

KONTAKT

Anett Kupka
 a.kupka@hszg.de
 +49 3583 612 4961
 Zittau Institut für Verfahrensentwicklung, Kreislaufwirtschaft, Oberflächentechnik, Naturstoffforschung (ZIRKON)
 Hochschule Zittau/Görlitz
<https://zirkon.hszg.de/>

Viable recycling approaches to electrolyser stacks

Richard Yaw Nti¹, Thomas Nigl¹, Hannah Aster², Lukas Zeilerbauer² & Marianne Kapp³

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Department of Environmental and Energy Process Engineering, Leoben, Austria

²⁾ Energieinstitut an der Johannes-Kepler-Universität Linz, Linz, Austria

³⁾ HyCentA Research GmbH, Graz, Austria

ABSTRACT: To ensure the sustainable use of the world's limited resources, it is essential to integrate principles of circularity into every new technology or product development. The ReCycle project deals with the reduction of environmental impact and related recycling capabilities (of hydrogen technologies) and aims to apply these circularity principles to technologies within the hydrogen value chain. The project will analyze the state-of-the-art recycling chain for the proton exchange membrane (PEM) electrolysis system and its components, such as the porous transport layer (PTL) and bipolar plates (BPP). It will identify the best technical and economic recycling chains and calculate the recycling rate. By examining the recycling chain, the project will pinpoint weaknesses and challenges while considering environmental, economic, and sustainability factors. This analysis will lead to the development of improved or new processes, resulting in an enhanced overall recycling chain. Second-life strategies for the PTL and BPP will be evaluated, including potential reuse in less demanding applications. The feasibility of regeneration and re-functionalization will be assessed, along with technical and economic viability. A testing procedure for second-life applications will also be developed. Various recycling and second-life strategies (circular scenarios) will undergo evaluation using a newly developed sustainability assessment tool based on the 17 SDGs. Eco-design requirements and recommendations will be derived from the recycling and second-life strategies.

1 INTRODUCTION

The massive growth of global interest in sustainable energy solutions has indeed driven the development and deployment of fuel cells and electrolyzers as key components of the clean energy landscape. These technologies offer promising pathways towards decarbonization by enabling efficient energy conversion and storage without harmful emissions while reducing the dependence on fossil fuels. Yet, their widespread adoption faces compelling challenges, some of which are the sustainable management of materials and resources, sourcing, production and end of life management. At the core of sustainable utilization of fuel cells and electrolyzers lies the implementation of robust recycling strategies. Efficient recycling technologies play a crucial role in alleviating environmental impacts, reducing resource depletion, and fostering a circular economy within the energy sector. This article provides a comprehensive project description for recycling electrolyzers, covering objectives, methodology, expected outcomes, and the importance of this endeavor for sustainable energy practices.

1.1 Project Objectives

The primary objectives of the project are to identify the best recycling chain for PEM electrolyser systems based on technical and economic feasibility, as well as environmental and sustainability factors, with a particular focus on the depicted components PTL and BPP. Additionally, the project aims to conceptualize and develop improved recycling processes, focusing primarily on the PTL and BPP but also considering other components if novel solutions are found. Another key objective is to evaluate the environmental impact and economic viability of the proposed circular scenarios. The project also seeks to ensure that recycling processes adhere to environmental regulations and industry standards, facilitating broader adoption and implementation. Furthermore, it aims to develop eco-design guidelines for the PTL and BPP, as well as second-

life scenarios, regeneration techniques, and fit-for-second-life tests for these components. Lastly, the project intends to develop a sustainability assessment tool and assess the above circular scenarios, including combination scenarios of hydrogen production, transport, and storage.

2 METHODOLOGY

Analysis and concept development focus on examining current market technologies, raw materials, and production processes to create new recycling methods. These methods include dismantling, shredding, chemical leaching, sensor-based sorting, thermal treatment, and electrodynamic defragmentation (Pfaff & Hanebeck, 2020; Seifert et al. 2021). The process involves chemical analysis and characterization of materials at various stages. The goal is to develop recycling processes for electrochemical materials and stack components, such as BPPs, PTLs, microporous transport layers (MPLs) and catalyst coated membranes (CCMs). Emphasis is placed on reducing environmental impact by using recycled materials, integrating eco-design approaches, and facilitating knowledge transfer. Additionally, second-life strategies and reuse options are evaluated before recycling, including stationary applications and lower pressure storage.

Data gathering and life cycle assessment (LCA) will involve collecting real process data, modeling, and upscaling processes. LCA models will be developed for implementation studies for recycling options and virgin material use will be conducted, focusing on environmental impact and possible trade offs. Additionally, decision-making processes will be established to determine the extent of recycling content from an environmental perspective.

The legal and standard framework involves assessing legal frameworks for recycling processes and their environmental impacts. This includes evaluating standards and certification processes for recyclability and considering legal and standard frameworks for various waste streams.

The economic framework conditions will involve assessing global market trends, covering the entire value chain, and evaluating value creation for mobile and stationary applications.

3 EXPECTED RESULTS

One major outcome of the project will be a viable and scalable technological roadmap to PEM electrolyser recycling and recovery of critical raw materials, taking into account established as well as new recycling paths. The interdependence of the various recycling paths with the end-of-life material amounts will thereby be analyzed. Technological white spots in the recycling path will be identified and solutions proposed. Additionally, it involves evaluating future material availability linked with technical progress from related areas, ensuring a forward-looking approach to resource management. The project will also focus on creating comprehensive waste management concepts that encompass collection, pre-treatment, sorting, separation, and recycling. A significant outcome will be the reduction of material waste and greenhouse gas (GHG) emissions through effective recycling practices. Another key objective is the identification of potentials and high recycling ratios for secondary raw materials. The project aims to demonstrate the scalability of recycling processes and cost-effective recycling schemes for various materials, supported by the development of material flow analysis (MFA) for inputs and outputs of recycling processes, providing a clear picture of resource movements. Additionally, the project will conduct LCA-based decision-making and trade-off analysis to enhance environmental performance, and establish framework conditions and requirements in system design to further enhance recyclability and second-life strategies. The work will be supported by an assessment of aligned with EU legislative approaches. Finally, the project will provide input and proposals for standard certification processes for recyclability, ensuring that the developed technologies and methods meet industry standards and regulatory requirements.

4 SCIENTIFIC RELEVANCE

In recent decades, research on hydrogen-related processes and products has primarily aimed at enhancing performance, efficiency, and reducing costs. With many technologies now exceeding technology readiness level (TRL) 7 or 8, the focus has shifted to scaling up and industrializing these technologies. This shift brings attention to end-of-life, recycling, and other circularity-related issues. The research field remains relatively new, despite some mature technologies like platinum group metal recycling, indicating significant potential for optimization and innovation.

The EU-funded project "HyTechCycling" (Valente et al., 2018, 2019) was among the first to develop new, mainly hydrometallurgical, recycling technologies for fuel cell and electrolysis systems. This project aimed to create processes that enable the recovery of multiple stack component constituents and to conceptualize an alternative recycling route that consumes less energy than the standard pyrometallurgical Valente et al. (2018) route. This was followed by the "Best4Hy" project (Haque et al., 2023), which focuses on recycling end-of-life fuel cells. "Recycalyse" (Melke et al., 2024) another EU-funded project, concentrates on replacing critical raw materials in proton exchange membrane electrolyzers and developing new recycling processes related to disassembly and platinum group metal recycling.

A recent review of electrolysis recycling technologies was presented by (Haque et al., 2023). The EU-funded project "SH2E" (Iribarren & Dufour, 2024; Martín-Gamboa et al. 2023) aims to develop a harmonized multi-dimensional framework that includes environmental, economic, and social impact factors. The "eGhost" project is working on eco-design guidelines for PEM fuel cell systems and solid-oxide electrolyser systems. Additionally, a life cycle assessment of PEM electrolysis systems was recently published (Diego Iribarren et al. 2023).

Despite the importance of regeneration and second-life strategies for hydrogen-related components, there is currently limited data available on this topic. The COMET project ReCycle aims to address this gap through several key initiatives. It will establish knowledge about recycling strategies and the recyclability of PEM electrolyser stacks, with a particular focus on proton exchange membrane (PTL) and bipolar plates (BPP). The project will also investigate the environmental impact and broader sustainability of these processes. Additionally, ReCycle will identify weaknesses and pitfalls in existing recycling processes, propose improvements, and develop enhanced processes specifically for PTL and BPP. It will explore second-life scenarios for PTL, both with and without component regeneration, and create a fit-for-second-life test procedure for PTL, which will serve as the foundation for a more universal test applicable to various electrolysis stack components. Furthermore, the project will establish eco-design recommendations for PTL and BPP and develop a sustainability assessment tool tailored to products and processes within the hydrogen value chain

5 CONCLUSION

The project aims to develop and implement viable recycling approaches that enhance material recovery, reduce environmental impact, and ensure economic sustainability. By focusing on innovative recycling technologies, comprehensive lifecycle and economic analyses, and regulatory compliance, the project seeks to create a robust recycling ecosystem that supports the growth of the hydrogen economy. The successful implementation of this project will contribute to a circular economy, promote sustainable practices, and position stakeholders as leaders in the transition to a green energy future.

REFERENCES

- Diego Iribarren, Felipe Campos Carriedo, Javier Dufour, Claudia Di Noi, Andreas Ciroth, Shravya Hebbur Murali, Sally Springer, & Christina Wulf. (2023). SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF HARMONISED HYDROGEN ENERGY SYSTEMS D4.2 Definition of FCH-SLCA guidelines WP4 Harmonised extension to Life Cycle Costing and Social Life Cycle Assessment.
- Haque, N., Giddey, S., Saha, S., & Sernia, P. (2023). Recyclability of Proton Exchange Membrane Electrolyzers for Green Hydrogen Production. Minerals, Metals and Materials Series, 137–150. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22765-3_14
- Iribarren, D., & Dufour, J. (2024). Environmental life cycle assessment of hydrogen systems & SH2E LCA guidelines. Introduction to LCA and hydrogen energy systems.
- Martín-Gamboa, M., Campos-Carriedo, F., Iribarren, D., Dufour, J., Wulf, C., Schreiber, A., Springer, S. K., Ishimoto, Y., Mizuno, Y., Hamed, A., & Ciroth, A. (2023). Sustainability Assessment of Harmonised Hydrogen Energy Systems D5.1 SH2E guidebook for LCSA WP5 Joint integration into an LCSA framework.
- Melke, J., Maletzko, A., Gomez Villa, E. D., Bornet, A., Wiberg, G. K. H., Arenz, M., Sandig-Predzymirska, L., Thiere, A., Charitos, A., Stelter, M., Wang, Z., Pitscheider, S., Bertheussen, E., Pedersen, C. M., Finsdóttir, S., Kokborg, M. S., Berman, D. G., Dalvang, S., Müller, S. S., ... Kallesøe, C. (2024). Recycalyse – New Sustainable and Recyclable Catalytic Materials for Proton Exchange Membrane Electrolyzers. *Chemie-Ingenieur-Technik*, 96(1–2), 126–142. <https://doi.org/10.1002/cite.202300143>
- Pfaff, F., & Hanebeck, U. D. (2020). Sensor-based sorting. In *At-Automatisierungstechnik* (Vol. 68, Issue 4, pp. 229–230). De Gruyter Oldenbourg. <https://doi.org/10.1515/auto-2020-0023>
- Seifert, S., Dittrich, S., & Bach, J. (2021). Recovery of raw materials from ceramic waste materials for the refractory industry. *Processes*, 9(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/pr9020228>
- Valente, A., Iribarren, D., & Dufour, J. (2018). New technologies and strategies for fuel cells and hydrogen technologies in the phase of recycling and dismantling.
- Valente, A., Iribarren, D., & Dufour, J. (2019). End of life of fuel cells and hydrogen products: From technologies to strategies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(38), 20965–20977. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.110>

Kunststofftransformation im Zuge der Kompostierung

Josef Adam¹, Jessica Brantner¹, Verena Schmid¹, Martin Wellacher², Cornelia Riegler² & Franz Poschacher³

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

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

³⁾ Poschacher Kompost e.U., Kraubath an der Mur, Österreich

KURZFASSUNG: Im Rahmen des Projektes Plastic Free Compost wurden die Transformation und das Zersetzungerverhalten von Kunststoffen während des Kompostierungsprozesses untersucht. Kunststoffe gelangen als Fehlwürfe oder fälschlicherweise in Form von Vorsammelhilfen in die biogene Haushaltssammlung und weiter in die Kompostierung. Zentral in diesem Zusammenhang sind die Entstehung von Mikroplastik und sein Austrag in die Umwelt über den erzeugten Kompost. Um Aussagen über das Zersetzung- und Vervielfachungsverhalten treffen zu können, wurden biogene Haushaltsabfälle im Rahmen von Versuchen mit Kunststoffen dotiert sowie einer zehnwöchigen Kompostierung unterzogen. Die Auswertung erfolgte mittels Massen- und Inhaltsbilanzen sowie Teilezzählungen. Weiters wurden Zugversuche durchgeführt, um die zunehmende Versprödung der eingesetzten Kunststoffe quantifizieren zu können.

1 EINLEITUNG

Kompost ist eine relevante Quelle für den Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt. Es ist jedoch nicht bekannt, in welcher Form die Kunststofftransformation im Zuge des Kompostierungsprozesses stattfindet und wie das Zersetzungerverhalten der Kunststoffe und somit ihre Festigkeit durch die Kompostierung beeinflusst wird. Ein zentraler Einflussfaktor auf die Zerkleinerung und im weiteren Sinne die Teilevervielfachung stellt die Festigkeit bzw. die Sprödigkeit der Kunststoffe dar. Während des Kompostierungsprozesses werden die Kunststoffprodukte neben biologischen Einwirkungen auch mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. So kommt es durch die Behandlung der Kompostmieten zur mechanischen Belastung der Kunststoffprodukte und resultierend daraus zu deren Zerkleinerung sowie Vervielfachung. Im Rahmen des Projektes Plastic Free Compost wurden die Transformation und das Zersetzungerverhalten von Kunststoffen während des Kompostierungsprozesses untersucht.

Seit dem Jahr 2018 beschäftigt sich eine Arbeitsgruppe in der Steiermark mit der Herstellung von störstoffarmem Kompost. Die derzeitigen Aktivitäten laufen unter dem Projektnamen Plastic Free Compost. Im Projektkonsortium kooperieren derzeit folgende acht Partner aus Wissenschaft, Öffentlichkeit und Industrie:

- Montanuniversität Leoben - Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (Konsortialführer),
- Ingenieurbüro Wellacher e.U.,
- Abfallwirtschaftsverband Leoben,
- Abfallwirtschaftsverband Mürzverband,
- Holding Graz - Kommunale Dienstleistungen GmbH,
- Binder+Co AG,
- Komptech GmbH und
- Poschacher Kompost e.U.

Das Projekt wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert.

2 MATERIALIEN UND METHODEN

Der Versuchsablauf setzte sich aus der Befreiung eines biogenen Haushaltsabfalls von diversen Störstoffen mithilfe einer Vorbehandlung, der Dotierung des Abfallstroms mit Blumentöpfen und Säcken aus Kunststoff sowie dem Aufsetzen einer Miete zusammen. Mit einem Umsetzer wurde das Material während der zehnwöchigen Rotte manipuliert. Anschließend erfolgten Siebungen, die Sortierung der dotierten Materialien, Teilebetrachtungen, Inhalts- und Massenbilanzen sowie Zugversuche.

Zur Erreichung eines aussagekräftigen Ergebnisses war ein störstoffärmer biogener Abfall als Ausgangsmaterial für die Dotierung notwendig. Um diesen zu erzeugen, wurde eine Vorbehandlung von frischen biogenen Abfällen aus dem Sammelgebiet Graz durchgeführt. Die Vorbehandlung bestand aus einer Zerkleinerung sowie Siebung zur Generierung eines Materials mit einer Korngröße kleiner 110 mm.

Die Dotierung dieses Materials erfolgte manuell mit zwei unterschiedlichen Produkten. Das erste Produkt waren orange Säcke aus Low-Density Polyethylen (LDPE). Als zweite Fraktion wurden dem Abfallstrom violette Blumentöpfe aus Polypropylen (PP) zugefügt.

Am Ende des zehnwöchigen Kompostierungsprozesses erfolgte die Siebung des Materials mit einem Trommelsieb bei den Siebschnitten 80 mm und 25 mm. Vor Ort wurden zwei Proben gezogen, die im Labor bei den Korngrößen 40 mm, 16 mm, 10 mm und 2 mm händisch gesiebt, sortiert und das Gewicht und die Anzahl der Teile je Siebschnitt ermittelt.

Im Rahmen von Zugversuchen war es das Ziel, die Auswirkungen der Beanspruchung der Kompostierung auf die zugegebenen Kunststoffe zu verstehen. Betrachtet wurden die Spannung und Dehnung der Proben, die über das Stoffgesetz miteinander in Beziehung stehen. In einem Zugversuch wird das Material beidseitig eingespannt und bis zum Bruch belastet. Resultat ist ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm, das aus den Werkstoffkennwerten der Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung ermittelt wird. Durchgeführt wurden die Versuche am Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe der Montanuniversität Leoben.

3 ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die Teilevervielfachung der Töpfe (PP) nach dem Rotteprozess war 2,1-fach. Bei den LDPE-Säcken konnte eine 47-fache Teilchenvervielfachung abgeleitet werden.

Es ist ersichtlich, dass die LDPE-Säcke eine deutlich kritischere Fraktion als die PP-Blumentöpfe darstellen, da eine weitaus größere Teilevervielfachung im Zuge des Rotteprozesses stattfindet. Kunststoffsäcke als Vorsammelhilfe oder Fehlwurf in biogenen Abfällen stellen somit ein großes Problem für die Kompostierung dar, da die entstehenden Partikel durch das Ausbringen von Kompost in die Umwelt gelangen.

Aus den Erkenntnissen der Zugversuche kann geschlossen werden, dass die Veränderungen der Materialkennwerte im Laufe der Kompostierung bereits in der ersten Woche stattfinden. Bemühungen, den Rotteprozess zu beschleunigen, würden somit wenig Auswirkungen auf die Verwitterung der Kunststoffe haben.

LITERATURVERZEICHNIS

Brantner, J. (2024). *Untersuchungen zur Transformation von Kunststoffen in einer Kompostmiete*. Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft. Montanuniversität Leoben.

Einfluss der Behandlung im Rahmen der Nutzungsphase auf verschiedene Eigenschaften von Textilien

Celine Grabner¹, Thomas Fink¹, Hana Stipanovic¹ & Alexia Tischberger-Aldrian¹

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

KURZFASSUNG: Im vorliegenden Beitrag soll anhand von Beispielen gezeigt werden, ob sich Behandlungen von Textilien (z.B. Waschen/Trocknen, Flecken, UV-Strahlung) während der Nutzungsphase IR-spektroskopisch erfassen lassen. Dazu wurden 3 verschiedene T-Shirts mit unterschiedlicher Zusammensetzung verschiedenen Behandlungen unterzogen und die Spektren der neuwertigen Textilien mit jenen der behandelten verglichen.

1 EINLEITUNG

Durch den zunehmenden Fast-Fashion Konsum werden Kleidungsstücke trotz Funktionstüchtigkeit immer schneller ersetzt oder aussortiert. Die derzeit am Markt befindlichen, vielfach qualitativ minderwertigen Kleidungsstücke werden nicht einmal mehr halb so lange getragen wie noch vor 15 Jahren (Luptáčik et al. 2021), wodurch sich hohe Mengen an Textilabfällen ergeben. EU-weit sind dies rd. 5,8 Mio. Tonnen pro Jahr, dies entspricht EU-weit einem Durchschnitt von 11,3 kg/Person und Jahr (EU 2022). In Österreich beläuft sich die Menge auf ca. 13,4 kg/Person und Jahr (Tragler 2019).

Greenpeace (2015) berichtet, dass jede erwachsene Person in Deutschland rund 95 Kleidungsstücke (ohne Socken und Unterwäsche) im Kleiderschrank liegen hat. Etwa ein Drittel hat sogar 100 bis über 300 Teile zu Hause. Etwa 19 % der Kleidungsstücke werden quasi nie getragen. Noch einmal so viele werden nur selten getragen. Die Hauptbeweggründe für das Aussortieren von Bekleidung sind Unbrauchbarkeit (Verschleiß, kaputt, Flecken) (92 %), unpassende Größe (72 %), „gefällt nicht mehr“ (64 %), veränderter Modegeschmack (40 %) und „Platz schaffen für neue Kleidung“ (31 %). (Greenpeace 2015)

Allgemein können bei der Lagerung und Nutzung von Textilien oder Fasern über längere Zeit Eigenschaftsveränderungen verzeichnet werden. Die Veränderung der Textileigenschaften nimmt meist am Anfang der Nutzungsphase am stärksten zu und später nur mehr gering ab. Einer der Gründe für eine Alterung von textilen Fasern ist der Einfluss von sichtbarem und ultraviolettem Licht. Die Beständigkeit von Fasern gegenüber Lichteinwirkung kann dabei in fünf Qualitätsstufen (sehr gut, gut, ausreichend, kaum ausreichend und nicht ausreichend) eingeteilt werden. Dabei sind Polyester und Polyvinylchlorid sehr gut beständig, wohingegen Baumwolle nur ausreichend und Wolle, Viskose und Seide kaum ausreichend beständig sind. (Bobeth et al. 1993)

Auch während des Waschens von Kleidungsstücken kommt es zu unerwünschten Effekten wie Abnutzung, Form- und Farbveränderungen oder Alterung. Die durchschnittliche Waschtemperatur liegt in Europa bei etwa 43°C und ist somit höher als der Durchschnitt der meisten Länder. (Klepp et al. 2020)

Sowohl für die Wiederverwendung (ReUse) als auch für das Recycling ist von Bedeutung, was während der Nutzungsphase mit den Textilien passiert ist. Während bei der Wiederverwendung eher der Zustand des Kleidungsstücks von Bedeutung ist (z.B. Flecken, Risse, Verschlissen, Farben ausgewaschen) kann beim Recycling der Eintrag von bestimmten Stoffen (z.B. Schmierölen) relevant sein. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Frage, ob verschiedene „Spuren“ der Nutzungsphase (u.a. Waschen/Trocknen, diverse Verschmutzungen, UV-Strahlung) IR-spektroskopisch erfasst werden können.

2 MATERIAL UND METHODEN

Für den vorliegenden Beitrag wurden handelsübliche, neuwertige T-Shirts des Niedrig-Preis-Segments, welche aus drei verschiedenen Faserarten (s. Abbildung 1) bestehen, gekauft. Bei der Auswahl wurde auf hellere, bunte Farben mit einem hohen Anteil jeweils einer Faserart geachtet.

- T-Shirt 1: 100 % Baumwolle,
- T-Shirt 2: 100 % Polyester und
- T-Shirt 3: Mischung aus 95 % Viskose und 5 % Elasthan.

Diese T-Shirts wurden unterschiedlichsten Behandlungen (Waschen und Trocknen; UV-Strahlung, Befleckung) unterzogen.



Abb. 1: T-Shirt 1 (links), T-Shirt 2 (mittig) und T-Shirt 3 (rechts)

2.1 Behandlung „Waschen und Trocknen“

In Abbildung 2 ist der Versuchsablauf schematisch dargestellt. Vor der Behandlung wurde ein Stück aus den T-Shirts für die spektroskopischen Untersuchungen ausgeschnitten. Anschließend wurden die T-Shirts auf vier verschiedene Arten und Kombinationen jeweils 15-mal gewaschen und getrocknet (vgl. Tabelle 1). Die Textilien wurden jeweils bei 30 °C mit einem handelsüblichen Flüssigwaschmittel und mit/ohne Weichspüler gewaschen. Nach den Wasch- und Trocknungszyklen wurden die spektroskopischen Messungen der neuwertigen und behandelten Textilien durchgeführt. Die spektroskopischen Untersuchungen erfolgten für alle Behandlungen mittels FTIR (Agilent, Cary 630) und einem sensorgestützten Sortierer, ausgerüstet mit einer NIR-Kamera (EVK Helios NIR G2 320, Hyperspectral Imaging System, 930-1700 nm). Im nächsten Kapitel werden jedoch nur die Ergebnisse der FTIR-Messungen vorgestellt, die Ergebnisse der NIR-Messungen können in Grabner (2024) nachgelesen werden.

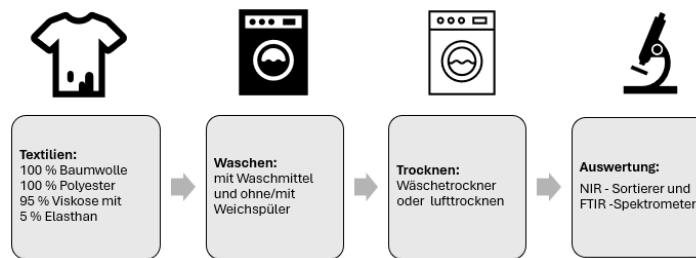


Abb. 2: Schematischer Versuchsablauf für den Behandlungsschritt „Waschen und Trocknen“

Tab. 1: Wasch- und Trocknungsarten

Behandlungsart	Art des Waschens	Art des Trocknens
1	30°C, Waschmittel ohne Weichspüler	lufttrocknen
2	30°C, Waschmittel ohne Weichspüler	Wäschetrockner
3	30°C, Waschmittel mit Weichspüler	lufttrocknen
4	30°C, Waschmittel mit Weichspüler	Wäschetrockner

2.2 Behandlung „UV-Strahlung“

Dieser Behandlungsschritt wurde an den neuwertigen T-Shirts vorgenommen. Dazu wurden von allen Textilien jeweils eine A4 große Probe entnommen, insgesamt also 3 Proben. Diese wurden über einen Zeitraum von ca. sechs Wochen im Freien auf eine sonnenexponierte Stelle gelegt und dort jeglichen Wetterbedingungen über 10 Regen-, 25 Sonnen- und 2 Schneetage ausgesetzt. Im Anschluss wurden sowohl die neuwertigen als auch die behandelten Textilien spektroskopisch untersucht.

2.3 Behandlung „Befleckung“

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die unterschiedlichen, neuwertigen T-Shirts mit fünf gängigen Alltagsflecken beschmutzt: Pflanzliches Öl, Kaffee, Kugelschreiber, Tomatensauce und Rotwein. Die spektroskopische Untersuchung erfolgte sowohl an den neuwertigen, unbefleckten als auch an den befleckten Textilien (sowohl ohne Waschen als auch nach Befleckung und Waschen mit einem Kurzprogramm von 15 Minuten bei einer Waschtemperatur von 20 C). Danach wurden diese erneut befleckt und wieder auf dieselbe Weise gewaschen. Anschließend wurden die spektroskopischen Untersuchungen an allen Proben durchgeführt.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Ergebnisse der Behandlung „Waschen und Trocknen“

In den folgenden Abbildungen 3, 4 und 5 sind die Spektren der drei verschiedenen T-Shirts jeweils vor und nach 15 Wasch- und Trocknungsvorgängen im Vergleich dargestellt. Bei T-Shirt 1 (100 % Baumwolle) ist zwischen dem neuwertigen und den behandelten Textilien eine geringe Intensitätsverschiebung bei ca. 800 nm festzustellen (s. Abbildung 3).

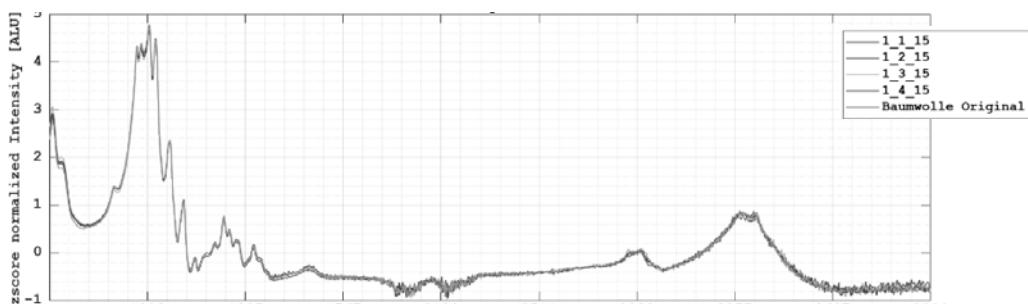


Abb. 3: Spektren T-Shirt 1 vor und nach 15 Wasch- und Trocknungsvorgängen (Original = neuwertig); x-Achse: Wellenzahl (cm^{-1})

Bei T-Shirt 2 (100 % Polyester) sind keine signifikanten spektralen Veränderungen zwischen neuwertigem und den gewaschenen Textilien ersichtlich (s. Abbildung 4). Bei T-Shirt 3 (95 % Viskose und 5 % Elasthan) sind die Veränderungen etwas ausgeprägter, im Bereich von ca. 700 bis 860 nm sowie bei etwa 1000 nm können Intensitätsverschiebungen zwischen neuwertigem und den behandelten Textilien verzeichnet werden. Auch um 3255 nm gibt es Intensitätsunterschiede (vgl. Abbildung 5).

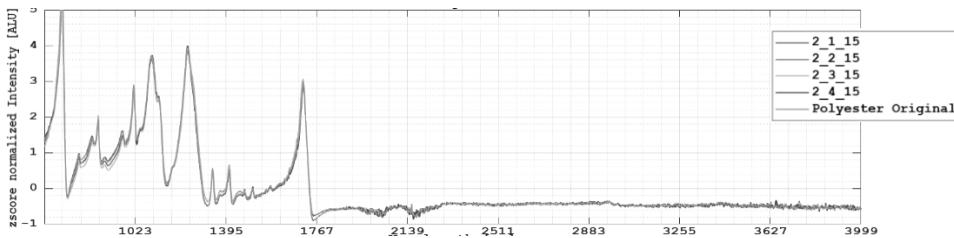


Abb. 4: Spektren von T-Shirt 2 vor und nach 15 Wasch- und Trocknungsvorgängen (Original = neuwertig); x-Achse: Wellenzahl (cm^{-1})

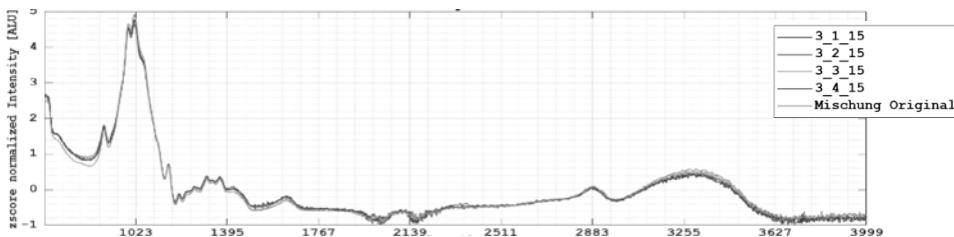


Abb. 5: Spektren von T-Shirt 3 vor und nach 15 Wasch- und Trocknungsvorgängen (Original = neuwertig); x-Achse: Wellenzahl (cm^{-1})

3.2 Ergebnisse der Behandlung „UV-Strahlung“

In Abbildung 6 werden die Spektren der neuwertigen T-Shirts jeweils mit jenen der behandelten verglichen. Bei T-Shirt 1 (100 % Baumwolle) kann in den Bereichen 800-900 nm und 3255 nm eine Intensitätsverschiebung festgestellt werden. Bei T-Shirt 2 (100 % Polyester) ist dies in den Bereichen 750-1000 nm und bei ca. 1300-1450 nm feststellbar. T-Shirt 3 zeigt im Bereich 700-860 nm und bei 3255 nm entsprechende Unterschiede zwischen neuwertigem und behandeltem Textil.

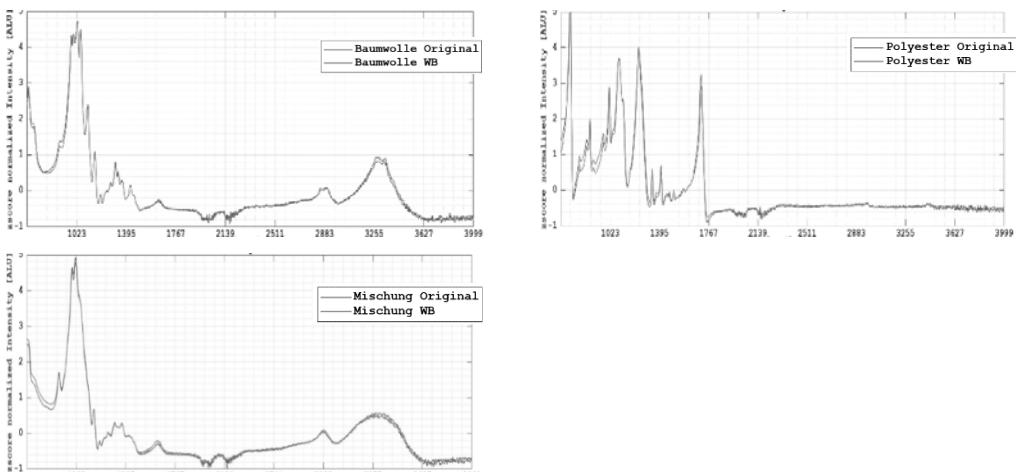


Abb. 6: Spektren von T-Shirt 1 (links oben), T-Shirt 2 (rechts oben), T-Shirt 3 (links unten) (Original = neuwertig, WB = behandelt); x-Achse: Wellenzahl (cm^{-1})

3.3 Ergebnisse der Behandlung „Befleckung“

In der Abbildung 7 sind die spektralen Verläufe mit verschiedenen Flecken auf den neuwertigen und den gewaschenen Textilien im Vergleich zu den sauberer, neuwertigen Textilien zu sehen. Erwartungsgemäß sind die ungewaschenen Ölklecken (Abbildung 7, links oben) deutlich vom neuwertigen, sauberer Baumwoll-Textil (T-Shirt 1) zu unterscheiden, nach dem Waschen sind die Unterschiede zwischen sauberem neuwertigem und beflecktem, gewaschenem Textil jedoch bereits deutlich geringer.

Die Kaffeeklecken waren bereits vor dem Waschen auf den zwei T-Shirts 1 und 3 spektral kaum vom neuwertigen, sauberer Textil zu unterscheiden. Bei T-Shirt 2 (100 % Polyester) (vgl. Abbildung 7, rechts oben) konnte allerdings beim ungewaschenen Kaffeekleck bei 2883 nm eine Veränderung des Spektrenverlaufs festgestellt werden, welche allerdings nach dem Waschen nicht mehr zu verzeichnen war.

Der Tomatensauce-Fleck (Abbildung 11) konnte bei T-Shirt 3 (95 % Viskose und 5 % Elasthan) auf der ungewaschenen Probe gut vom neuwertigen Textil unterschieden werden. Ebenso wie beim Kaffeekleck ist dieser Fleck jedoch nach den Waschgängen spektral nicht mehr deutlich. Lediglich Intensitätsunterschiede in einigen wenigen Wellenlängenbereichen lassen den Kaffeekleck erkennen.

Rotwein und Kugelschreiber konnten bei keinem der T-Shirts weder vor noch nach dem Waschen spektral von den neuwertigen Textilien unterschieden werden.

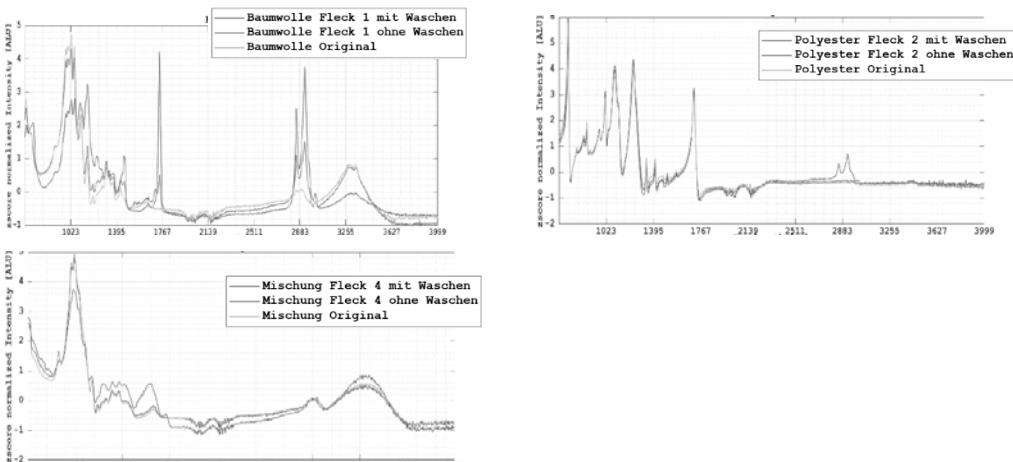


Abb. 7: Spektren von T-Shirt 1 (links oben) neuwertig und mit Ölkleck; T-Shirt 2 (rechts oben) neuwertig und mit Kaffeekleck; T-Shirt 3 (links unten) neuwertig und mit Tomatensauce-Fleck (Original = neuwertig); x-Achse: Wellenzahl (cm^{-1})

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die experimentellen Versuchsreihen zeigten, dass es z.T. möglich ist, „benutzte“ (gealterte) Textilien von neuwertigen mit IR-spektroskopischen Methoden zu unterscheiden. Großteils sind die beobachteten spektralen Intensitätsunterschiede auf einige Wellenlängenbereiche beschränkt und es muss erst noch durch weitere Referenzproben (Textilstücke vor und nach Behandlung) verifiziert werden, ob sich die Beobachtungen auch für andere Textilien bestätigen. Zudem wäre interessant, ob die Intensitätsunterschiede bei einer länger andauernden oder wiederholten Behandlung (z.B. 100 Mal waschen und trocknen) ausgeprägter zutage treten. In weiterer Folge ist zu erheben, ob gegebenenfalls eine systematische Unterscheidung von neuwertigen und gealterten Kleidungsstücken auf der Basis von IR in der Praxis für zumindest manche Fragestellungen möglich ist.

LITERATURVERZEICHNIS

- Bobeth, W., Berger, W., Jacobasch, H.-J., Faulstich, H., Fischer, P., Heger, A., Mally, A., Mikut, I. (1993) *Textile Faserstoffe - Beschaffenheit und Eigenschaften*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- EU (2022) *Factsheet on Textiles – Nachhaltige und kreislauffähige Textilien bis 2030*. Abrufbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/fs_22_2017 (zuletzt abgerufen am 06.08.2024).
- Grabner, C. (2024) *Einfluss der Behandlung im Rahmen der Nutzungsphase auf verschiedene Eigenschaften von Textilien*. Bachelorarbeit an der Montanuniversität Leoben.
- Greenpeace (2015) *Wegwerfware Kleidung*. Abrufbar unter: https://www.greenpeace.de/publikationen/20151123_greenpeace_modekonsum_flyer.pdf (zuletzt abgerufen am 06.08.2024).
- Luptáčik, P., Schneider, H.W., Pöchhacker-Tröscher, G., Scherk, J. (2021): *Anreize für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft im Textil- und Bekleidungssektor in Österreich – Analyse von Rahmenbedingungen, Instrumenten und Handlungsperspektiven*. Studie im Auftrag BMK.
- Klepp, I.G., Laitala, K., Wiedemann, S. (2020) *Clothing Lifespans: What Should Be Measured and How*. Sustainability, 12, 6219. <https://doi.org/10.3390/su12156219>.
- Tragler C (2019): *Factsheet Altkleidersammlung in Österreich – Clean Clothes Kampagne Österreich*. Abrufbar unter: https://www.cleanclothes.at/media/filer_public/57/9d/579d06d0-20c7-4f2f-a89a-d2fd8284b05f/factsheet_a_alkleidersammlung_2019-10.pdf (zuletzt abgerufen am 06.08.2024).

KONTAKT

Dr. Alexia Tischberger-Aldrian
alexia.tischberger-aldran@unileoben.ac.at

Formstabile Verpackungsabfälle aus Polyolefinen in der getrennten Sammlung in Österreich für 2021

Elisabeth Jahn, Viktoria Gabriel, Manuel Pfitzner, Katrin Detter & Martin Novak
FH Campus Wien, Fachbereich Verpackungs- und Ressourcenmanagement, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Bis 2030 sollen 55 % der Kunststoffverpackungen recycelt werden. Die Sammlung und Sortierung von Abfällen sind wichtige Schritte für eine Kreislaufwirtschaft. Aktuell können Kunststoffverpackungen aus Polypropylen (PP), high-Density Polyethylen (HDPE) und Polystyrol (PS) nicht wieder für qualitativ hochwertige Anwendungen, wie Verpackungen von Lebensmitteln eingesetzt werden. Analysen der getrennten Sammlung wurden an unterschiedlichen Standorten in Österreich durchgeführt. Daten zu Material, Form, Food oder Non-Food, Farbe, Verschlüssen und Kennzeichnung wurden erhoben. Die Ergebnisse zeigen die Zusammensetzung der getrennten Sammlung im Jahr 2021, es wurden 251 kg analysiert. Verpackungen aus Polyolefinen und Polystyrol betragen rund 14 % der österreichischen getrennten Sammlung (PP: 8,6 %, HDPE: 4 %, PS: 1,3 %). Die Zusammensetzung der Fraktionen variiert stark. PP setzt sich zu zwei Dritteln aus Lebensmittelverpackungen in Form von Bechern und Trays zusammen, HDPE hat einen hohen non-food Hohlkörperanteil. Die PS-Fraktion besteht hauptsächlich aus Bechern, die für Lebensmittel verwendet werden. Aus den Daten kann das Recyclingpotential abgeleitet werden. Es zeigt sich, dass für einen geschlossenen Kreislauf Maßnahmen wie Design4Recycling notwendig sind.xx

1 EINLEITUNG

Verpackungen und Verpackungsabfälle sind in unserem täglichen Leben allgegenwärtig, im Jahr 2022 wurden europaweit 54 Mt Kunststofferzeugnisse produziert. Der Anteil von Verpackungen beträgt 39 % (Plastics Europe 2023). Die Entsorgung von Kunststoffverpackungsabfällen wurde 2023 in Österreich umgestellt und wird in den nächsten Jahren weiter vereinheitlicht. Alle Verpackungen aus Kunststoff sollen österreichweit in der Leichtverpackungssammlung entsorgt werden (ARA 2022). Ab 2025 wird ein Pfandsystem für PET Getränkeflaschen und Metalldosen eingeführt, womit sich das Abfallaufkommen maßgeblich ändern wird (BMK 2023).

Die österreichische Leichtverpackungsfaktion (LVP), auch bekannt als gelber Sack oder gelbe Tonne, verzeichnete 241 630 t im Jahr 2022 (Bernhardt et al. 2024). Mit Hilfe des Recyclings sollen Materialien für gleichwertige Produkte eingesetzt werden (Morseletto 2020). Die Abfallwirtschaft im Sinne einer korrekten Sammlung und Sortierung ermöglichen weitere Schritte zum Wiedereinsatz von Verpackungen. Das FFG geförderte Forschungsprojekt „Pack2theLoop“ der Förderschiene Collective Research verfolgt dieses Ziel für formstabile Verpackungen aus Polyolefinen und Polystyrol. Das Kreislaufwirtschaftspaket der Europäischen Union fordert in den nächsten Jahren von den Mitgliedsstaaten höhere Recyclingquoten für Verpackungsabfälle. Für Kunststoffverpackungen soll laut der europäischen Richtlinie über Verpackungen und Verpackungsabfälle die Recyclingquote im Jahr 2025 bei 50 % liegen und 5 Jahre später bei 55%. In Österreich liegt die Recyclingquote in 2022 bei 24,5 % (Bernhardt et al. 2024).

2 MATERIAL UND METHODEN

Im Jahr 2021 wurde an drei unterschiedlichen Standorten von österreichischen Abfallsortieranlagen Analysen der Leichtfraktion aus der Verpackungssammlung durchgeführt. Es wurden Proben aus den Post-Consumer Abfällen untersucht. Die dafür verwendeten Mengen stammen aus Niederösterreich, Tirol und Burgenland und wurden in den Monaten Juli, Oktober und Dezember durchgeführt, um die jährlichen Schwankungen abzudecken.

Aus dem gelben Sack und der gelben Tonne wurde eine Menge von etwa 251 kg entnommen. Repräsentative Ergebnisse der Sortieranalysen wurden für Massenströme mit mindestens 1,1 m-% im Gelben Sack generiert. Im ersten Schritt wurden formstabile Verpackungen aus High-Density-Polyethylen (HDPE), Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS) entnommen und deren Aufkommen genauer analysiert. Zur Identifikation der Polymertype wurde der Recycling-Code herangezogen. Nicht umgehend identifizierbare Kunststoffverpackungen im Gelben Sack wurden mittels Hand-NIR (microPHAZIR von Thermo Scientific) oder anschließend im Labor mittels FTIR (Fourier-Transformations-Infrarot Spektrometrie; PerkinElmer, Spectrum TWO MR-KBR) identifiziert und den betreffenden Verpackungskategorien zugeordnet. Verpackungsmerkmale wie Form, Food oder Non-Food, Farbe und Packhilfsmittel (Etikettierung und Verschlüsse) wurden im Detail analysiert. Dabei wurde die Stückzahl und das Gewicht der Verpackungen erhoben.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Im Rahmen der drei Sortierversuche im Jahr 2021 wurden insgesamt 251 kg an drei verschiedenen Standorten analysiert. Kumuliert ergab sich, dass rund 14 m-% der getrennten Sammlung auf die Zielfraktionen formstabiler Kunststoffverpackungen aus PP, HDPE und PS entfallen (Abbildung 1). Der größte Anteil dieser besteht aus PP mit 8,6 m-%, gefolgt von HDPE mit 4 m-% und PS mit 1,3 m-%. Die restlichen 86 m-% wurden nicht im Detail analysiert, es waren überwiegend Verpackungsabfälle aus PET, Metallen, Getränkeverbundkartons, flexible Kunststoffverpackungen, sowie ein erheblicher Anteil an Lebensmittelresten und Fehlwürfen, deren Entsorgung nicht über die Leichtverpackungssammlung vorgesehen ist (BMNT 2019).

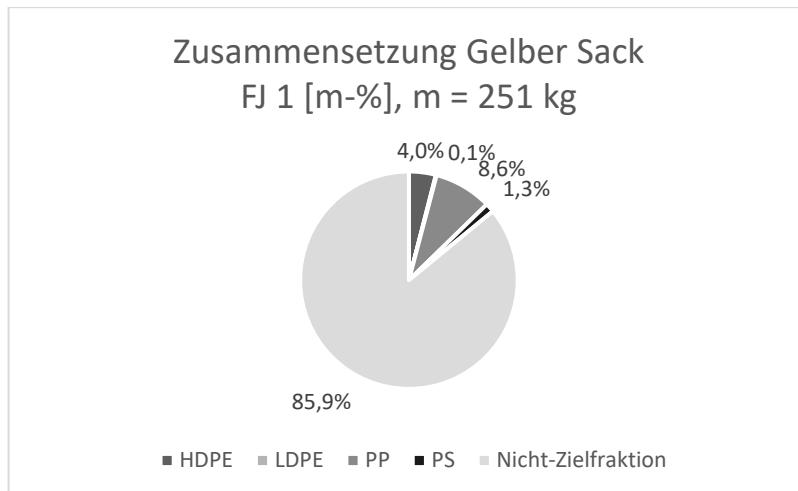


Abb. 1: Zusammensetzung des Gelben Sacks im Jahr 2021 hinsichtlich der gesuchten Zielfraktion form stabiler PO und PS Verpackungen

3.1 Zusammensetzung nach Formen und Anwendung

Abbildung 2 zeigt die Aufteilung der Polyolefine und von Polystyrol nach Verwendung und nach Formen. Formstabile Verpackungen aus PP sind der größte Anteil der Zielfraktion, nämlich 61 m-%, ungefähr zwei Drittel davon entfallen auf Lebensmittelverpackungen, das andere Drittel auf Non-food Verpackungen. PP Verpackungen sind Trays und Becher aus dem Lebensmittelbereich, der Anteil von Hohlkörper ist geringer. Im Vergleich dazu kann man bei der

Zusammensetzung von PP non-food Verpackungen andere Ergebnisse beobachten, es treten vorrangig Hohlkörper auf.

Betrachtet man die zweitgrößte Fraktion, 28 m-% HDPE, zeigt sich ein homogeneres Bild. Formstabile HDPE-Verpackungen im gelben Sack sind überwiegend Hohlkörper aus dem Nicht-Lebensmittelbereich. Der Anteil an Verpackungen, die für Lebensmittel eingesetzt werden, ist bei HDPE gering. Die geringste Zielfraktion sind formstabile PS Verpackungen, diese machen 8,8% der Zielfraktionen aus, der Großteil davon sind food Becher. Die Ergebnisse für PS food Becher sind mit einer höheren Ungenauigkeit zu interpretieren, da diese mit rund 1,0 m-% knapp unterhalb der repräsentativen Mindestprobenmenge des Gesamtinputmaterials liegen.

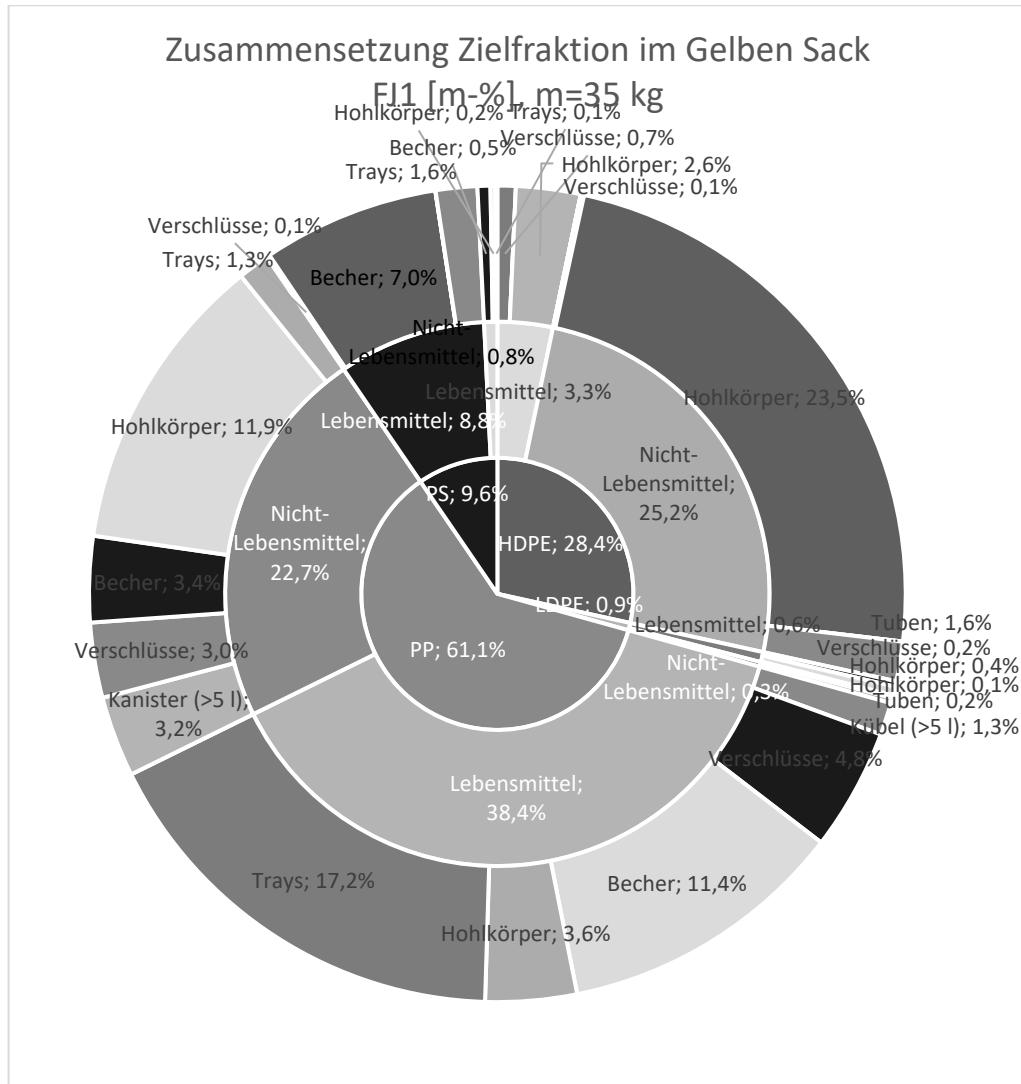


Abb. 2: Zusammensetzung formstabiler PO & PS Verpackungsabfälle im gelben Sack im Jahr 2021 nach Polymertype, Herkunft (Lebensmittel (food) oder Nicht-Lebensmittel (non-food) sowie Verpackungsform des Hauptverpackungskörpers. Dargestellte Werte in m-%. Färbige Bereiche = repräsentative Ergebnisse, graue Bereiche = nicht repräsentative Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Studie sind nur zum Teil mit anderen Studien vergleichbar, da diese Studie die LVP-Haushaltssammlung mit dem gelben Sack fokussiert und daher größere Gebinde aus der gelben Tonne von haushaltähnlichen Einrichtungen nicht repräsentativ sein könnten. Während die Massenanteile für PS in der getrennten Sammlung mit Van Eygen et al. (2018) vergleichbar sind, gibt es wesentliche Unterschiede bei HDPE und PP, dass den Umstand fehlender größerer Gebinde aufzeigt. Van Eygen et al. (2018) identifizierte, dass HDPE sich aus 45 % kleine HK, 25 % große HK und 31 % anderen Abfällen sowie PP zu 74 % kleine HK und 26 % große HK in der getrennten Sammlung zusammensetzt (van Eygen 2018), während diese Studie den Anteil kleiner HK für HDPE von rund 91 m-% und für PP von 80 m-% bezifferte und bei PP ein wesentlicher Anteil auf lose Verschlüsse mit 13 m-% entfällt.

3.2 Zusammensetzung formstabilen PO und PS Verpackungsabfälle hinsichtlich Farbe und Art des Labellings

Folgendes Kapitel stellt Detailanalysen der oben erwähnten Verpackungen dar, auf die Farbgebung und die Arten des Labellings der Verpackungen wird eingegangen.

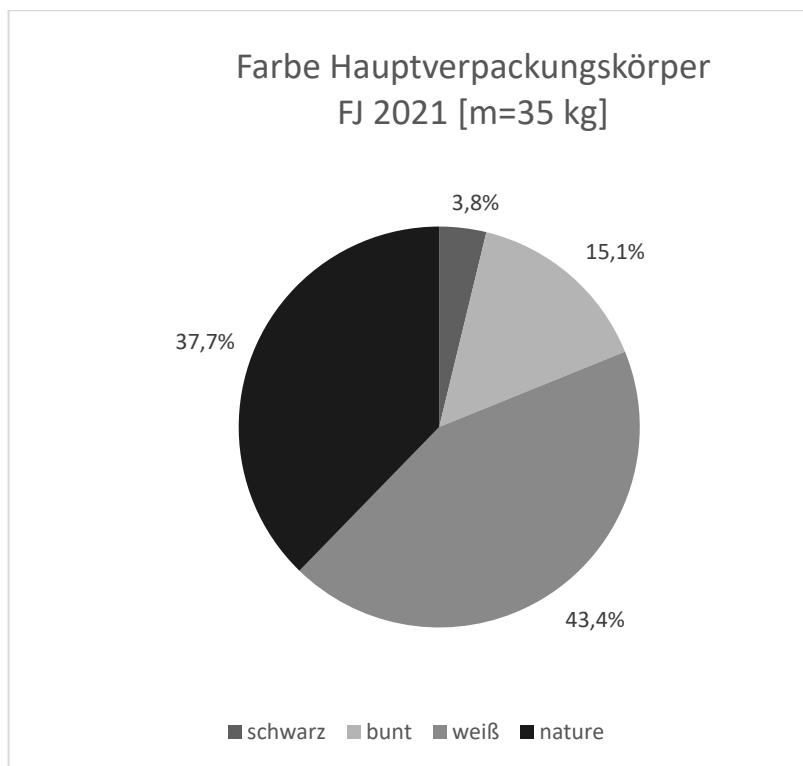


Abb. 3: Färbung des Hauptverpackungskörpers formstabilen PO und PS-Verpackungsabfälle im gelben Sack im Jahr 2021. Dargestellte Werte in m-%

Abbildung 3 zeigt die Färbung des Hauptverpackungskörpers. Der Großteil aller Verpackungen ist weiß oder naturbelassen. Rund 15% der Zielfraktionen sind eingefärbt und ein Anteil von 3,8 m-% sind schwarze Verpackungen. Angesichts der Tatsache, dass schwarze Verpackungen und

viele verschiedene Farben für das weitere Recycling schlecht oder wenig geeignet sind, ist dies doch ein erheblicher Anteil (Gürlich et al. 2022).

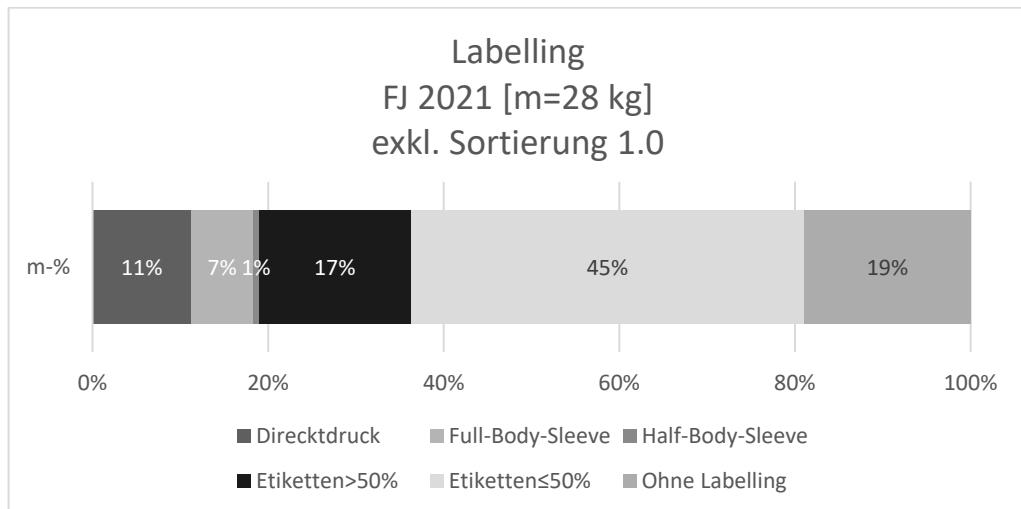


Abb. 4: Art des Labellings formstabiler PO & PS-Verpackungsabfälle im gelben Sack im Jahr 2021. Dargestellte Werte in m-% (DP = direct print, FBS = full body sleeve und HBS = half body sleeve)

Hinsichtlich der Art des Labellings wird deutlich, dass der größte Anteil mit Selbstklebetiketten versehen ist, und lediglich 19 % ohne Etikett sind (Abbildung 4). Labels erfüllen die Kommunikationsfunktion (Kaßmann 2020).

Betrachtet man die Daten in Hinblick für die weitere Wertschöpfungskette, ist die Zusammensetzung des gelben Sacks inhomogen. Zu beachten ist allerdings, dass es sich hier um den Input handelt und nicht um bereits sortierte Fraktionen, welche an Recycler weitergegeben werden. Die erhobenen Daten zeigen, dass verschiedene Formen, Farben und Labellingarten für Polyolefine und Polystyrol eingesetzt werden. Das Thema recyclingfähiger Verpackung ist nach wie vor von großem Interesse. Vergleicht man diese Daten mit den Aussagen im Hinblick für weiteres Recycling, wird rasch klar, dass weitere Sortierungen notwendig sind. Für qualitativ hochwertige Rezyklate ist ein homogenes Inputmaterial notwendig (Mager et al. 2023). Schlossnikl et al (2023) untersucht die Auswirkung von Etiketten auf den Recyclingprozess. Die Versuche zeigten gerade Etiketten können den Recyclingprozess von Polyolefinen, genauer genommen deren Verarbeitbarkeit erschweren. Pigmente führen zu Veränderungen im Infrarotspektrum und die inhomogene Zusammensetzung erschwert die Maschinengängigkeit (Schlossnikl et al. 2023).

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Aus den dargestellten Ergebnissen der manuellen Sortieranalyse des gelben Sacks im Jahr 2021 kann entnommen werden, dass rund 14 m-% auf die Zielfraktion der formstabilen Verpackungen aus PO und PS entfallen. Es konnte gezeigt werden, dass die Inputströme nach Polymertype und Verpackungsform sehr heterogen sind. Für formstabile Lebensmittelverpackungen aus PO und PS sind Becher und Trays die repräsentative Verpackungsform, während bei Nicht-Lebensmittelverpackungen überwiegend Hohlkörper eingesetzt werden. Hinsichtlich der Farbe es Hauptverpackungskörpers konnte aufgezeigt werden, dass die gesuchte Zielfraktion bereits überwiegend weiß bzw. 'nature' gefärbt ist, während bei der Art des Labellings ein wesentlicher Anteil an

Etiketten auftritt, das sich auf weitere Aufbereitungsschritte sowie die Rezyklatqualität negativ auswirken könnte.

Weiterer Forschungsbedarf liegt in weiteren Erhebungen, um die Veränderungen der Zusammensetzung der gesuchten Zielfaktion aufzuzeigen und das Potenzial für „Design For Recycling“ Maßnahmen für bestimmte Verpackungskategorien aufzuzeigen. Des Weiteren muss für weitere Aussagen die Zusammensetzung für Outputfraktionen betrachtet werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- ARA (2022): Vereinheitlichung der Verpackungssammlung in Österreich ab 2023. Online verfügbar unter https://www.ara.at/news/vereinheitlichung_verpackungssammlung_2023, zuletzt aktualisiert am 05.07.2024, zuletzt geprüft am 09.07.2024.
- Bernhardt, Antonia; Brandstätter, Christian; Broneder, Carina; Gold, Catherine; Neubauer, Christian; Oliva, Judith et al. (2024): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich,. Statusbericht 2024 für das Referenzjahr 2022. Hg. v. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- BMK, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2023): Pfandsystem für Österreich geht in Umsetzung. Online verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/service/presse/gewessler/2023/20230925_pfandsystem.html, zuletzt aktualisiert am 10.07.2024, zuletzt geprüft am 10.07.2024.
- BMNT, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019): Abfall Trenn-ABC.
- Gürlich, Ulla; Kladnik, Veronika; Pavlovic, Katharina (2022): Circular Packaging Design Guideline. Empfehlungen für recyclinggerechte Verpackungen. Hg. v. FH Campus Wien.
- Kaßmann, Monika (Hg.) (2020): Grundlagen der Verpackung. Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Beuth Verlag GmbH (Beuth Praxis).
- Mager, Moritz; Berghofer, Michael; Fischer, Joerg (2023): Polyolefin Recyclates for Rigid Packaging Applications: The Influence of Input Stream Composition on Recyclate Quality. In: *Polymers* 15 (13). DOI: 10.3390/polym15132776.
- Morseletto, Piero (2020): Targets for a circular economy. In: *Resources, Conservation and Recycling* 153, S. 104553. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104553.
- Plastics Europe (2023): Plastics – the fast Facts 2023. Online verfügbar unter <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>, zuletzt aktualisiert am 19.10.2023, zuletzt geprüft am 11.04.2024.
- Schlossnikl, Jessica; Pinter, Elisabeth; Jones, Mitchell P.; Koch, Thomas; Archodoulaki, Vasiliki-Maria (2023): Unexpected obstacles in mechanical recycling of polypropylene labels: Are ambitious recycling targets achievable? In: *Resources, Conservation and Recycling* 200, S. 107299. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107299.
- van Eggen, Emile (2018): Management of plastic wastes in Austria: analysis of the status quo and environmental improvement potentials. TU Wien.

Recycling von metallurgischem Staub unter Anwendung von biologischer Laugung und Bioelektrochemische Metallrückgewinnung

Rebeka Frueholz¹, Sabine Spiess¹, Christian Weiss², Johannes Schenk³, Jan Eisenbacher-Lubensky³, Dominik Wolmuth⁴, Josephine Mueller⁵ & Marianne Haberbauer¹

¹⁾ K1-MET GmbH, Linz, Österreich

²⁾ Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben, Österreich

³⁾ Lehrstuhl für Eisen- und Stahlmetallurgie, Montanuniversität Leoben, Österreich

⁴⁾ voestalpine Stahl Donawitz GmbH, Donawitz, Österreich

⁵⁾ voestalpine High Performance Metals GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die Kombination aus biologischer Laugung und bioelektrischer Rückgewinnung bietet eine innovative Methode zur Gewinnung von Metallen als sekundäre Rohstoffe aus Stahlwerksstäuben. Erste Versuche in einem Reaktor ergaben, dass bei einer eingesetzten Staubkonzentration von 2,5% bis zu 80% des Zinks gelöst werden konnte. Durch das Ausfällen von Eisen aus der Laugungslösung im ersten Schritt kann die zinkreiche Lösung für die bioelektrochemische Metallrückgewinnung weiterverwendet werden, um Zink mit einer Effizienz von $99,8 \pm 0,1\%$ an der Kathode abzuscheiden.

1 EINLEITUNG

Während der Stahlproduktion fallen große Mengen an Stahlwerksstäuben an, die wertvolle Metalle wie Zink (Zn) und Eisen (Fe) enthalten und ein erhebliches Recyclingpotenzial bieten. Innerhalb der EU sind 2019 etwa 52 Millionen Tonnen Stahlnebenprodukte angefallen, der größte Teil davon als Schlacke (Rieger et al., 2021). Ein Großteil der erzeugten Stäube wird deponiert, zum Beispiel werden nur etwa 40-45% der jährlich anfallenden Elektrolichtbogenöfen (EAF) Stäube wiederverwertet (Antrekowitsch & Schneeberger, 2013). Die Aufarbeitung von Stahlwerksstäuben erfolgt derzeit mit energieintensiven pyrometallurgischen Verfahren wie dem Waelz Prozess, jedoch könnten biohydrometallurgische Ansätze wie die biologische Laugung eine innovative Alternative darstellen (Antrekowitsch & Rösler, 2018).

Die biologische Laugung (auch „Bioleaching“ genannt) ist ein biotechnologisches Verfahren, bei dem Mikroorganismen zur Extraktion von Metallen aus mineralischen oder industriellen Abfällen eingesetzt werden. Diese Mikroorganismen produzieren Säuren oder andere Metabolite, die Metallionen aus dem festen Material herauslösen und die Metalle extrahieren. Die Rückgewinnung der Metalle aus der Lösung kann wiederum mithilfe von bioelektrochemischen Systemen erzielt werden. Die bioelektrochemische Metallrückgewinnung nutzt Mikroorganismen zur Energieerzeugung an der Anode, um metallische Ionen aus Lösungen an der Kathode zu reduzieren und abzuscheiden, was eine umweltfreundliche Methode zur effizienten Metallrückgewinnung aus Abfallströmen darstellt.

1.1 Methodenbeschreibung

Im geförderten Projekt INNOMET wird eine innovative Metallrückgewinnung aus metallurgischen Reststoffen angestrebt, indem eine semi-kontinuierliche Behandlungskombination aus biologischem Laugen durch Mikroorganismen und nachfolgender Metallrückgewinnung (bioelektrochemische Abscheidung bzw. fraktionierte Fällung) angewendet wird.

1.1.1 Biologische Laugung der Metalle

Für die biologische Laugung können chemolithotrophe Bakterien wie *Acidithiobacillus thiooxidans* aber auch thermophile Arten wie *Sulfovibrio thermophilus* eingesetzt werden. Als Energiequelle dient supplementierter elementarer Schwefel, der im Zuge von Oxidationsreaktionen zu Sulfat umgewandelt wird (siehe Formel 1) (Johnson, 2009). Durch die Entstehung von Sulfat erfolgt eine Ansäuerung des Milieus, welches wiederum die Laugung von leicht löslichen Zinkoxiden aus der Staubmatrix begünstigt (siehe Formel 2) (Trung et al., 2011). Da Eisenverbindungen oft schwerer löslich sind, verbleiben diese im Staubrückstand und führen zu einer Eisenanreicherung, was für die interne Rückführung des Staubes in den Stahlwerksprozess von Vorteil ist (Kukurugya et al., 2015).



Man unterscheidet allgemein zwischen der direkten und indirekten biologischen Laugung. Für die indirekte Laugung werden die Bakterien kultiviert und die produzierte Säure anschließend abfiltriert und dann in einem separaten Ansatz für die Laugung verwendet. Wohingegen die Mikroorganismen beim direkten Laugungsansatz nach einer Vorkultivierungszeit direkt mit den Stäuben in Kontakt gebracht werden. Hierdurch sind diese in der Lage, den pH-Wert zu senken, was sich wiederum positiv auf die Metalllaugung auswirkt.

Nach einer Reihe von Batchversuchen, wurde ein Reaktor mit 3 L Kultivierungsmedium aufgebaut und mit dem Bakterienstamm *Acidithiobacillus thiooxidans* inkuliert. Nach einer Vorkultivierungszeit von etwa einer Woche, wurde der Staub hinzugefügt. Nach zwei Wochen wurde der Reaktor entleert, wobei 300 mL der Bakterien-Staub-Suspension zentrifugiert wurde, und als Inkubum für den nächsten Ansatz Anwendung fand. Eine schrittweise Steigerung der Staubkonzentration führte zu einer Adaption der Bakterien an die erhöhte metallbelastete Umgebung. In Abbildung 1 sind die vorläufigen Ergebnisse der ersten beiden Laugungsdurchgänge abgebildet.

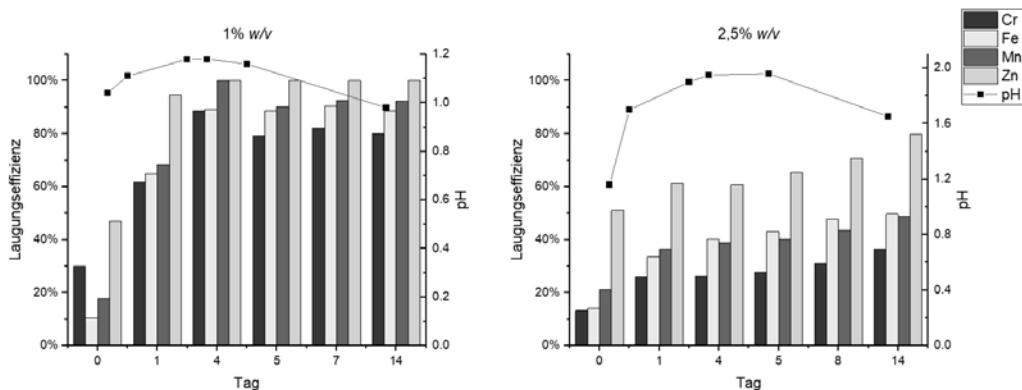


Abb. 1: Laugungseffizienz und pH Verläufe bei 1% und 2,5% Staubkonzentration

Die niedrigere Staubkonzentration (1% w/v) bewirkt einen weniger starken pH Anstieg, während Zn nach Tag 2 zu 95% gelautet wird. Bei der höheren Staubkonzentration (2,5% w/v) ist ein pH Anstieg bis 1,96 und eine maximale Zn Laugung von 80% nach 14 Tagen zu beobachten. Allerdings gingen erhebliche Mengen an Fe in Lösung, welche im nächsten Schritt entfernt

werden müssen. Überdies sind weitere Laugungsansätze mit höheren Staubkonzentrationen am Laufen.

1.1.2 Bioelektrochemische Metallrückgewinnung

Im nächsten Prozessschritt wurde versucht, die Metalle selektiv aus der metallhaltigen Laugungslösung rückzugewinnen. Dafür wurde ein synthetisches Leachate mit pH 2 und den folgenden Metallkonzentrationen simuliert (0.8 g/L Zn und 0.3 g/L Fe), um erste Erkenntnisse über die Rückgewinnungseffizienz zu bekommen. Anschließend wurde mittels Oxidation und fraktionierter Fällung das Eisen zu ca. 96% durch Zudosierung von Lauge ausgefällt. Die eisenarme Lösung wurde im Anschluss in die Kathodenkammer eines bioelektrochemischen Systems gefüllt und eine Edelstahlelektrode wurde als Kathode angebracht. Die Karbonfilzanode des bioelektrochemischen Systems wurde von elektroaktiven Mikroorganismen besiedelt, die organische Substanzen (z.B. Abwasser) abbauen. Die dabei freiwerdenden Elektronen können von den Mikroorganismen auf die Elektrode übertragen werden, was einen geringeren Energiebedarf für die Zn Rückgewinnung zur Folge hat. Das bioelektrochemische System wurde im Batch betrieben und zweimal wöchentlich wurde der Anolyt (= Elektrolyt im Bereich der Anode) zu 50% ausgetauscht und frisches synthetisches Abwasser zugegeben, wohingegen der Katholyt (= Fe-arme Lösung) zur Gänze gewechselt und das abgeschiedene Zn von der Elektrode abgelöst wurde. Im Anschluss wurden Kennwerte wie die Zn Rückgewinnungseffizienz, die CSB (=chemischer Sauerstoffbedarf) Abbaueffizienz und die Coulombsche Effizienz (CE) berechnet (s. Abbildung 2). Im Mittel wurde eine Zn Rückgewinnungseffizienz von $99,8 \pm 0,1\%$, eine CSB-Abbaueffizienz von $86,1 \pm 3,8\%$ und eine CE_{Kathode} von $56,1 \pm 2\%$ erzielt.

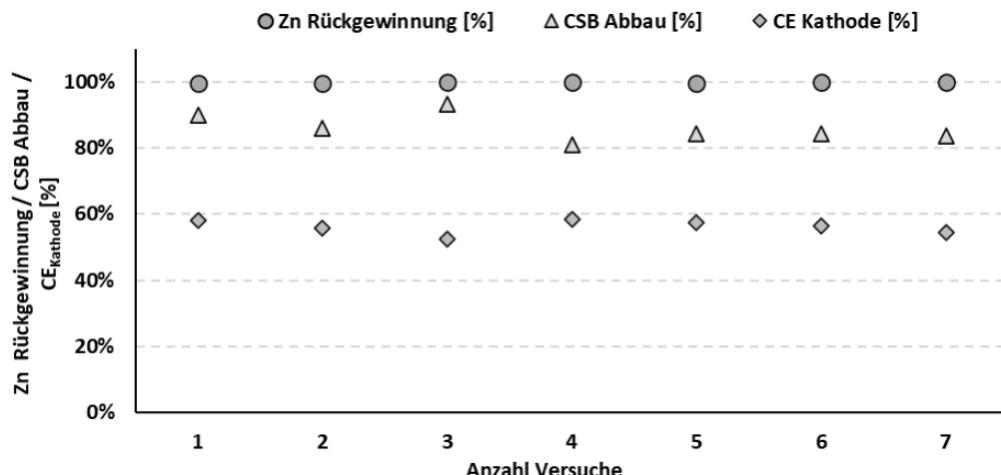


Abb. 2: Zn Rückgewinnungseffizienz, CSB-Abbaueffizienz und CE_{Kathode} des bioelektrochemischen Systems zur Metallrückgewinnung

2 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die Kopplung von biologischer Laugung und bioelektrochemischer Rückgewinnung stellt eine innovative Methode für die Gewinnung und Wiederverwendung von Metallen aus sekundären Rohstoffen dar. Im Zuge dieses Projekts INNOMET wurden Reaktorversuche mit *A.thiooxidans* durchgeführt, um Zn aus der Staubmatrix herauszulösen und die Mikroorganismen an die erhöhten Metallbedingungen zu adaptieren. Bei einer eingesetzten Staubkonzentration von 2,5%, konnte eine maximale Zn Laugung von 80% erreicht werden. Dennoch erfolgte die Zn Laugung noch nicht selektiv genug, um die Lösung direkt für die bioelektrochemische

Metallrückgewinnung einzusetzen. Daher wurde Fe aus einer vorerst synthetischen Lösung ausgefällt und anschließend Zn in einem bioelektrochemischen System an der Kathode im Mittel zu $99,8 \pm 0,1\%$ rückgewonnen.

Funding: Dieses Projekt INNOMET wird durch das Land Steiermark (Zukunftsfoonds Steiermark) gefördert (Fördervertrag PN 1507). Des Weiteren bedanken sich die Autoren für die finanzielle Unterstützung der K1-MET GmbH, Metallurgical Competence Center. K1-MET ist ein COMET-Zentrum im Rahmen des COMET – Competence Centers for Excellent Technologies Programms und wird vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie; dem Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft; den Bundesländern Oberösterreich, Steiermark und Tirol sowie der Steirischen Wirtschaftsförderungsgesellschaft m.b.H. (SFG) und der Standortagentur Tirol gefördert. Außerdem danken wir der Upper Austrian Research GmbH für die kontinuierliche Unterstützung.

LITERATURVERZEICHNIS

- Antrekowitsch, J., Schneeberger, G. (2013). Recovery of Zinc and Iron from Steel Mill Dusts by the use of a TBRC: A possible Mini-mill Solution?
- Antrekowitsch, J., Rösler, G. (2018). Steel Mill Dust Recycling in the 21st Century. <https://doi.org/10.26649/musci.2015.018>
- Johnson, D. B. (2009). Extremophiles: Acidic Environments. In Encyclopedia of Microbiology (pp. 107–126).
- 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, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.03.008>
- Rieger, J., Colla, V., Matino, I., Branca, T. A., Stubbe, G., Panizza, A., Brondi, C., Falsafi, M., Hage, J., Wang, X., Voraberger, B., Fenzl, T., Masaguer, V., Faraci, E. L., Di Sante, L., Cirilli, F., Loose, F., Thaler, C., Soto, A., Snaet, D. (2021). Residue valorization in the iron and steel industries: Sustainable solutions for a cleaner and more competitive future europe. In *Metals* (Vol. 11, Issue 8). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/met11081202>
- Trung, Z. H., Kukurugya, F., Takacova, Z., Orac, D., Laubertova, M., Miskufova, A., Havlik, T. (2011). Acidic leaching both of zinc and iron from basic oxygen furnace sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 192(3), 1100–1107. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.016>

KONTAKT

Msc. Rebeka Frühholz
rebeka.frueholz@k1-met.com
+43 (0) 664 88339951
PhD Researcher
K1-MET GmbH
www.k1-met.com

Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen im forstlichen Wegebau

Kerstin Pfandl¹ & Ingrid Winter¹

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

KURZFASSUNG: Bau- und Abbruchabfälle gehören zu den massereichsten Abfallströmen in Österreich. Neben dem Verwertungsgebot und den Zielvorgaben für Bau- und Abbruchabfälle, sieht der Gesetzgeber seit Anfang 2024 ein Deponierungsverbot für ausgewählte mineralische Abfälle vor (§ 16 Abs. 7 Z1 AWG 2002, Anhang 1a AWG 2002 und § 7 Z14 DVO 2008). Eine Verwertungsmöglichkeit für mineralische Bau- und Abbruchabfälle ist es, diese zu qualitätsgesicherten Recycling-Baustoffen aufzubereiten, um sie u.a. im forstlichen Wegebau einzusetzen. Der Beitrag fasst ausgehend von der aktuellen abfallwirtschaftlichen Praxis zusammen, wie eine sachgerechte Verwertung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen bzw. den daraus hergestellten Recycling-Baustoffen im forstlichen Wegebau im Großen wie im Kleinen umgesetzt werden kann und welche Aspekte dabei zu beachten sind (rechtliche Vorgaben, erforderliche Qualitäten, Zuständigkeiten etc.). Der Fokus liegt auf Recycling-Baustoffen aus vorwiegend rezyklierten Ge steinskörnungen gemäß Vorgaben der Recycling-Baustoffverordnung. Zudem wird aufgezeigt, welches zukünftige Potenzial für diesen Verwertungsweg abgeschätzt werden kann.

1 EINLEITUNG

Im Jahr 2020 fielen gemäß BMK (2023) rd. 11,4 Millionen Tonnen bzw. durchschnittlich rd. 1.300 kg pro Einwohner mineralische Bau- und Abbruchabfälle (ohne Aushubmaterialien, Holzabfälle, Verpackungen, Kunststoffabfälle, Metallabfälle, gemischte Siedlungsabfälle, künstliche Mineralfasern, Asbest und sonstige gefährliche Abfälle) an. Seit 2015 stieg demnach das Aufkommen um 14,0 % an. Für das Jahr 2026 wird ein weiterer Zuwachs erwartet. Das geschätzte Aufkommen für 2026 liegt bei rd. 14,7 Millionen Tonnen. (BMK 2023)

Sollen mineralische Bau- und Abbruchabfälle bzw. daraus hergestellte Recycling-Baustoffe für den forstlichen Wegebau z.B. im Zuge der Errichtung oder Instandhaltung zum Einsatz kommen, gilt es eine Vielzahl rechtlicher und fachlicher Aspekte zu berücksichtigen. Diese wurden im Rahmen der besonderen Grundausbildung der Erstautorin im Amt der Steiermärkischen Landesregierung erarbeitet und dienen als Grundlage für den vorliegenden Beitrag (Pfandl 2023), der zum einen zeigt, wie eine sachgerechte Verwertung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen bzw. daraus hergestellten Recycling-Baustoffen umgesetzt, zum anderen, welches zukünftige Potenzial für diesen Verwertungsweg abgeschätzt werden kann.

2 FORSTWEGEBAU IN ÖSTERREICH

2.1 Arten von Forstwegen

Im forstlichen Wegebau wird zwischen Forststraßen, Traktorwegen und Rückegassen unterschieden (Rottensteiner 2018). Forststraßen im Sinne des Forstgesetzes 1975 (ForstG) zählen gemäß § 59 Abs. 1 ForstG zu den forstlichen Bringungsanlagen. Sie dienen dem wirtschaftlichen Verkehr innerhalb von Wäldern und der Verbindung von Waldbeständen mit dem öffentlichen Straßennetz, können mit Kraftfahrzeugen oder Fuhrwerken befahren werden, werden für die Dauer von mehr als einem Jahr angelegt und deren Errichtung ist mit Niveauänderungen von mehr als einem halben Meter verbunden oder mehr als ein Drittel der Weglänge wird geschottert oder befestigt (§ 59 Abs. 2 ForstG). Traktorwege hingegen sind gemäß Rottensteiner (2018) einspurig befahrbare Wege, die ebenfalls mehrjährig angelegt werden. Auch bei der Errichtung von Traktorwegen kommt es häufig zu Niveauänderungen von mehr als einem halben Meter, wonach

die Vorgaben des Forstgesetzes 1975 anzuwenden sind (Rottensteiner 2018). Rückegassen – bei deren Errichtung werden Bäume von der Gasse entfernt – dienen der Feinerschließung innerhalb der Waldbestände zur Durchforstung oder Holzernte (Rottensteiner 2018).

2.2 Forstwegenetz

Das österreichische Waldstraßennetz (in LKW befahrbarem Gelände) beläuft sich gemäß Feldbacher-Freithofnig et al. (2024), Datenstand September & Oktober 2023, auf eine Länge von rd. 218.543 km. Gemäß UBA (2004) kommen jährlich 2.160 km LKW-befahrbare Straßen hinzu. Das längste Waldstraßennetz Österreichs hat mit einer Strecke von 60.597 km die Steiermark (Feldbacher-Freithofnig et al. 2024).

2.3 Planung, Errichtung und Instandhaltung von Forstwegen

Die forstrechtlichen Bestimmungen für die Planung, Errichtung und Instandhaltung von Forststraßen sind den §§ 59 bis 65 des Forstgesetzes 1975 zu entnehmen. Forststraßen im Sinne des Forstgesetzes 1975 (Definition Forststraße vgl. „2.1 Arten von Forstwegen“) sind gemäß § 60 Abs. 1 ForstG grundsätzlich so zu planen, zu errichten und zu erhalten, dass in den Wald nur so weit eingegriffen wird, wie es für die Erschließung erforderlich ist und der Waldboden und Bewuchs möglichst wenig Schaden erleidet. Dabei sind technische und wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen. Negative Auswirkungen wie z.B. gefährliche Erosionen, Gefährdung oder Schäden durch Einfluss auf den Abfluss von Niederschlagswässern, Rutschungen, etc. sind bei Errichtung, Erhaltung und Benützung von Forststraßen grundsätzlich zu verhindern (§ 60 Abs. 2 ForstG). Für die Planung und Bauaufsicht sind bei der Errichtung befugte Fachkräfte heranzuziehen (§ 61 Abs. 1 ForstG). Nicht erforderlich ist dies beim Ausbau von bereits angelegten benutzten Forststraßen, vorausgesetzt der Waldboden wird durch den Ausbau nur unerheblich beansprucht (§ 61 Abs. 3 ForstG). Bei Einstellung des Baus sowie bei Auflassung einer Bringungsanlage ist die beanspruchte Waldfläche wieder in produktive Waldfläche zu überführen und wiederzubewalden (§ 65 Abs. 2 ForstG). Ob Bewilligungen (oder eine Meldung) nach dem Forstgesetz 1975 oder gegebenenfalls andere Bewilligungen erforderlich sind, befugte Fachkräfte für die Planung und Bauaufsicht eines Forstweges hinzugezogen werden müssen sowie ob und welche Recycling-Baustoffe (Qualität, bautechnische Eignung, konkrete technische Anforderungen für den Forstwegebau) für die Errichtung und Instandhaltung von Forststraßen und untergeordneten Wegen geeignet sind, ist vorab mit den zuständigen Behörden abzuklären. Zuständige Behörde für die Errichtung und Instandhaltung von Forststraßen ist die Bezirksverwaltungsbehörde (§ 170 Abs. 1 ForstG). Ansprechpartner für die Planung und Umsetzung von Forststraßenprojekten sind in den Bezirksforstinspektionen und den Forstabteilungen der Landeslandwirtschaftskammern zu finden (BML 2023); befugte Fachkräfte für Planung und Bauaufsicht u.a. in der Bezirksforstinspektion (Forstfachreferat der Bezirkshauptmannschaft), der Kammer für Land- und Forstwirtschaft, in technischen Büros sowie bei Ziviltechnikern (Land Steiermark 2023).

3 (ABFALL-)RECHTLICHE ASPEKTE

Nachstehend werden aus Sicht der Autorinnen relevante nationale Vorgaben betreffend die Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen im forstlichen Wegebau auszugsweise und zusammengefasst wiedergegeben.

3.1 Abfallwirtschaftsgesetz 2002 (AWG 2002)

Verwertungsgebot für Bau- und Abbruchabfälle: Gemäß § 16 Abs. 7 Z1 AWG 2002 sind verwertbare Materialien aus Bau- und Abbruchtätigkeiten einer stofflichen Verwertung zuzuführen, vorausgesetzt dies ist ökologisch zweckmäßig, technisch möglich und nicht mit unverhältnismäßigen Kosten verbunden. Unter einer stofflichen Verwertung fallen gemäß § 2 Abs. 5 Z2a AWG 2002 in Bezug auf Bau- und Abbruchabfälle u.a. die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling und die Verfüllung. Die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die als Brennstoff oder anderes Mittel der Energieerzeugung verwendet werden, zählen nicht dazu.

Ziele für die Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen: Gemäß Anhang 1a AWG 2002 mussten bis zum Jahr 2020 die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling und die sonstige stoffliche Verwertung (einschließlich der Verfüllung, bei der Abfälle als Ersatz für andere Materialien genutzt werden) von nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen auf mindestens 70 Gewichtsprozent erhöht werden.

3.2 Altlastensanierungsgesetz (ALSAG)

Gegenstand Altlastenbeitrag: Gemäß § 3 Abs. 1 Z1 ALSAG sind u.a. für folgende Tätigkeiten Altlastenbeiträge zu leisten: das Ablagern von Abfällen oberhalb und unterhalb der Erde, das Lagern von Abfällen zur Beseitigung für mehr als 1 Jahr, das Lagern von Abfällen zur Verwertung für mehr als 3 Jahre und das Verfüllen von Geländeunebenheiten oder das Vornehmen von Geländeangepassungen (z.B. die Errichtung von Unterbauten von Straßen) sowie den Bergversatz mit Abfällen.

Ausnahmen aus der Beitragspflicht: Tätigkeiten, die von der Beitragspflicht ausgenommen sind, können § 3 Abs. 1a bis 4 ALSAG entnommen werden. Ausgenommen sind u.a. Recycling-Baustoffe, die gemäß Vorgaben der Recycling-Baustoffverordnung (Abschnitt 3) oder im Einklang mit den Vorgaben des Bundes-Abfallwirtschaftsplans für Aushubmaterial im Zusammenhang mit einer Baumaßnahme im unbedingt erforderlichen Ausmaß für das Verfüllen von Geländeunebenheiten, das Vornehmen von Geländeangepassungen oder den Bergversatz hergestellt und verwendet werden (§ 3 Abs. 1a Z6 und 6a ALSAG).

Beitragspflichtige Tätigkeiten – Konsequenzen: Die Beitragserhebung für gemäß Altlastensanierungsgesetz beitragspflichtige Tätigkeiten obliegt dem Zollamt (§ 9 Abs. 1 ALSAG). Feststellungen gemäß § 10 ALSAG fallen in den Zuständigkeitsbereich der Bezirksverwaltungsbehörde (§ 21 ALSAG). Die Höhe der Altlastenbeiträge ist abhängig von der Art der beitragspflichtigen Tätigkeit. Für beitragspflichtige Tätigkeiten mit Aushubmaterialien, Baurestmassen oder gleichartigen Abfällen aus der Produktion von Baustoffen sowie mit sonstigen mineralischen Abfällen mit Baurestmassendeponiequalität beträgt der Altlastenbeitrag derzeit je angefangene Tonne 9,20 € und ab 2025 10,60 € (§ 6 Abs. 1 Z1 ALSAG). Gemäß § 4 Abs. 1 ALSAG können der Anlageninhaber, die Notifizierungspflichtige Person, der Verursacher oder der Grundstückseigentümer Beitragsschuldner sein. Beitragsschuldner im Falle des unzulässigen Einbaus von Baurestmassen im privaten Bereich ist i.a.R. der Veranlasser. Kann der Veranlasser nicht festgestellt werden, ist es der Grundeigentümer, der die beitragspflichtige Tätigkeit auf seinem Grund duldet (§ 4 Abs. 1 Z3 ALSAG). Der Hersteller von Recycling-Baustoffen kann dann Beitragsschuldner sein, wenn die Recycling-Baustoffe nicht gemäß Vorgaben der Recycling-Baustoffverordnung oder des Bundes-Abfallwirtschaftsplans hergestellt wurden und das einem Beitragsschuldner gemäß § 4 Abs. 1 ALSAG nicht bekannt war (§ 4 Abs. 2 ALSAG).

3.3 Deponieverordnung 2008 (DVO 2008)

Ziel der Deponieverordnung 2008: Gemäß § 1 Abs. 2 DVO 2008 sollen Abfälle, die sich für ein Recycling und andere Arten der Verwertung eignen, zur Schaffung einer Kreislaufwirtschaft sowie im Sinne der Abfallhierarchie in Zukunft nicht auf Deponien angenommen und abgelagert werden.

Deponierungsverbot für ausgewählte mineralische Abfälle: Seit Anfang 2024 ist die Deponierung ausgewählter mineralische Abfälle wie Keramik, Straßenaufbruch, Betonabbruch, Gleisschotter, Bitumen/Asphalt, Bodenaushub (technisches Schüttmaterial) und Straßenkehricht (nur Einkehrsplatte als natürlicher Gesteinskörnung) sowie für Recycling-Baustoffe der Qualitätsklasse U-A untersagt. Ausgenommen sind Materialien, die offensichtlich verunreinigt sind oder Inertabfalldeponiequalität nicht einhalten können (§7 Z14 DVO 2008).

3.4 Forstgesetz 1975 (ForstG)

Waldverwüstung und Littering – Konsequenzen: Im Falle einer Ablagerung von Abfällen wie z.B. Müll, Gerümpel und Klärschlamm im Wald, liegt gemäß § 16 Abs. 2 lit. d ForstG eine Waldverwüstung vor. Beim Antreffen von Bau- und Abbruchabfällen oder anderen Abfällen im Wald, ist also die Behörde einzuschalten. Die Behörde für die Durchführung des Forstgesetzes 1975 ist gemäß § 170 Abs. 1 ForstG grundsätzlich die Bezirksverwaltungsbehörde. Werden Abfälle im Wald abgelagert oder weggeworfen, hat die Behörde den Abfallverursacher festzustellen und die weiteren Schritte für die Entfernung des Abfalls aus dem Wald zu beauftragen (§ 16 Abs. 4 ForstG). Das Forstgesetz 1975 sieht sowohl für die Waldverwüstung (Ablagerung von Abfällen) als auch für das Wegwerfen von Abfällen (Littering) Strafbestimmungen vor. Die Geldstrafen für eine Waldverwüstung bzw. die Ablagerung von Abfällen im Wald belaufen sich auf bis zu 7.270 € (oder Freiheitsstrafen bis zu vier Wochen) (§ 174 Abs. 1 ForstG). Für Littering sind Geldstrafen bis 150 € vorgesehen (§ 174 Abs. 3 ForstG). Im Forstgesetz 1975 wird der Begriff „Abfall“ verwendet aber nicht definiert, weshalb die ständige Rechtsprechung auf die Begriffsdefinition im Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – vgl. § 2 Abs. 1 AWG 2002 – abstellt (Herbst & Herbst 2021). Bei Ablagerungen von Abfällen außerhalb des Waldes, regelt das Abfallwirtschaftsgesetz 2002 die weitere Vorgehensweise (Behandlungsaufträge vgl. § 73 AWG 2002). Zuständige Behörde ist grundsätzlich ebenfalls die Bezirksverwaltungsbehörde (§ 73 Abs. 7 AWG 2002).

3.5 Recycling-Baustoffverordnung (RBV)

Zulässige Eingangsmaterialien: Zulässige Eingangsmaterialien für die Herstellung von Recycling-Baustoffen sind in § 7 RBV bzw. Anhang 1 RBV definiert. Grundvoraussetzung, um geeignete schad- und störstofffreie Eingangsmaterialien zu erhalten, ist die Einhaltung der Pflichten bei Bau- und Abbruchtätigkeiten (Schad- und Störstofferkundung, geordneter Rückbau, Trennpflicht vgl. §§ 4 bis 6 RBV). Geeignetes Ausgangsmaterial für die Herstellung von Recycling-Baustoffen kann z.B. schad- und störstofffreier Hochbauabbruch sein (RBV 2024).

Umweltverträglichkeit von Recycling-Baustoffen: Zur Sicherstellung der Umweltverträglichkeit von Recycling-Baustoffen, müssen diese einer Qualitätssicherung gemäß Anhang 3 RBV unterzogen werden, wozu chemische Analysen erforderlich sind, die ausschließlich von dafür akkreditierten Konformitätsbewertungsstellen durchgeführt werden dürfen (§ 10 RBV). Die einzuhalgenden Grenzwerte für die Zuordnung zu den unterschiedlichen Qualitätsklassen werden in Anhang 2 RBV definiert. Die Recycling-Baustoffverordnung unterscheidet acht Qualitätsklassen. Nur für den Einsatz von Recycling-Baustoffen der Qualitätsklasse U-A sieht die Recycling-Baustoffverordnung keine Einsatzbeschränkungen vor. Bei Recycling-Baustoffen der Qualitätsklasse U-A handelt es sich um Gesteinskörnungen für den ungebundenen sowie für den hydraulisch oder bituminös gebundenen Einsatz (Anhang 4 RBV). Diese sind u. a. für den ungebundenen

Einsatz ohne oder unter einer gering durchlässigen, gebundenen Deck- oder Tragschicht geeignet (vgl. Qualitätsklassen und zulässige Einsatzbereiche und Verwendungsverbote gemäß den §§ 13 und 17 RBV).

Bautechnische Eignung von Recycling-Baustoffen: Ein Recycling-Baustoff muss die bautechnischen Anforderungen gemäß dem Stand der Technik einhalten (§ 9 Abs. 3 RBV). Für bautechnische Anwendungen gelten abhängig vom vorgesehenen Einsatz unterschiedliche Normen (BMLFUW 2018). Beispielhaft sei an dieser Stelle die ÖNORM B 3140 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton“, ausgegeben am 01.11.2020, angeführt.

Abfallende für Recycling-Baustoffe: Die Abfalleigenschaft eines Recycling-Baustoffs der Qualitätsklasse U-A gemäß Anhang 2 RBV endet mit der Übergabe durch den Hersteller an einen Dritten, jene von Recycling-Baustoffen anderer Qualitätsklassen erst mit der zulässigen Verwertung (§ 14 Abs. 1 RBV, BMLFUW 2018). Letztere dürfen, im Gegensatz zu Recycling-Baustoffen der Qualitätsklasse U-A, nur von befugten Abfallsammlern und Behandlern übernommen werden (§ 24a AWG 2002).

4 FAZIT

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft und der Erreichung der abfallwirtschaftlichen Zielvorgaben ist der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen im forstlichen Wegebau – bei entsprechender qualitativer und bautechnischer Eignung – grundsätzlich zu befürworten. Unabhängig davon, ob der zu errichtende bzw. zu sanierende Weg unter die Bestimmungen des Forstgesetzes 1975 fällt oder nicht, eignen sich dafür aus fachlicher Sicht ausschließlich qualitätsgesicherte Recycling-Baustoffe der Qualitätsklasse U-A, hergestellt gemäß den Vorgaben der Recycling-Baustoffverordnung. Für Recycling-Baustoffe der Qualitätsklasse U-A sind in der Recycling-Baustoffverordnung keine Einsatzverbote festgelegt und deren Abfalleigenschaft endet bereits bei der Übergabe an einen Dritten. Werden beispielweise jährlich 1.000 km LKW-befahrbare Forststraßen neu errichtet, könnten im Zuge dessen, bei einer mittleren Waldstraßenbreite von 3 m (Feldbacher-Freithofnig et al. 2024) und einem Schichtaufbau von 10 bis 30 cm (Schmidt 2014), schätzungsweise zwischen 300.000 m³ und 900.000 m³ Primärrohstoffe durch Recycling-Baustoffe der Qualitätsklasse U-A ersetzt werden. Der Österreichische Baustoff-Recycling Verband (2024) listet z.B. recycelten Hochbausand / Hochbausplitt (Ziegel [unter 30 %] mit z.B. Betonanteil) als geeignete rezyklierte Gesteinskörnung für den forstlichen Wegebau. Bautechnische Anforderungen wie u.a. bzgl. der Sieblinie, der Frostsicherheit, der Tragfähigkeit oder des Widerstands gegen Oberflächenabrieb müssen in Abhängigkeit vom vorgesehenen Einsatzbereich eingehalten werden. Dezidiert festzuhalten ist, dass ein Einsatz von nicht aufbereiteten und nicht qualitätsgesicherten Baurestmassen im forstlichen Wegebau nicht dem Stand der Technik entspricht. Ob eine Bewilligung nach dem Forstgesetz 1975 oder anderen Materiengesetzen erforderlich ist, bei der Errichtung befugte Fachkräfte für Planung und Bauaufsicht hinzugezogen werden müssen sowie ob und welche Recycling-Baustoffe (Qualität, bautechnische Eignung) bei der Errichtung und Instandhaltung von Forststraßen und untergeordneten Wegen eingesetzt werden können, ist jedenfalls vor Beginn der Bautätigkeiten mit den zuständigen Stellen abzuklären.

LITERATURVERZEICHNIS

Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002 StF: BGBl. I Nr. 102/2002 idF: BGBl. I Nr. 66/2023. Abgerufen am 11. Juli 2024
Altlastensanierungsgesetz StF: BGBl. Nr.299/1989 idF: BGBl.I Nr.30/2024. Abgerufen am 12. Juli 2024
Amt der Steiermärkischen Landesregierung kurz: Land Steiermark. (2023). Forststraßen (§ 58 bis 65 Forstgesetz). Abgerufen am 17. November 2023 von <https://www.agrar.steiermark.at>
BMLFUW. (2018). Erläuterungen zur Recycling-Baustoffverordnung. Abgerufen am 12. Juli 2024 von <https://brv.at>

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie kurz: BMK. (2023). *Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023, Teil 1*. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Abgerufen am 11. Juli 2024 von <https://www.bmk.gv.at>

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft kurz: BML. (2023). Forststraßen - Lebensadern des Waldes. Abgerufen am 17. November 2023 von <https://info.bml.gv.at>

Deponieverordnung 2008 – DVO 2008 StF: BGBI. II Nr. 39/2008 idF: BGBI. II Nr. 144/2021.

Feldbacher-Freithofnig, J., Posch, L., Süßenbacher, R., & Kirchmeir, H. (2024). Das Forststraßennetz in Österreich. 62. (WWF Österreich, Hrsg.) Klagenfurt: Bearbeitung: E.C.O. Institut für Ökologie im Auftrag des WWF Österreich.

Forstgesetz 1975 – ForstG StF: BGBI. Nr. 440/1975 idF: BGBI. I Nr. 144/2023. Abgerufen am 11. Juli 2024

Herbst, F., & Herbst, P. (2021). Forstschutzorgane und Abfall im Wald. *Forstzeitung.at*(08/2021), 32-34.

Österreichischer Baustoff-Recycling Verband kurz: BRV. (2024). Baurestmassen Verwertung; Die 10 Qualitätsbaustoffe nach der neuen Recycling-Baustoffverordnung und typische Anwendungsmöglichkeiten. Abgerufen am 25. Juli 2024 von URL:<https://brv.at>

Pfandl, K. (2023). Verwertung von Aushubmaterialien und mineralischen Bau- und Abbruchabfällen im forstlichen Wegebau gemäß Vorgaben der Recycling-Baustoffverordnung (nicht veröffentlichte Seminararbeit im Zuge der Besonderen Grundausbildung im Amt der Stmk. Landesregierung).

Recycling-Baustoffverordnung – RBV StF: BGBI. II Nr. 181/2015 idF: BGBI. II Nr. 290/2016.

Rottensteiner, C. (2018). Bau und Sanierung von Forststraßen – Rechtliches. (Landwirtschaftskammer Oberösterreich, Hrsg.) Abgerufen am 18. November 2023 von <https://ooe.lko.at>

Schmidt, C. (2014). Forstlicher Wegebau – eine notwendige Investition. (S. Sachsenforst, Hrsg.) *Waldpost 2014/2015*.

Umweltbundesamt GmbH kurz: UBA. (2004). Umweltsituation in Österreich Siebenter Umweltkontrollbericht des Umweltministers an den Nationalrat. Wien. Abgerufen am 19. November 2023 von <https://www.umweltbundesamt.at>

KONTAKT

Dipl.-Ing. Dr. mont. Kerstin Pfandl
kerstin.pfandl@stmk.gv.at
+43 (0) 316 877-2157
Abteilung 14, Referat Abfall- und Ressourcenwirtschaft
Amt der Steiermärkischen Landesregierung
<https://www.abfallwirtschaft.steiermark.at>

Rund um die Sanierung der Altlast Schrems

Jürgen Maier¹, Thomas Bruggraber¹ & Dagmar Vorraber¹

¹⁾ RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Österreich

KURZFASSUNG: Die Fläche ST32 „Halde Schrems“ in Schrems bei Frohnleiten ist eine Altablagerung von Abraum- und Hüttenabfällen des lokalen Blei- und Silberbergbaues, welcher seit dem 13. Jahrhundert dort betrieben wurde. Die Altablagerung wurde 2019 als Altlast ausgewiesen und der Priorität 1 zugeordnet. Im Wesentlichen war der Boden im Bereich der Halde mit Blei und Zink, sowie untergeordnet mit Cadmium und Quecksilber kontaminiert. Auch in Gemüse und Pflanzen wurden zum Teil erhöhte Schwermetallgehalte festgestellt. Aufgrund der Kontamination und der aktuellen Nutzung der Fläche als großteils Wohngebiet und landwirtschaftliche Nutzfläche wurde eine Sicherung mit dem Ziel der gefahrlosen Nutzung der Haus- und Gemüsegärten durchgeführt. Als Sicherungsverfahren wurde der Austausch kontaminiierter Böden durch unbelastetes Material gewählt. In einer ersten Sicherungsphase erfolgte dieser Bodenaustausch auf Liegenschaften, auf denen Kinder unter 18 Jahren wohnhaft waren. Die verbleibenden Flächen wurden in einer zweiten Phase gesichert. Der Ablauf der Sicherung sowie die zusätzlich erforderlichen Maßnahmen bis hin zum erfolgreichen Abschluss wird, aus Sicht des wasserrechtlichen Aufsichtsorgans, in nachstehendem Erfahrungsbericht geschildert.

1 HINTERGRUND

Bereits im Jahr 2018 wurden im Rahmen der geologisch-geochemischen Kartierung durch die Geologische Bundesanstalt außergewöhnlich hohe Blei- und Zinkgehalte festgestellt, wobei die Höchstwerte im Bereich von Hausgärten auftraten. Zudem wurden erhöhte Cadmium- und lokal begrenzt auch Quecksilberkonzentrationen im Boden gemessen. Damit einhergehend wurden auch in Pflanzen, welche in den betroffenen Hausgärten angebaut wurden, hohe Bleikonzentrationen angetroffen. Lokal wurde auch im Grundwasser eine hohe Belastung mit Blei, sowie teilweise mit Zink, Cadmium und Sulfat nachgewiesen. Aus diesen Gründen, vor allem aber wegen des hohen Schadstofftransfers aus verunreinigtem Boden in die Pflanzen, war ein gesundheitliches Risiko nicht auszuschließen, weshalb der Altlast die Priorität 1 zugewiesen und 2019 eine Sicherung eingeleitet wurde. (Geologische Bundesanstalt, 2018) (Umweltbundesamt, 2023)

2 SICHERUNGSVERFAHREN

Die hohen Blei- und Zinkkonzentrationen, sowie die lokal erhöhten Cadmium- und Quecksilberkonzentrationen wurden über die gesamte Mächtigkeit der Halde von bis zu 8 m festgestellt. Ziel der Maßnahmen war die Gefährdung der Anwohner, insbesondere die mögliche Schadstoffaufnahme durch Kinder, sowie die Nutzung von kontaminiertem Gemüse durch alle Anwohner zu reduzieren. Daher wurde als Sicherungsvariante ein Austausch des Oberbodens bis in eine Tiefe von mindestens 0,5 m auf allen Flächen, welche durch spielende Kinder bzw. als Hausgärten genutzt wurden oder auf denen sich Gemüsebeete befanden durchgeführt. Vor der Wiederverfüllung mit nicht verunreinigtem Bodenaushub der Klasse A1 bzw. A2 gem. Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP) (BMNT, 2017) wurde ein grobmaschiges Geotextil als Abgrenzung gegen den kontaminierten Untergrund verlegt. (RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, 2023)

3 SICHERUNGSABLAUF

Die Sicherung wurde in zwei Phasen abgewickelt. In Phase 1 wurden die Flächen gesichert, auf denen zum Zeitpunkt der Sicherung Kinder ihren Hauptwohnsitz hatten. Diese Flächen bildeten rund 20 % der zu sichernden Gesamtfläche und wurden von August bis Oktober 2019 bearbeitet.

Alle weiteren zu sichernden Flächen wurden im Rahmen der Phase 2 von März bis Oktober 2022 gesichert. Die Sicherungsmaßnahmen beschränkten sich auf Hausgärten (Wiesenflächen und Gemüsebeete). Gemäß der Gefährdungsabschätzung des Umweltbundesamtes lagen die Schwermetallkonzentrationen in untersuchten Grasproben von landwirtschaftlich genutzten Flächen deutlich unterhalb der erlaubten Konzentrationen in Futtermitteln, sodass auf diesen Flächen keine Sicherungsmaßnahmen notwendig waren (Umweltbundesamt, 2019). Bewaldete Flächen und steile Böschungen, ebenso wie bebaute und versiegelte Flächen, waren ebenfalls von den Sicherungsmaßnahmen ausgenommen.

3.1 Vorbereitung

Vor Baubeginn wurden für die betroffenen Böden je Sicherungsphase Grundlegende Charakterisierungen (GLC) durchgeführt und entsprechend der chemischen Analytik die verschiedenen Deponieklassen zugeordnet. Anhand der Ergebnisse wurden Aushubbereiche gleicher Qualität definiert. Die zugeordneten Qualitäten umfassten Baurestmassen-deponie- (BRM), Inertabfalldeponie- (IA) und Reststoffdeponiequalität (RS). Die einstufungsrelevanten Parameter im Gesamtgehalt (GG) bzw. Eluat (E) für die jeweilige Qualitätsklasse waren folgende:

- BRM: Phosphat (E)
- IA: Blei (GG), Cadmium (GG), Quecksilber (GG), Zink (GG), bodenfremde Bestandteile
- RS: Blei (GG), Cadmium (GG), Quecksilber (GG), Zink (GG), Kupfer (GG), TOC (GG), Blei (E), Chrom VI (E)

3.2 Umsetzung & Aufgaben der wasserrechtlichen Bauaufsicht

Der Autor wurde durch das Amt der Steiermärkischen Landesregierung als wasserrechtliches Bauaufsichtsorgan berufen (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2019). Zusätzlich dazu wurde durch die RM Umweltkonsulenten ZT GmbH im Auftrag der wasserrechtlichen Bauaufsicht eine abfalltechnische Aushubbegleitung durchgeführt.

Die Aufgaben der wasserrechtlichen Bauaufsicht bzw. der ständig vor Ort anwesenden abfall-chemischen Aushubbegleitung umfassten im Wesentlichen folgende Punkte:

- Laufende Kontrolle der erforderlichen Mindest-Aushubtiefe von 0,5 m.
- Zuordnung des Aushubs zu den zuvor im Rahmen der GLCs festgelegten Qualitätsklassen.
- Ausstellung von Begleitscheinen für jede LKW-Fuhr des kontaminierten Bodenaushubs, um eine ordnungsgemäße Deponierung auf den geeigneten Zieldeponien zu gewährleisten.
- Durchführung von Kontrollmessungen und Entnahme von Rückstellproben sowohl von zu entsorgendem Aushubmaterial als auch von angeliefertem Verfüllmaterial.
- Kontrolle der Einhaltung der Auflagen gemäß Sanierungsbescheid.

4 HERAUSFORDERUNGEN & PROBLEMSTELLUNGEN

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten und der privaten Nutzung war im Zuge der Durchführung der Sicherung ein hohes Maß an Flexibilität aller Beteiligten erforderlich. Zudem waren beim Auftreten von Problemen eine rasche und effiziente Lösungsfindung und Umsetzung erforderlich. Zum Teil mussten zusätzliche Maßnahmen oder kurzfristige Projektänderungen getroffen werden, um die Sicherung durchzuführen. Ebenso zeigte sich die Notwendigkeit der ständigen Anwesenheit der abfallchemischen Aushubbegleitung zur Sicherstellung der Umsetzung gemäß Einreichprojekt. Nachfolgende Auflistung soll einen Überblick über die nötigen Änderungen und Zusatzanforderungen geben.

- Zur Abgrenzung des schwermetallbelasteten Untergrundes gegen den ausgetauschten Boden war die Verlegung eines Trennvlieses vorgesehen. Im Rahmen der Arbeiten ergab sich jedoch die Befürchtung, dass es durch den Einsatz des Vlieses zu Staunässe kommen könnte, weshalb alternativ eine Matte aus Kokosfaser (Phase 1) bzw. ein grobmaschiges Geotextil (Phase 2) in Kombination mit Warnbändern verlegt wurde.
- Für die Wiederverfüllung wurde Bodenaushub der Qualität Kasse A2 gemäß Bundesabfallwirtschaftsplan (BMNT, 2017) für die untere Schicht und ein Humus-Sand Gemisch der Qualität Kasse A1 (BMNT, 2017) verwendet. Im Rahmen der wasserrechtlichen Aufsichtstätigkeit wurden der angelieferte Bodenaushub und Humus beprobt und auf die im Bundesabfallwirtschaftsplan angeführten Parameter untersucht. Im Zuge dieser Kontrollmessungen des angelieferten Verfüllmaterials wurde in Phase 1 festgestellt, dass für einen Teil der Grundstücke ein Humus-Sand Gemisch angeliefert wurde, welches trotz gültigem Zertifikat des Kompostherstellers nicht die Grenzwerte der Klasse A1 gemäß BAWP (BMNT, 2017) einhielt. Es war daher sowohl der Abtrag bereits verfüllten Materials als auch die zeitnahe Anlieferung eines geeigneten Ersatzmaterials erforderlich.
- Nach Abschluss der Arbeiten beanstandete ein Anrainer die Qualität des wiederverfüllten Materials bzgl. der Einhaltung von Grenzwerten gemäß BAWP (BMNT, 2017). Da während der Sicherung auch Rückstellproben des angelieferten Materials entnommen wurden konnte hier nachträglich noch eine Analyse durchgeführt werden, anhand derer die Zweifel an der Qualität ausgeräumt werden konnten.
- Aufgrund der Hangneigung in ausgewählten Bereichen war die Miteinbeziehung von Geotechnikern zur Hangsicherung notwendig.

Die Umsetzung der 0,5 m Aushubtiefe waren aufgrund der Geländeoberfläche teilweise sehr schwer umzusetzen. Während die Kontrolle der Aushubtiefe auf flachen Grundstücken problemlos möglich war, konnte im Hangbereich bzw. bei Geländeunebenheiten keine lückenlose Messung erfolgen. Zudem führte der Umstand, dass die Sanierung größtenteils auf privat genutzten Flächen durchgeführt wurde, zu besonderen Anforderungen im Hinblick auf die Abstimmung mit den Eigentümern. Da im Zuge des Aushubs auch eine Abtragung der bestehenden Bepflanzungen und Einrichtungen (Zäune, Gewächs- und Gartenhäuser, Beete etc.) notwendig war, war die Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes der Flächen wesentlich. Die Wiederherstellung des exakt gleichen Zustands war jedoch in diesem Sinne nicht möglich, weil die jeweiligen Einrichtungen bzw. Bepflanzungen allein schon durch die Abtragung der Arbeiten nicht mehr gleichwertig gewesen wären. Aus diesem Grund wurde, im Rahmen der Möglichkeiten, eine gleichwertige bzw. bessere Wiederherstellung durch das Setzen neuer Pflanzen und die Aufstellung/Errichtung neuer Einrichtungen umgesetzt. Die Wiederherstellungsmaßnahmen umfassten folgende Leistungen (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2024):

- Einbautensicherung bzw. Wiederherstellung von Einbauten
- Bepflanzung mit Bäumen, Sträuchern und sonstigen Pflanzen
- Fachgerechte Bepflanzung durch Gärtner
- Wiedererrichtung von Holzhütten
- Wiedererrichtung von Spielgeräten
- Wiedererrichtung von Pools
- Wiedererrichtung von Hochbeeten
- Wiedererrichtung von Gewächshäusern
- Wiedererrichtung von Zäunen und Begrenzungsmauern
- Verlegung von Großpflastersteinen
- Wiedererrichtung sonstiger Einrichtung entsprechend dem ursprünglichen Zustand

Um jedenfalls den gleichwertigen Ersatz zu gewährleisten, aber andererseits die Wiederherstellungsmaßnahmen auch im richtigen Verhältnis umzusetzen, wurde bereits vor Beginn der Arbeiten mit einer umfassenden Beweissicherung begonnen und die betroffenen Flächen, Zufahrten etc. sowie etwaige bereits vorhandene Schäden fotografisch dokumentiert. Dennoch konnte, trotz

der gesetzten Maßnahmen sowie laufender Abstimmung mit den Eigentümern, nicht vermieden werden, dass nach Abschluss der Arbeiten noch diverse Beanstandungen erfolgten. Anhand der Beweissicherung konnte für diese Fälle nachvollzogen werden, inwieweit die beanstandeten Punkte durch die Sicherungsarbeiten verursacht wurden oder bereits zuvor schadhaft waren. Es zeigte sich aber, dass bereits im Vorfeld eine exakte Definition der Wiederherstellungsmaßnahmen für jede Fläche erforderlich gewesen wäre. Dadurch, dass lediglich die Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes vereinbart wurde, kam es hier zu Missverständnissen bzw. zu Anrainerwünschen bzgl. der Wiederherstellung, welche das vorgesehene Ausmaß überschritten. Ein weiterer Punkt, welcher im Nahhinein noch beanstandet wurde, war, dass im direkten Umkreis von Bäumen, welche auf Wunsch der Eigentümer bestehen blieben, der Bodenaustausch nicht möglich war, um die Bäume nicht zu beschädigen. Auch hier wäre vorab der explizite Hinweis erforderlich gewesen, dass bei Verbleib von Bäumen in deren unmittelbarem Umkreis kein Austausch des Bodens erfolgen kann und damit falschen Erwartungshaltungen aktiv vorgebeugt wird.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND ZUSAMMENFASSUNG

Die Sicherungsmaßnahmen an der Altlast ST32 „Halde Schrems“ wurden von 2019 bis 2022 in zwei Phasen durchgeführt. Nach Abschluss der eigentlichen Sicherung – Abtragung von 0,5 m Boden und Wiederverfüllung sowie Wiederherstellung – mussten noch diverse Nacharbeiten be treffend die Wiederherstellung umgesetzt werden. Die tatsächliche Bauvollendung wurde schließlich im Juli 2023 angezeigt. Im Wesentlichen konnte die Sicherung der Altlast, abgesehen von geringfügigen Abweichungen zum Einreichprojekt, welche aufgrund der Gegebenheiten erforderlich waren, gemäß Sanierungsbescheid des Landes Steiermark (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2019) abgeschlossen werden. Im Rahmen der finanziellen Möglichkeiten und Verhältnismäßigkeit wurden die Flächen nach Wünschen der Eigentümer wieder in den ursprünglichen, bzw. verbesserten Zustand gebracht und schlussendlich einerseits die Sicherung der Altlast als auch die Zufriedenheit der Eigentümer, zum Schutz derer die Maßnahmen erforderlich waren, erreicht.

LITERATURVERZEICHNIS

- Amt der Steiermärkischen Landesregierung. (2019). *Bescheid GZ: ABT13-39.20-92/2018-116*. Graz.
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung. (2024). *Bescheid GZ: ABT13-185376/2023-32*. Graz.
- BMNT. (2017). *Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017*. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.
- Geologische Bundesanstalt. (2018). *Geologisch-geochemische Kartierung im Rahmen ergänzender Untersuchungen (§ 13 ALSAG) "Halde Deutschfeistritz und Schrems"*. Wien: Geologische Bundesanstalt.
- RM Umweltkonsulenten ZT GmbH. (2023). *Bericht des wasserrechtlichen Bauaufsichtsorgans Dipl.-Ing. Dr. Jürgen Maier Altlast ST32 - "Halde Schrems", Phase 2*. Frohnleiten.
- Umweltbundesamt. (2019). *Altablagerung "Halde Schrems" - Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung*. Wien: Umweltbundesamt.
- Umweltbundesamt. (2023). *Altlast ST32 "Halde Schrems" - Beurteilung der Sicherungsmaßnahmen*. Wien: Umweltbundesamt.

Bestimmung der PFAS-Belastung in zwei Nationalparks sowie deren Akkumulation in Pflanzenproben

Hannes Weinbauer ¹, Romana Hornek-Gausterer ², Daniel Tomsik ¹, Oliver Mann ¹ & Werner Wruss ¹

¹⁾ ESW Consulting Wruss ZT GmbH, Wien, Österreich

²⁾ FH Technikum Wien, Österreich

KURZFASSUNG: In den Nationalparks Donauauen und Neusiedlersee wurden Umweltproben zur Bestimmung der Hintergrundbelastung mit per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) genommen. Dazu wurden Wasser-, Sediment-, Boden- und Pflanzenproben entnommen und auf die 20-EU-PFAS untersucht. In allen Probenmatrices konnten lang- und kurzkettige Perfluorcarbonsäuren (PFCA) sowie Perfluoroctansulfonsäure (PFOS) nachgewiesen werden. Besonders auffällig war die PFOS-Belastung in den Pflanzenproben am Hauptstrom der Donau sowie am Neusiedlersee im Strandbad Ilmitz. In den Pflanzenproben war Perfluorbutansäure (PFBA) mit einem Anteil von mehr als 75 % an der Summe der 20-EU-PFAS die dominierende Einzelsubstanz dar, mit einer durchschnittlichen PFBA-Belastung von über 1 µg/kg Trockenmasse. In den Bodenproben lagen die gemessenen PFAS-Konzentrationen deutlich unterhalb des im Bundesabfallwirtschaftsplan 2023 geforderten Grenzwertes von 2 µg/kg Trockenmasse.

1 EINLEITUNG

Mit der Aufnahme von per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in diverse Umweltregulierungen (Bundesabfallwirtschaftsplan, Wasserrahmenrichtlinie, Trinkwasserverordnung) ergeben sich eine Reihe neuer Herausforderungen hinsichtlich Analytik, Bewertung und Berücksichtigung von Hintergrundwerten (Bundesministerium für Klimaschutz, 2023), (Richtlinie 2000/60/EG, 2000), (BGBl. II Nr. 304/2001, 2024). Nach der OECD-Definition für PFAS (2021), die im weiteren Sinne alle Substanzen mit mindestens einer perfluorierten Methyl- oder Methylengruppe und laut OECD 4730 PFAS mit einer gültigen CAS-Nummer umfassen, listet jedoch PubChem mehr als 6.6 Millionen mögliche Substanzen. Aufgrund der extremen Persistenz der Substanzen bzw. deren Abbauprodukte in der Umwelt stellen PFAS eine globale Herausforderung dar, da sie in der Umwelt über weite Strecken transportiert werden und in Organismen, inkl. dem Menschen, akkumulieren können und bereits eine Reihe adverser Effekte bekannt und dokumentiert sind; diese reichen von Immunmodulation und endokriner Disruption über Störung des Lipidstoffwechsels bis zur Schädigung von Leber und Nieren, sowie einem Zusammenhang mit Krebserkrankungen (Fenton et al. 2021). Die seit den 1950er Jahren kommerziell verwendeten PFAS, allen voran PFOS und Perfluoroktansäure (PFOA), sind mittlerweile ubiquitär präsent und in allen Umweltkompartmenten nachweisbar. Als besonders problematisch werden die Eintragspfade über Chemie- und Industrieabwässer, Boden- und Grundwasserkontamination durch die Anwendung fluorierten Löschschaumes und Löschschaum-Übungen, sowie die Ausbringung von Klärschlamm auf Feldern angesehen (Kurwadkar et al. 2022) (Podder et al. 2021). Neben den genannten Punktquellen, die auch Müllverbrennungsanlagen und Kläranlagen umfassen, ist der diffuse atmosphärische Eintrag von erheblicher Bedeutung für die Verbreitung von PFAS. In der Luft haften PFAS an organischen und mineralischen Partikeln sowie Wassertropfchen und können über sehr weite Strecken transportiert werden (Wang et al. 2023). Pflanzen nehmen PFAS hauptsächlich über die Wurzeln auf, wobei sich die Substanzen je nach Kettenlänge und Funktionalität unterschiedlich in der Pflanze verteilen (Xu et al. 2022).

Um die Hintergrundbelastung mit PFAS im östlichen Raum Österreichs abzuschätzen, wurden im Rahmen dieser Studie Wasser-, Sediment-, Boden- und Pflanzenproben von zwei Nationalparks entnommen und auf die 20 in der EU-Trinkwasserverordnung geforderten PFAS (C4-C13) untersucht.

2 PROBENAHME

Im Frühjahr 2023 wurden in den Nationalparks Donauauen und Neusiedlersee an insgesamt fünf Standorten nahe der lokalen Oberflächengewässer vergleichbare Umweltproben genommen (Abb. 1). Die Proben umfassten jeweils eine Wasserprobe aus dem Oberflächengewässer inkl. einer Sedimentprobe, je eine Bodenprobe aus den Tiefenstufen 0 - 10 cm und 40 - 50 cm, sowie sechs Pflanzenproben aus dem Umkreis mit einem Radius von ca. 150 m.

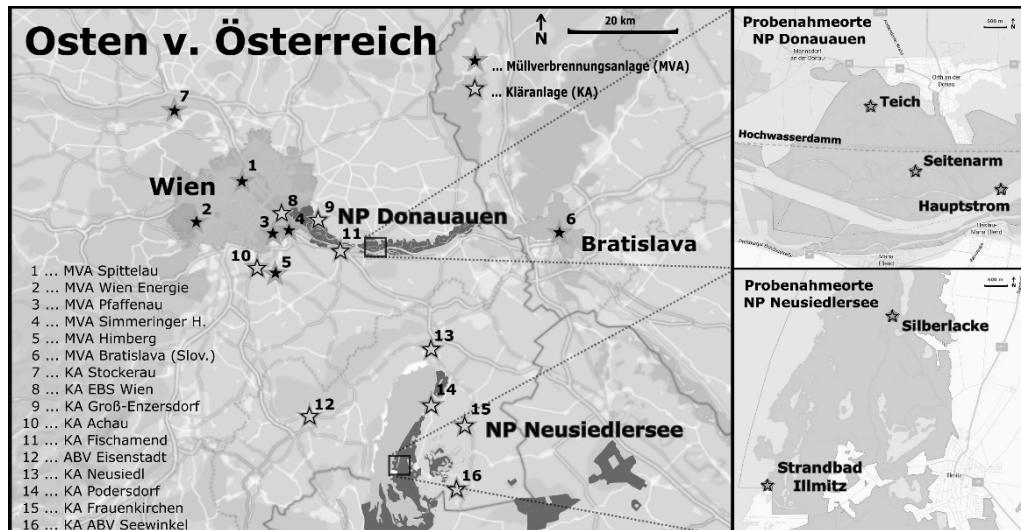


Abb. 1: Karte vom Osten Österreichs mit den Nationalparks Donauauen und Neusiedlersee. Links: Auswahl an Müllverbrennungsanlagen und Kläranlagen, die als mögliche Punktquellen für den Eintrag von PFAS in den Nationalparks in Frage kommen. Rechts oben und unten: Detailansichten aus den Nationalparks mit den Probenahmestellen (diese sind mit Sternen gekennzeichnet)

Die Sediment- und Bodenproben wurden luftgetrocknet und die PFAS gemäß DIN 38414-14 methanolisch extrahiert (DIN 38414-14, 2011). Die Wasserproben wurden gemäß DIN 38407-42 mit Hilfe der Solid Phase Extraktion (SPE) aufgearbeitet (DIN 38407-42, 2011). An den Wasserproben wurde zusätzlich ein TOP-Assay nach Houtz & Sedlak durchgeführt, um Vorläuferstoffe zu quantifizieren (Houtz & Sedlak, 2012). Die Pflanzenproben wurden ebenfalls luftgetrocknet und methanolisch extrahiert, wobei ebenfalls die SPE und eine Aufreinigung über ENVI-carb-Kartuschen zur Anwendung kamen (Nassazzi et al. 2022). Die Analyse wurde mittels LC-MS/MS durchgeführt (Flüssigchromatographie gekoppelt mit Tandem-Massen-Spektrometrie), wobei ein Shimadzu UHPLC-System mit Triple Quadrupole (LCMS 8060) zum Einsatz kam. Zur Trennung wurde eine Reversed Phase C18 Säule (Luna Omega 3 µm, 100x2,1 mm) mit Methanol und Ammoniumacetat-Puffer (20 mM) als Laufmittel verwendet. Die Kalibration und Messung erfolgten unter Verwendung isotopenmarkierter interner Standards.

3 ERGEBNISSE

Beispielhaft für eine Hintergrundbelastung mit zusätzlich anthropogenem Einfluss sind die Messergebnisse der Proben vom "Hauptstrom" der Donau und dem "Strandbad Illmitz" am Neusiedlersee angeführt (Tab. 1 und 2). Über die Donau gelangen eingeleitete Industrie- und Kommunalabwässer in den Nationalpark. Das Strandbad Illmitz ist durch eine aktive Freizeitgestaltung im Bereich des Nationalparks geprägt.

3.1 Hauptstrom

Im Wasser des Donau-Hauptstroms wurden geringe Mengen an PFOA und PFOS mit 0,4 ng/l bzw. 0,9 ng/l gefunden. Der TOP-Assay ergab eine Zunahme, besonders der kurzkettigen PFAS, sowie eine deutliche Erhöhung bei der Perfluoroctansulfonsäure (PFOS), was auf die Anwesenheit von PFAS-Vorläufersubstanzen hinweist. Im Sediment konnten keine PFAS gefunden werden. Die beprobteten Bodenschichten enthielten eine Reihe von kurz- und langkettigen PFCAs sowie PFOS in Konzentrationen um deren jeweilige Bestimmungsgrenze (50 bis 100 ng/kg dw). In allen Pflanzenproben wurden die PFCAs von C4 bis C8 sowie PFOS nachgewiesen; Perflurooronansäure (PFNA) und Perfluorbutansulfonsäure (PFBS) ist in je drei Proben enthalten. In der Pflanzenprobe von einem Efeu wurden 16 der 20 Analyten nachgewiesen. Die höchsten PFAS-Konzentrationen in den Pflanzenproben wurden für PFBA gemessen, mit einem arithmetischen Mittelwert von 1922 ng/kg Trockengewicht (dw). Die durchschnittliche PFOS-Konzentration in den Pflanzenproben betrug 118 ng/kg dw.

Tab. 1: Messwerte der PFAS (C4 bis C13) vom Probenahmestandort "Hauptstrom" im Nationalpark Donauauen. Werte in dunkelgrau markieren PFAS-Konzentrationen oberhalb der Nachweisgrenze (LOD)

Perfluoro-Carbonsäuren	PFBA	PPPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUnDA	PFDoDA	PFTrDA
Wasser [ng/L]	< 0.8	< 0.4	< 0.2	< 0.2	0.4	< 0.4	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Wasser m. TOPA [ng/L]	< 0.8	1.0	0.7	0.2	0.5	< 0.4	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Sediment [ng/kg dw]	< 100	< 50	< 25	< 25	< 50	< 50	< 25	< 25	< 25	< 25
Boden (0 - 10 cm) [ng/kg dw]	< 100	< 100	55	< 50	< 100	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Boden (40 - 50 cm) [ng/kg dw]	< 100	< 100	< 50	< 50	< 100	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Schneeglöckchen (wc. 88 %) [ng/kg dw]	n.a.	< 20	19	12	25	< 10	10	< 5	< 5	< 5
Mistel (wc. 50 %) [ng/kg dw]	1210	< 100	42	30	76	< 10	< 5	< 5	< 5	< 5
Efeu (wc. 65 %) [ng/kg dw]	2490	< 20	< 100	< 100	n.a.	< 50	13	< 100	< 100	< 5
Labkraut (wc. 88 %) [ng/kg dw]	1528	31	30	142	56	73	< 5	< 5	< 5	< 5
Goldrute (wc. 82 %) [ng/kg dw]	4040	< 200	260	< 100	< 50	14	< 5	< 5	< 5	< 5
Bärlauch (wc. 88%) [ng/kg dw]	342	< 20	11	12	17	< 10	< 5	< 5	< 5	< 5
Perfluoro-Sulfonsäuren	PFBS	PPPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFNS	PFDS	PFUnDS	PFDoDS	PFTrDS
Wasser [ng/L]	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	0.9	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4
Wasser m. TOPA [ng/L]	0.2	< 0.2	0.2	< 0.2	8.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4
Sediment [ng/kg dw]	< 25	< 25	< 25	< 25	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Boden (0 - 10 cm) [ng/kg dw]	< 25	< 25	< 25	< 25	100	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Boden (40 - 50 cm) [ng/kg dw]	< 25	< 25	< 25	< 25	< 100	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Schneeglöckchen (wc. 88 %) [ng/kg dw]	< 5	< 5	< 5	< 5	170	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Mistel (wc. 50 %) [ng/kg dw]	10	< 5	< 5	< 5	95	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Efeu (wc. 65 %) [ng/kg dw]	72	< 5	< 5	< 5	77	26	13	8	10	14
Labkraut (wc. 88 %) [ng/kg dw]	< 5	< 5	< 5	< 5	59	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Goldrute (wc. 82 %) [ng/kg dw]	< 5	< 5	< 5	< 5	58	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Bärlauch (wc. 88%) [ng/kg dw]	14	< 5	< 5	< 5	250	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

3.2 Strandbad Illmitz

In der Wasserprobe vom Strandbad Illmitz konnten alle PFCAs von C5 bis C9 nachgewiesen werden, sowie die Perfluorsulfonsäuren (PFSA) Perfluorpentansulfonsäure (PPPeS), Perfluororxansulfonsäure (PFHxS) und PFOS. Die höchste Konzentration wurde für Perfluorhexansäure (PFHxA) mit 14 ng/l gemessen. Im Sediment und in den Bodenproben wurden Perfluorheptansäure (PFHpA), PFOA und PFOS jeweils unter der jeweiligen Bestimmungsgrenze nachgewiesen. Alle Pflanzenproben enthielten die PFCAs von C4 bis C9, PFHxS und PFOS; Perfluorokansäure (PFDA) wurde in fünf von sechs Proben nachgewiesen. Die Pflanzenprobe einer Baumflechte enthielt neun von zehn PFCAs mit teilweise erheblichen Konzentrationen. Die durchschnittlichen Konzentrationen (arithmetisches Mittel) für PFBA und PFOS wurden mit 2332 ng/kg dw und 229 ng/kg dw gemessen.

Tab. 2: Messwerte der PFAS (C4 bis C13) vom Probenahmestandort "Strandbad Illmitz" im Nationalpark Neusiedlersee. Werte in dunkelgrau markieren PFAS-Konzentrationen oberhalb der Nachweisgrenze (LOD)

Perfluoro-Carbonsäuren	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUnDA	PFDoDA	PFTrDA
Wasser [ng/L]	< 0.8	5.8	14.3	3.9	3.6	0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Wasser m. TOPA [ng/L]	9.9	4.1	5.0	2.4	2.0	0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Sediment [ng/kg dw]	< 100	< 50	< 25	< 50	< 50	< 50	< 25	< 25	< 25	< 25
Boden (0 - 10 cm) [ng/kg dw]	< 100	< 50	< 25	< 25	< 100	< 50	< 25	< 25	< 25	< 25
Boden (40 - 50 cm) [ng/kg dw]	< 100	< 50	< 25	< 50	< 50	< 50	< 25	< 25	< 25	< 25
Schilf (trocken) [ng/kg dw]	< 100	31	19	49	54	53	< 5	< 5	< 5	< 5
Labkraut (wc. 82 %) [ng/kg dw]	2712	769	78	96	233	145	25	< 5	< 5	< 5
Kreuzkraut (wc. 83 %) [ng/kg dw]	n.a.	< 20	11	24	81	58	20	< 5	< 5	< 5
Kerbel (wc. 86 %) [ng/kg dw]	1952	107	51	79	178	63	10	< 5	< 5	< 5
Hagebutte (wc. 17 %) [ng/kg dw]	n.a.	< 100	25	37	21	50	4	< 5	< 5	< 5
Baumflechte (wc. 14 %) [ng/kg dw]	n.a.	59	42	189	482	175	27	19	11	< 5
Perfluoro-Sulfonsäuren	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFNS	PFDS	PFUnDS	PFDoDS	PFTrDS
Wasser [ng/L]	< 0.2	0.6	1.5	< 0.2	1.2	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4
Wasser m. TOPA [ng/L]	3.2	0.3	1.2	< 0.2	1.5	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4
Sediment [ng/kg dw]	< 25	< 25	< 25	< 25	< 100	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Boden (0 - 10 cm) [ng/kg dw]	< 25	< 25	< 25	< 25	< 100	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Boden (40 - 50 cm) [ng/kg dw]	< 25	< 25	< 25	< 25	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Schilf (trocken) [ng/kg dw]	< 5	< 5	16	< 5	45	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Labkraut (wc. 82 %) [ng/kg dw]	248	16	68	< 5	250	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Kreuzkraut (wc. 83 %) [ng/kg dw]	19	< 5	19	< 5	240	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Kerbel (wc. 86 %) [ng/kg dw]	< 5	< 5	55	< 5	391	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Hagebutte (wc. 17 %) [ng/kg dw]	< 5	< 5	< 10	< 5	30	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Baumflechte (wc. 14 %) [ng/kg dw]	< 5	< 5	122	< 5	418	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

3.3 Donau-Seitenarm, Teich (NP Donauauen) & Silberlacke (NP Neusiedlersee)

Die Verteilung der gemessenen PFAS war in den jeweiligen Nationalparks vergleichbar und die ermittelten Konzentrationen, insbesondere der Pflanzenproben, nahmen vom Hauptgewässer zu den Nebengewässern tendenziell ab. Im Nationalpark Donauauen wurde ein leicht unterschiedliches Verteilungsprofil am Probenahmestandort "Teich" hinter dem historischen Hochwasserdamm ermittelt, was in Bezug auf den Hauptstrom und den Seitenarm auf unterschiedliche Eintragspfade schließen lässt. Im Nationalpark Neusiedlersee waren die gemessenen PFAS-Konzentrationen im "Strandbad Illmitz" am höchsten. Die dort gemessenen Werte waren auch höher als die Vergleichswerte aus den Donauauen, wobei sich besonders PFHxA in der Wasserprobe und PFHxS in den Pflanzenproben hervorhoben. In den Wasserproben beider Nationalparks wurden durch das TOP-Assay PFAS-Vorläufersubstanzen nachgewiesen. Unter den Pflanzenproben differierten die gemessenen Konzentrationen teilweise um Zehnerpotenzen und PFBA stellt mit einem Anteil von mehr als 75 % an der Summe der 20-EU-PFAS die dominierende Einzelsubstanz dar. Der geometrische Mittelwert beträgt rund 1300 ng/kg dw. Die dominierende Substanz unter den langkettigen PFAS war PFOS mit einem geometrischen Mittel von über 60 ng/kg dw. Einzelne Pflanzen zeigten ein deutlich erhöhtes Akkumulationspotential gegenüber dem Rest, darunter der Efeu und die Baumflechte.

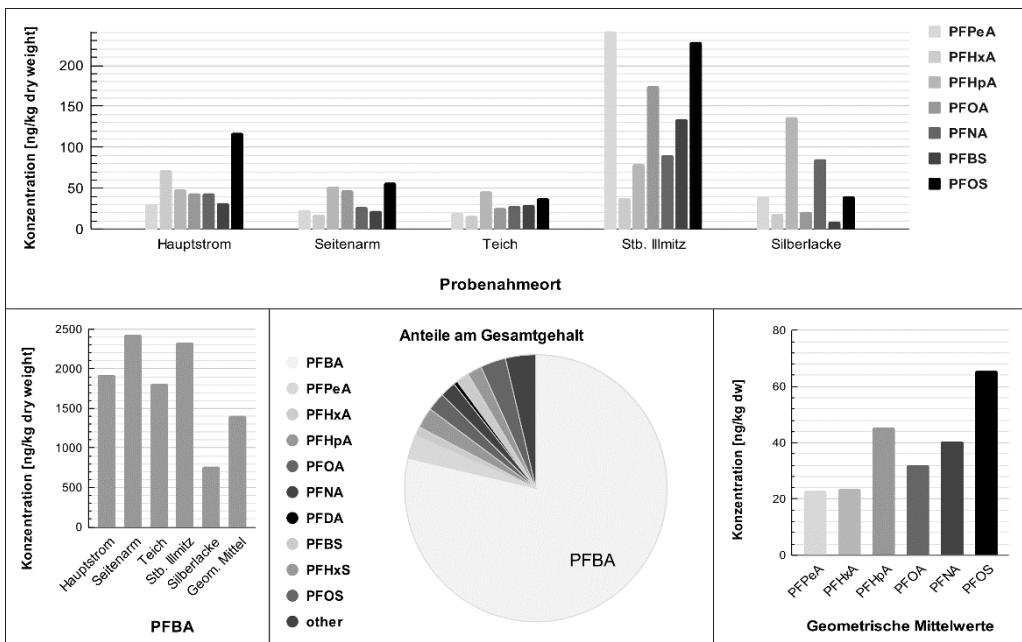


Abb. 2: PFAS-Messwerte der Pflanzenproben in ng/kg dw. Oben: Arithmetische Mittelwerte der gemessenen Konzentrationen sortiert nach Probenehmestandort. Die erhöhten Werte für Perfluorpentansäure (PFPeA) im Stb. Illmitz sowie PFHxA bei der Silberlacke beruhen auf Messwert-Ausreißern, die im arithmetischen Mittel zu einer Überschätzung führen. Links unten: Arithmetische Mittelwerte der gemessenen PFBA-Konzentrationen nach Probenehmestandort sowie geometrischer Mittelwert aller PFBA-Messwerte. Mitte unten: Anteile der jeweiligen PFAS an der Summe 20-PFAS aller Pflanzenproben. Die Reihenfolge der Substanzen folgt dem Uhrzeigersinn. Unten rechts: Geometrische Mittelwerte relevanter PFAS-Einzelsubstanzen

4 ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass im Osten Österreichs selbst in Nationalparks mit einer Hintergrundbelastung durch PFAS zu rechnen ist. Die dominierenden Komponenten sind die Perfluorcarbonsäuren (PFCA) von C4 bis C9 und PFOS. Diese lassen sich verschiedenen Verwendungsgruppen zuordnen (Glüge et al. 2020). Der Ursprung von gemessenen PFAS-Belastungen lässt sich jedoch kaum zuordnen, da oftmals unterschiedliche PFAS in gleichen Anwendungsbe reichen eingesetzt werden oder einzelne PFAS aufgrund von Beschränkungen entsprechend substituiert wurden. Atmosphärischer Eintrag spielt sehr wahrscheinlich eine wesentliche Rolle, ebenso durch Industrieabwasser geprägte Oberflächengewässer (Uferfiltrat), sowie verschiedene Freizeitaktivitäten und Sportausrüstungen (Müller et al. 2023). Es konnte gezeigt werden, dass selbst in ausgedehnten Schutzgebieten ein Eintrag von PFAS nachweisbar ist und sich einzelne PFAS-Verbindungen, besonders PFBA, in verschiedensten Pflanzen anreichern können. Die Messungen im Strandbad Illmitz zeigen deutlich den anthropogenen Einfluss beim Eintrag der PFAS in die Umwelt. Bekannt ist, dass Segel und Windsurfbretter teilweise mit PFAS-basierten Beschichtungen behandelt werden, um die wasserabweisenden Eigenschaften zu verbessern und das Material vor UV-Strahlen, Salz und Verschleiß zu schützen. Auch Neoprenanzüge können PFAS-haltige Beschichtungen enthalten, um die Wasserabweisung zu erhöhen und die Trockenzeit zu verkürzen. Die Verwendung von PFAS in kosmetischen Produkten ist ebenfalls dokumentiert (Lara Schultes 2018). Dies wären denkbare Eintragsquellen an einem durch Wassersport und Badeaktivitäten beeinflussten Standort.

In Bezug auf die Bodenproben liegen die gemessenen Konzentrationen deutlich unterhalb des im Bundesabfallwirtschaftsplan geforderten Grenzwertes von 2 µg/kg (Bundesministerium für Klimaschutz, 2023) und können dadurch recht eindeutig als Hintergrundbelastung ausgewiesen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- BGBI. II Nr. 304/2001, B. f. (2024). über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung).
- Bundesministerium für Klimaschutz, U. E. (2023). Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023. Wien.
- DIN 38407-42, D. E.-, -u.-G.-T. (2011). Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Wasser - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) nach Fest-Flüssig-Extraktion.
- DIN 38414-14, D. E.-, -u.-S.-T. (2011). Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Schlamm, Kompost und Boden - Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS).
- Fenton, S. E., Ducatman, A., Boobis, A., DeWitt, J. C., Lau, C., & Ng, C. (2021). Per- and Polyfluoroalkyl Substance Toxicity and Human Health Review: Current State of Knowledge and Strategies for Informing Future Research. *Environmental toxicology and chemistry*.
- Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I. T., DeWitt, J. C., Goldenman, G., Herzke, D., . . . Wang, Z. (2020). An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environmental Science Processes & Impacts*.
- Houtz, E. F., & Sedlak, D. L. (2012). Oxidative Conversion as a Means of Detecting Precursors to Perfluoroalkyl Acids in Urban Runoff. *Environmental Science & Technology*.
- Kurwadkar, S., Dane, J., Kanel, S. R., Nadagouda, M. N., Cawdrey, R. W., & Ambade, B. (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances in water and wastewater: A critical review of their global occurrence and distribution. *The Science of the total environment*.
- Lara Schultes, R. V. (2018). Per- and polyfluoroalkyl substances and fluorine mass balance in cosmetic products from the Swedish market: implications for environmental emissions and human exposure. *Environmental Science Processes & Impacts*.
- Müller, V., Costa, L. C., Rondan, F. S., Matic, E., Mesko, M. F., Kindness, A., & Feldmann, J. (2023). Per and polyfluoroalkylated substances (PFAS) target and EOF analyses in ski wax, snowmelts, and soil from skiing areas. *Environmental Science Processes & Impacts*.
- Nassazzi, W., Lai, F. Y., & Ahrens, L. (2022). A novel method for extraction, clean-up and analysis of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in different plant matrices using LC-MS/MS. *Journal of Chromatography B*.
- Podder, A., Sadmani, A. H., Reinhart, D., Chang, N.-B., & Goel, R. (2021). Per and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) as a contaminant of emerging concern in surface water: A transboundary review of their occurrences and toxicity effects. *Journal of hazardous materials*.
- Richtlinie 2000/60/EG, d. e. (2000). zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpoltik.
- Wang, Y., Munir, U., & Huang, Q. (2023). Occurrence of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Soil: Sources, Fate, and Remediation. *Soil & Environmental Health*.
- Xu, B., Qiu, W., Du, J., Wan, Z., Zhou, J. L., & Chen, H. (2022). Translocation, bioaccumulation, and distribution of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in plants. *iScience*.

Datenbereitstellung für KI-Systeme - Fallbeispiele und ihre Herausforderungen

Alexia Tischberger-Aldrian¹, Klemens Winkler², Valeria Fonseca Diaz³, Roman Rainer³, Felix Strohmeier⁴, Melanie Neubauer⁵, Elmar Rückert⁵, Gerhard Ebenhofer⁶, Thomas Pönitz⁶ & Gerald Koinig¹

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

²⁾ K1-MET GmbH, Area 3, Linz, Österreich

³⁾ Software Competence Center Hagenberg, Hagenberg, Österreich

⁴⁾ Salzburg Research Forschungsgesellschaft mbH, Intelligent Connectivity, Salzburg, Österreich

⁵⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Cyber Physical Systems, Leoben, Österreich

⁶⁾ PROFACTOR GmbH, Visual Computing, Steyr-Gleink, Österreich

KURZFASSUNG: Künstliche Intelligenz (KI) liegt im Trend und die Erwartungshaltung aller ist entsprechend groß. Vielen ist jedoch nicht bewusst, dass KI-Systeme aufwendig trainiert werden müssen und die Auswahl und Bereitstellung der Trainingssets die Richtigkeit und Funktionsfähigkeit der KI entscheidend beeinflussen. Erforderliche Daten mit dem notwendigen Detailgrad sind in der Recyclingbranche zumeist kaum bis gar nicht vorhanden. Im vorliegenden Beitrag werden Herausforderungen bei der Datenbereitstellung der KI-Systeme für das Leitprojekt KIRAMET vorgestellt.

1 DIE AUSGANGSLAGE

Die hohen Recyclingquoten im Metallrecycling dürfen nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch die Metallrecyclingbranche zukünftig vor vielfältigsten Herausforderungen steht.

Volkswirtschaftlich liegen diese Herausforderungen im steigenden Metallbedarf (allgemein, aber einiger Elemente im Besonderen), der hohen Importabhängigkeit für die gesamte Europäische Union (EU), sowie geopolitisches Versorgungsrisiko und die volatilen Metall- und Energiepreise. Gleichzeitig werden die Märkte mit neuen Produkten (neue Materialmixe) geflutet und die Produktkomplexität nimmt zu. Auch die zunehmende Miniaturisierung führt zur verstärkten Metalldissipation. (Hagelüken 2022)

Die Menge an (getrennt) gesammelten End-of-Life (EoL) Produkten muss noch weiter erhöht werden (z.B. wurden ca. 23.000 t Elektroaltgeräte im Jahr 2020 über den Restmüll entsorgt) und es müssen endlich stärker wirkende Maßnahmen getroffen werden, um den Export von EoL-Produkten zu verhindern. Am Beispiel Altfahrzeuge ist dieser Schwund besonders eklatant und augenscheinlich: 2020 wurden in Österreich rd. 215.000 PKW aus dem Bestand ausgeschieden, davon wurden lediglich 50.944 PKW verwertet, was einem Anteil von knapp 24 % entspricht. Der Rest wurde illegal ins Ausland verbracht. (BMK 2023) Auch bei anderen EoL-Produkten wie Elektroaltgeräten (EAG) ist die Situation ähnlich, Schätzungen gehen von 15.000 t EAG aus, die pro Jahr illegal ins Ausland abwandern, mit einem Wert von über 10 Mio €. (WKO 2014)

Grundsätzlich zählen Post-Consumer Abfälle wie z.B. Haushaltsschrotte aus der Sperrmüllsammlung, EAG-Großgeräte und Altfahrzeuge zur sogenannten „urbanen Mine“. Sie zeichnen sich durch hohe Metallgehalte aus, die deutlich höher ist als in den meisten geologischen Lagerstätten und haben daher großes Potenzial zum Recycling. (Hagelüken & Goldmann 2022) In diesen Abfällen fallen die Metalle allerdings nicht sortenrein, sondern in Form von Materialverbundmischungen an, d.h. verschiedene Metalle liegen als Kunststoff-Metallverbunde, Metall-Metallverbunde bzw. Legierungen vor. Hinzu kommt, dass diese EoL-Produkte eine Vielzahl an unterschiedlichen Elementen und Legierungen enthalten, es handelt sich zumeist um komplexe Materialmischungen innerhalb derselben Komponente. Eine weitere Herausforderung ist die Sammlung dieser EoL-Produkte. In den meisten österreichischen Abfallsammelzentren erfolgt die Sammlung nicht produktspezifisch, sondern alle Abfälle werden mehr oder weniger

gemeinsam erfasst. In der derzeitigen Recyclingroute werden diese Abfälle in Großshredderanlagen zerkleinert und die dabei entstehende Stahlfraktion aufgrund ihrer minderen Qualität ins Ausland und zum Teil sogar ins Nicht-EU-Ausland verbracht.

Die Studie von Dworak & Fellner (2021) zeigt, dass bis zum Jahr 1980 mehr Neuschrotte als Altschrotte anfielen. Mittlerweile macht der Altschrott mehr als 60 % des gesamten EU-Stahl-schrotts aus. Auch die Qualitäten der heutigen Altschrotte haben im Vergleich zu den 60er Jahren massiv abgenommen und können bei einer vierstufigen Skala nur noch der schlechtesten und vorschlechtesten Qualität zugeordnet werden, während Neuschrotte der höchsten Qualitätsstufe zugeordnet werden können.

Paradoxalement muss gleichzeitig qualitativ höherwertiger Schrott nach Österreich importiert werden, um den Schrottbedarf für die Metallproduktion zu decken. Hinzu kommt, dass viele stahlherstellende Unternehmen in Europa von der Hochofenroute auf die CO₂-ärmere Elektrolichtbogenofenroute umsteigen werden, wodurch der Schrotteinsatz ebenfalls ansteigen wird.

Österreich zeichnet sich durch die höchste Pro-Kopf-Stahlproduktion der Welt aus (AUT: 0,9 t/Jahr/Kopf; EU: 0,35 t/Jahr/Kopf; weltweit: 0,25 t/Jahr/Kopf). Zudem kommt auch, dass in Österreich ein sehr anspruchsvolles Produktpotential gefertigt wird, v.a. Flacherzeugnisse erfordern einen hohen Reinheitsgrad der Einsatzstoffe. (Dworak et al. 2023)

Hinzu kommt, dass es in Österreich auch für die Shredderrückstandsfraktionen eine einzigartige Kombination zweier Verfahren zur Rückgewinnung von Metallen (v.a. Kupfer) aus diesen herausfordernden Fraktionen gibt. Dabei handelt es sich um eine mechanische Aufbereitung mit nachfolgender pyrometallurgischer Verwertung der aus der mechanischen Aufbereitung resultierenden Restfraktion bestehend aus Flusen und Sand. (Bernegger et al. 2023)

Es ist also mehr als erstrebenswert, die metallischen Abfälle in Österreich zu halten und die daraus resultierenden Schrotte bestmöglich auf nationaler Ebene zu verwerten und die bestmögliche Wertschöpfung daraus zu generieren.

2 DAS LEITPROJEKT „KIRAMET – KI BASIERTES RECYCLING VON METALLVERBUND-ABFÄLLEN“

Je größer die Stoffvielfalt ist und je komplexer die Materialverbunde sind, desto herausfordernder wird das Recycling. (Hagelüken 2022) Die Herausforderungen bei der Transformation von Post Consumer Abfällen zu Sekundärrohstoffen mit hoher Wertschöpfung sind sehr komplex und nur über eine integrative Betrachtung des gesamten Recyclingprozesses lösbar. Das Projektteam des Leitprojekts KIRAMET, bestehend aus 14 Unternehmenspartnern und 5 wissenschaftlichen Partnern und einer sehr interdisziplinären Partnerstruktur, hat sich genau dieser Thematik verschrieben.

KIRAMET verfolgt das übergeordnete Ziel, durch den Einsatz von KI-basierten Methoden die Effizienz des bestehenden Recyclingprozesses zu erhöhen, um große Mengen an Altschrott in Form von qualitativ hochwertigen und national verwertbaren Metallfraktionen mit ökonomisch vertretbarem Aufwand unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte bereitzustellen, und damit einen wesentlichen Beitrag zur Klimaneutralität, Rohstoffversorgung und Erhöhung der realen Recyclingfähigkeit zu leisten. Daraus leiten sich vier konkrete Projektziele ab: (1) Entwicklung und Umsetzung einer KI unterstützten, kaskadisch-geführten Sortierstraße zur möglichst ökonomischen und effizienten sensorgestützten Partikelortierung (Tool Box „Smart Sort“), (2) Entwicklung und Umsetzung einer Prozess-Modellierungs- und Optimierungsumgebung zur Erstellung von digitalen Zwillingen zur Prozesssimulation und Ableitung optimaler Prozessführung (Tool Box „Smart Twin“), (3) Etablierung eines Datenflusses für recyclingrelevante Daten (u.a. Bewertung der realen Recyclingfähigkeit von Produkten und Komponenten) der im Projekt betrachteten Abfallströme (Tool Box „Smart Waste“), (4) Entwicklung und Bereitstellung einer „Intelligent Recycling Platform“ zur übergeordneten Prozesssteuerung und Vernetzung aller beteiligten Partner entlang der Wertschöpfungskette.

3 DIE KRUX MIT DER KI

Obwohl KI bereits seit Jahrzehnten in verschiedenen Formen verwendet wird, gibt es keine einheitliche Definition dafür. Beschreiben lässt sich KI laut „Association for the Advancement of Artificial Intelligence“ als „...das wissenschaftliche Verstehen der Mechanismen, die dem denkenden und intelligenten Verhalten zugrundeliegen und deren Implementierung in Maschinen“ (Scherk et al. 2017). Der Hype um KI begann etwa um 2010 und reißt seitdem nicht mehr ab. Wesentlich dabei sind a.) die steigende Rechenperformance von Computern, b.) die digitale Verfügbarkeit von großen Datenmengen und c.) große Verbesserungen bei maschinellen Lernansätzen und Algorithmen. (Scherk et al. 2017)

Spätestens seit dem Launch von ChatGPT ist KI in aller Munde und die Erwartungshaltung an das, was KI für unser Leben leisten kann, bei vielen Menschen extrem hoch. Der Begriff KI vermittelt den Eindruck, dass KI-Systeme intelligent und selbstlernend sind. Das ist jedoch nicht der Fall, denn alle KI-Systeme müssen mit entsprechenden Datensätzen zunächst trainiert werden. Das wiederum erfordert zumeist sehr viel menschliche Arbeit, da diese Datensätze (Bilder, Texte etc.) gesichtet, sortiert, annotiert – sprich aufbereitet werden müssen. Es ist mittlerweile auch bekannt, aber vielen trotzdem nicht bewusst, dass hinter ChatGPT und anderen KI-Systemen Millionen Menschen, sogenannte „Klickarbeiter“, stehen, um diese Systeme mit aufbereiteten Datensätzen zu versorgen, damit sie korrekt funktionieren können. Diese Menschen leben zumeist in Afrika oder Süd- und Mittelamerika und sind für ihre Tätigkeiten stark unterbezahlt. (Köver 2023) Die Forscherin Milagros Miceli (TU Berlin) verweist auch auf die zum Teil furchtbaren und traumatisierenden Inhalte der Daten (u.a. Missbrauch von Kindern, Gewalt, Mord, Folter), die – um sie von den ChatGPT-Nutzern bestmöglich fernzuhalten – von Menschen bearbeitet (gekennzeichnet) werden müssen. (Miceli 2024) Ein weiteres Problem ist der Bias (= Verzerrung oder Voreingenommenheit) von KI-Systemen, die zumeist auch bereits bei der Erhebung der notwendigen Datenbasis für das Training entstehen und zu einem fehlerhaften, diskriminierenden oder schlachtrichterfalschen Outputs führen können („Data Bias“). (Enaris 2024) Zudem ist zu berücksichtigen, dass KI nicht immer Output erzeugt, der richtig ist, sondern nur „richtig aussieht“. (Townsen Hicks 2024)

4 DIE FALLBEISPIELE IN KIRAMET

4.1 KI als effizientes SortierTool

Im Projekt KIRAMET wird für die Stahlfraktion von Großshredderanlagen ein Sortierprozess entwickelt, um Kupfer weitgehend abzutrennen. Die Stahlfraktion enthält im Regelfall verschiedene große kupferhaltige Teile, bestehend aus magnetischen Eisenstücken, die entweder im Inneren (z.B. bei Elektromotoren) oder außen (z.B. Spulen) Kupfer aufweisen. Größere kupferhaltige Stücke (sog. Meatballs) werden nach dem derzeitigen Stand der Technik manuell aussortiert. Theoretisch wäre eine Sortierung unter Zuhilfenahme von z.B. XRF oder LIBS möglich. Bei diesen Technologien handelt es sich jedoch um teure Aggregate mit relativ geringen Durchsätzen. Geplant ist daher in KIRAMET die Aussortierung der kupferhaltigen Teile mit möglichst kostengünstiger, KI gestützter Sortiertechnologie, unter Anwendung von VIS- und NIR-Kameras. Die Chancen der KI in diesem Bereich liegen klar auf der Hand. Neben den kostentechnischen Vorteilen dieser Sensoren sind sie auch einfacher in die bestehende Anlage integrierbar und KI-Systeme können große Datenmengen effizient auf Muster überprüfen.

Die verwendeten KI-Systeme (siehe Beiträge von Koenig et al. und Neubauer et al. bei der diesjährigen Recy&DepoTech) benötigen für das Training jedoch einen möglichst großen und vor allem validierten Datensatz. Hierzu wurden bisher beinahe 900 kg Shredderschrott untersucht

und durch manuelle Sortierung vorklassifiziert (Hohlkörper, Federn, Drähte, verschiedene nicht-metallische Teile usw.) und auch quantifiziert. Nach dieser Vorklassifizierung wurden aus jeder Materialklasse eine definierte Anzahl an Partikeln ausgewählt und in eine rund 5400 Shredderteile umfassende „Bibliothek“ aufgenommen, die in weiterer Folge als Datenbasis für die Trainings herangezogen wird. Neben entsprechenden Bildaufnahmen und NIR-Spektren wurden in der Datenbank auch zahlreiche Metadaten hinterlegt (z.B. chemische Zusammensetzung, Gewicht, verbale Beschreibung der Teile). Dazu musste jedes Teil annotiert werden, d.h. in den Bildaufnahmen den Metadaten zugeordnet werden.

Eine besonders große Herausforderung in diesem Use Case ist es, die Vielfalt der Shredderteile zu erfassen. Da das Shreddern ein stochastischer Prozess ist, werden selbst bei der Verarbeitung von identischen Produkten unterschiedliche Shredderteile erzeugt. (Heibeck et al. 2023) Zudem müssen die Shredderteile im KI-System korrekt abgebildet werden, ohne dass sich ein Bias ergibt. Erst die kommende Validierung der KI-Systeme wird zeigen, ob die hinterlegte Anzahl an Teilen ausreichend war oder das Trainingsset erweitert werden muss.

4.2 KI als Tool für Handlungsempfehlungen

Die Qualitäten der Outputfraktionen des Shredders können im Wesentlichen auch durch alle dem Shredder vorgelagerten Prozessschritte beeinflusst werden (z.B. Produktdesign, Produktion, (getrennte) Sammlung, Demontage). Derzeit findet jeder dieser Prozessschritte bei einem anderen Unternehmen statt, ein gezielter Austausch von Daten und Informationen ist denkbar schwierig (siehe Beitrag von Kaufmann et al. bei der diesjährigen Recy&DepoTech). In KIRAMET werden die Prozessschritte miteinander vernetzt und in einem KI-System abgebildet (siehe Beitrag von Fonseca Diaz et al. bei der diesjährigen Recy&DepoTech). Auf diese Art sollen die Art und Zusammensetzung des Inputmaterials mit Prozessdaten (Anlagenaggregate, Anlageneinstellungen) und der Bedarf der Verwerter miteinander verknüpft werden, um die optimalsten und vor allem kostengünstigsten Routen für bestimmte Metalle und Legierungselemente zu ermitteln. Der Benefit eines solchen Systems liegt klar auf der Hand: Um Tendenzen abzuleiten, können eine Vielzahl an unterschiedlichen Szenarien simuliert werden, ohne dass dazu experimentelle Versuche notwendig wären.

Die große Herausforderung liegt in der fehlenden Datenbasis in diesem Bereich, da kaum Informationen zur Zusammensetzung von Komponenten und Produkten in dem Detailgrad vorhanden sind, die de facto für solche KI-Systeme notwendig wären. Hinzu kommt der Transfer von Daten in das KI-System. Mitarbeiter am Schrottplatz haben oft viel Erfahrung, bewerten Materialien und Chargen oft qualitativ auf visueller Basis. Tatsache ist auch, dass Schrotte grundsätzlich kaum umfassend analytisch charakterisiert werden, da das experimentell extrem aufwendig ist. Die Frage ist hierbei, wie sich solche qualitativen Eindrücke möglichst quantitativ in die KI-Systeme übertragen lassen.

4.3 KI als Prognosetool

Im Projekt KIRAMET wird zudem KI als Prognosetool genutzt, um die Mengen und die Qualitäten zukünftiger Materialströme besser vorhersagen zu können und abzuschätzen, ob der gezielte Ausbau bestimmter Komponenten sinnvoll sein wird. Durch neue Fahrzeugtechnologien (E-Autos, Hybridautos) und Weiterentwicklungen am Automotive-Sektor werden sich die Art und Menge der eingesetzten Werkstoffe und Legierungen verändern. Die größte Herausforderung in diesem Zusammenhang ist folgende: Wenn KI im Recyclingbereich tatsächlich nachhaltig eingebunden werden soll, müssen die Datenbanken, die sich die KI bedient, dynamisch sein, um den vorhandenen Datenpool immer auf dem aktuellsten Stand zu halten. D.h. für Prognosezwecke

kann theoretisch zwar ein Trainingsset hinterlegt werden, aber die Daten werden sich über die kommenden Jahre hinweg graduell verändern, was über kurz oder lang zu einer überalterten Datenbasis und in weiterer Folge zu unbrauchbaren Ergebnissen führt. Ideal wäre es daher, die KI-Systeme von vornherein so zu gestalten, dass sie sich immer an einem frisch „gefütterten“ Datenpool bedienen können. Digitale Produktpässe könnten beispielsweise ein solcher Datenpool sein (siehe Beitrag von Strohmeier et al. bei der diesjährigen Recy&DepoTech).

Das Paradoxe dabei ist jedoch, dass es diesen Datenpool z.B. für die Automobilbranche bereits seit Jahrzehnten gibt. Die Datenplattform IMDS wird von fast allen Automobilherstellern gespeist und hier sind Daten in einem hohen und für die Recyclingbranche notwendigen Detailgrad eigentlich bereits vorhanden. Es ist durchaus verständlich, dass diese Datenbank viele vertrauliche Daten umfasst und nicht unkontrolliert genutzt werden kann. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Recyclingbranche diese Daten auch nicht in ungefilterter Form benötigt. Im Projekt KIRAMET wird derzeit erarbeitet, welche Informationen notwendig wären (z.B. im Rahmen von Digitalen Produktpässen), um hochwertiges Recycling bestmöglich zu unterstützen. Aktuelle Entwicklungen wie Catena-X oder Factory-X wurden initiiert, um den kontrollierten, vertrauenswürdigen Datenaustausch zukünftig zu ermöglichen, beschränken sich jedoch auf freiwillige, zumeist bilaterale und vertraglich geregelte Kooperationen. Neben IMDS existieren auch andere Plattformen, die relevante Informationen enthalten. Dazu gehören IDIS oder A2Mac1, K.a.p.u.t.t in Deutschland oder AltFahrzeug.at in Österreich. Die Extraktion und Bündelung der „richtigen“ Informationen, die für die Recyclingbranche dienlich sind, ist eine große Herausforderung der Zukunft.

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Das Konsortium des Projektes KIRAMET sieht im Metallrecycling die Chance und das Potential, KI aktiv als vergleichsweise günstige Technologie für die gesamte Recyclingbranche als unterstützendes Tool für unterschiedlichste Zwecke zu nutzen. Die Voraussetzungen sind allerdings zum einen ein hoher Digitalisierungsgrad und zum anderen verfügbare Daten im richtigen Ausmaß, Detailgrad und Informationsgehalt. Derzeit bestehen hier noch gravierende Defizite, denn Daten sind vielleicht nur punktuell vorhanden oder aber im Eigentum bestimmter Stakeholder. Hinzu kommt, dass ein unzureichender Digitalisierungsgrad in der Recyclingbranche die Nutzung von KI erschwert. Für das Metallrecycling wären Informationen über die Zusammensetzung von einzelnen Produktkomponenten sowie die Zusammensetzung des gesamten Produktes von großem Wert.

Für bestimmte Fragestellungen können bzw. müssen Daten sogar individuell von einzelnen Unternehmen erhoben und für die KI-Systeme bereitgestellt werden. In anderen Bereichen ist die Recycling-Branche nahezu ausschließlich auf die Datenbereitstellung der Produzenten oder Inverkehrbringer oder der im Wertschöpfungskreislauf vorangegangenen Prozessschritte und deren Stakeholder angewiesen. Das bedeutet, dass die in z.B. Digitalen Produktpässen zur Verfügung stehenden Daten nicht auf z.B. die Angabe der Eisen- und Nichteisenmetalle im gesamten Produkt beschränkt sein dürfen, sondern weitaus detailliertere Informationen zu Legierungselementen und Komponenten enthalten müssen. Allerdings wird es weder sinnvoll noch notwendig sein, die exakte Legierung oder die Zusammensetzung jeder noch so kleinen Komponente anzuführen.

Es wird die Aufgabe der Recyclingbranche sein, zu definieren, welche Informationen und Daten konkret in welchem Detailgrad tatsächlich notwendig sind, und hier wird auch KIRAMET einen wesentlichen Beitrag dazu leisten können.

Unternehmens- und branchenübergreifende KI-Systeme haben nur dann eine Chance ihr volles Potential zu entfalten, wenn Wege gefunden werden, Datensharing möglich zu machen.

DANKSAGUNG

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Leitprojektes „KIRAMET“, das vom österreichischen Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie gefördert wird (FFG Nr. FO 999899661).

LITERATURVERZEICHNIS

- BMK (2023) *Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023 – Teil 1*. Hrsg. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Wien.
- Dworak, S., Fellner, J., Beermann, M., Häuselmann, M., Schenk, J., Michelic, S., Cejka, J., Sakic, A., Mayer, J., Steininger, K. (2023) *Innovatives Stahlrecycling – Potenziale und Herausforderungen für innovatives und nachhaltiges Recycling*. Österr Wasser- und Abfallw 75, 97–107. <https://doi.org/10.1007/s00506-022-00903-3>.
- Enaris (2024) *Bias-Fehler in KI-Systemen*. Downloadbar unter: https://nexa.polito.it/wp-content/uploads/2024/02/Nexa_PDF.pdf. Zuletzt aufgerufen am 03.07.2024.
- Eurofer (2022) *European Steel in Figures 2022*. Brussels. Downloadbar unter: <https://www.eurofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2022/European-Steel-in-Figures-2022-v2.pdf>. Zuletzt aufgerufen am: 03.07.2024.
- Hagelüken, C. (2022) *Entwicklungen & Herausforderungen für die metallurgischen Standorte in Europa*. Vortrag im Rahmen der BGR-GERRI Rohstoffkonferenz 2022. Hannover & online, 5.-6.7.2022.
- Hagelüken, C., Goldmann, D. (2022) *Recycling and circular economy—towards a closed loop for metals in emerging clean technologies*. Miner Econ 35, 539–562. <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00319-1>.
- Heibeck, M., Richter, J., Hornig, A., Mütze, T., Rudolph, M., Reuter, M., Modler, N., Filippatos, A. (2023) Simulating the shredding process of multi-material structures for recyclability assessment. Materials & Design 232. 112167.
- Köver, C. (2023) *Wie Millionen Menschen für die KI schuften*. Downloadbar unter: <https://netzpolitik.org/2023/datenarbeit-wie-millionen-menschen-fuer-die-ki-schuften/>. Zuletzt aufgerufen am 03.07.2024.
- Miceli (2024) *There is no “AI” without Data Work*. Downloadbar unter: https://nexa.polito.it/wp-content/uploads/2024/02/Nexa_PDF.pdf. Zuletzt aufgerufen am 03.07.2024.
- Townsen Hicks, M., Humphries, J., Slater, J. (2024) *ChatGPT is bullshit*. Ethics and Information Technology. 26:38. <https://doi.org/10.1007/s10676-024-09775-5>.
- WKO (2014) *Illegaler Abfallexport kein Kavaliersdelikt*. UpDATE WKO. Downloadbar unter: <https://www.wko.at/oe/information-consulting/entsorgungs-ressourcenmanagement/update-kaernten-ausgabe-25-11-3.pdf>. Zuletzt aufgerufen am 03.07.2024.

KONTAKT

Dr. Alexia Tischberger-Aldrian
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben
<https://www.unileoben.ac.at/kiramet/home>

CO₂-Bilanzierung für eine chemisch-physikalische Behandlungsanlage

Hannes Menapace¹ & Felix Kleinsasser¹

¹ Peter Seppel Gesellschaft m.b.H., Feistritz/Drau, Österreich

KURZFASSUNG: Durch neue gesetzliche Vorgaben (z.B. Lieferkettengesetz, Nachhaltigkeitsberichterstattung), diverse Umweltmanagementsysteme und Anfragen von Kunden ist für eine Datenbereitstellung eine bestehende Stoffstrombilanzierung zur Behandlungseffizienz oftmals nicht mehr ausreichend. Kunden wollen somit vermehrt Aussagen zu den anfallenden THG-Emissionen bei der Abfallbehandlung erhalten um diese Daten in ihren Berichtslegungen zum Abfallaufkommen integrieren zu können, bzw. diese Parameter in Ausschreibungen als mögliche zusätzliche Entscheidungskriterien für die Bewertung von Angeboten aufzunehmen. Im konkreten Fall wurde eine CO₂-Bilanz für eine chemisch-physikalische Behandlungsanlage erstellt und die erhaltenen Werte dem CO₂-Aufkommen für den Transport der Abfälle (primär vom Kunden, sekundär aus der Anlage selbst zu nachgeschalteten Übernehmern) gegenübergestellt. Abschließend wurden die Änderung der prozentuellen Verteilung der Emissionen aus Behandlung, Verkehr) bei einem möglichen Umstieg von konventionellen Dieseltreibstoff auf alternativen, paraffinischen Diesel (HV100) bewertet.

1 BEWEGGRÜNDE FÜR DIE BILANZIERUNG

In den vergangenen Jahren ist das Interesse an der CO₂-Bilanzierung abfallwirtschaftlicher Anlagen sukzessive angestiegen. Einerseits ergibt sich dies aus Überlegungen zum Anlagenvergleich und freiwilligen Auditverpflichtungen (Kernindikatoren etwa bei ISO 14001, Festlegung von Umweltzielen), Umweltmanagementsystem für IPPC-Anlagen, anstehenden Nachhaltigkeitsreportings und durch stark gestiegene Kundenanfragen zu dieser Thematik. War es vor einiger Zeit noch vollends ausreichend, dem Kunden neben der Mengenaufstellung seiner Abfälle eine grobe Zuordnung stoffliches /thermisches Recycling, thermische Beseitigung, Deponierung zu liefern, so fragen Kunden – nach dem Preis – gezielt nach dem Fußabdruck für die Behandlung.

2 ANLAGENBESCHREIBUNG

Für die Bilanzierung wurde eine Anlage im Batchbetrieb betrachtet. Die Anlage besteht aus einem Übernahmebereich mit Bogensieb für die Abtrennung nicht pumpfähiger Stoffe als Sandfang, zwei Schlammbehälter als Pufferbehälter sowie zwei Mischbehältern mit Rühraggregaten. Die Beschickung der beiden Rührkesseln kann entweder über die Schlammbehälter oder direkt im Zuge der Anlieferung aus dem Saugfahrzeug erfolgen.

Die Behandlung besteht aus den Grundverfahren Fällung, Flockung und Neutralisation. Für die Fällung kommt hauptsächlich Calciumhydroxid zum Einsatz. Wenn vorhanden, werden auch Abfallstoffe – wie z.B. Kalkschlämme – für die Behandlung eingesetzt. Je nach Chargenzusammensetzung erfolgt weiters die Zugabe von Fertigmischungen wie etwa Schwermetallfäller auf Organosulfidbasis, Spaltmittel für die Emulsionsbehandlung, diverse Flockungshilfsmittel, Aktivkohle und Eisen(III)chlorid für eine Phosphatfällung. Nach einer analytischen Überprüfung des Behandlungserfolges erfolgt die Freigabe der Charge und das Überführen in einen dritten Schlammbehälter – von diesem aus erfolgt die Beschickung einer Kammerfilterpresse. Der hieraus anfallende Filterkuchen wird in einem Abrollcontainer zwischengelagert und in regelmäßigen Abständen, gemeinsam mit dem Sandfang aus dem Übernahmebereich, in eine externe Anlage zur Erzeugung von Industriebrennstoff (thermische Behandlung) verbracht.

Die anfallende Flüssigphase aus der Kammerfilterpresse läuft über mehrere Ölskimmer und Koalessenzabscheider um die Ölphase abzutrennen. Diese wird intern in das Lager für Altöl überführt und dann einer stofflichen Verwertung zugeführt. Die verbleibende Wasserphase wird noch über ein Filtervlies geführt und in einem Tank zwischengelagert. Von dort erfolgt eine arbeitstägliche Beprobung und Analyse auf die Indirekteinleitparameter gemäß Vertrag mit dem Kläranlagenbetreiber und der AEV Abfallbehandlungsanlage. Optional kann das Klarwasser auch noch einer nachgeschalteten Behandlung (Umkehrosmoseanlage) zugeführt werden, um einen Einsatz als Prozesswasser (z.B. Teilereinigung am Standort) zu ermöglichen.

Nachfolgend ist ein Materialfluss-Diagramm für die Mengenströme 2023 (diese bildeten die Datengrundlage für die Ökobilanzierung) dargestellt.

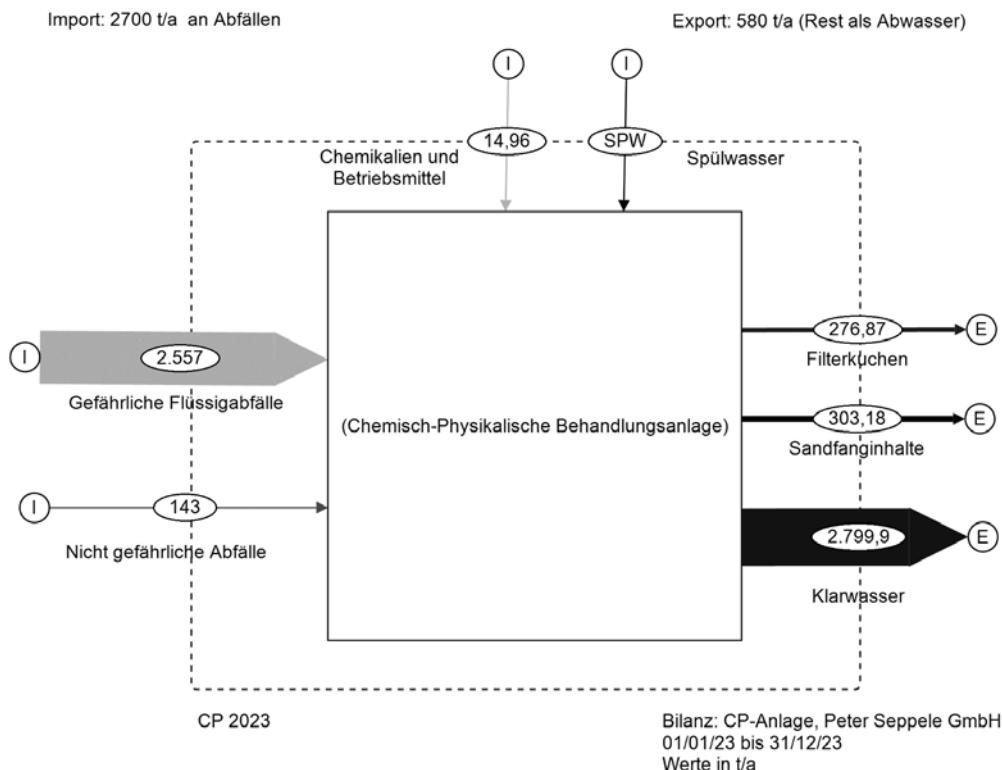


Abb. 1: Materialfluss-Diagramm mit dem Mengenaufkommen 2023

3 ÖKOBILANZIERUNG DER ANLAGE

Die eigentliche Ökobilanzierung der Anlage wurde extern an den Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft vergeben. Im erhaltenen Bericht (Rosskogler & Pomberger, 2024) zur Bilanzierung wurde nur das THG-Aufkommen durch den Betrieb der Anlage (durch den Chemikalieneinsatz und Stromverbrauch) selbst ermittelt. Die THG-Emissionen durch den Transport der Abfälle von der Anfallstelle beim Kunden zur Anlage, die etwaige Zwischenlagerung am Standort sowie das THG-Aufkommen durch den Transport der Sekundärabfälle zu nachgeschalteten Anlagen wurden nicht berücksichtigt. Die Indirekteinleitung der Abwässer aus der Anlage in die örtliche Kläranlage wurde ebenfalls nicht berücksichtigt.

Eine der eigentlichen CP-Anlage nachgeschaltete Umkehrosmoseanlage zur weiterführenden Behandlung der Prozessabwasser wurde in der Ökobilanz (Strombedarf, Chemikalieneinsatz für die Reinigung der Membrane) ebenfalls nicht berücksichtigt, da diese Anlage nur im Bedarfsfall eingesetzt wird und das CO₂-Aufkommen auf das insgesamt im Jahr 2023 behandelte Inputmaterial bezogen ist.

Nach Berechnungen von Roßkogler & Pomberger wurde für die Behandlung auf der Anlage ein Wert von 0,02162336 t CO₂-Äquivalente pro t an übernommenen Material erhalten.

3.1 Genutzte Software und Datenbanken

Für die Stoffstrombilanzierung der Anlage wurden die Betriebstagebücher sowie die Datensätze aus dem Wiege- und Lagerverwaltungssystem Contec verwendet. Das Sankeydiagramm für den Betrachtungszeitraum 2023 wurden in STAN erstellt. Für die Ökobilanzierung kam open LCA sowie die Datenbanken von Ecoinvent und vom Deutschen Bundesamt für Wirtschaft und Forschung zum Einsatz. Daten zum Strommix wurden für das Jahr 2023 vom Stromlieferanten angefordert, hierin wurde ein Strommix aus 100% erneuerbare Energien (71% Wasserkraft, 20% Windenergie, Rest sonstige erneuerbare) bestätigt.

3.2 Getroffene Vereinfachungen

Da die Behandlungsanlage über keinen Stromzähler verfügt, wurde für einen Zeitraum von 14 Tagen ein Stromzähler installiert und die Verbräuche aufgezeichnet. Der Durchschnittsverbrauch von fünf Werkstagen wurde dann für eine Hochrechnung des Jahresverbrauches an Strom herangezogen.

Im Betriebstagebuch der Anlage werden die zur Behandlung zusammengestellten Chargen und hierfür herangezogenen Reagenzien digital dokumentiert und sind so zuordnbar. Bei den beiden Mischbehältern erfolgt allerdings keine Unterscheidung zwischen organischen und anorganischen Fraktionen. D.h. die Bilanzierung wird nicht auf einzelne gefährliche und nicht gefährliche Abfallfraktionen bzw. Schlüsselnummern heruntergebrochen.

Die Anlage wird im Einschichtbetrieb nur Werktags betrieben. Für die Hochrechnung des Stromverbrauches (Betrieb der Rührwerke, Absauganlagen, Kammerfilterpresse) wurden die Tage an denen Abwasser in die Kanalisation der Verbandskläranlage eingeleitet wurde herangezogen und mit 10 Stunden pro Tag abgeschätzt, da die Anlage über keinen eigenen Betriebsstundenzähler verfügt.

4 THG-AUKOMMEN DURCH TRANSPORTE

Für die weiterführenden Betrachtungen zum THG-Aufkommen durch den Transport der Flüssigabfälle vom Kunden zur Behandlungsanlage einerseits und dem Abtransport der festen Sekundärabfälle aus der Anlage (Sandfanginhalte, Filterkuchen) in die nachgeschaltete Behandlungsanlage andererseits wurden Emissionsfaktoren für LKW (Umweltbundesamt, 2024) vom Umweltbundesamt herangezogen (737 g CO₂-Äquivalente pro km).

4.1 THG-Aufkommen mit konventionellem Diesel

Für den Transport der Flüssigabfälle kommen neben Saugfahrzeugen mit und ohne Hänger auch Transporter (Übernahme von Stückgut in IBC und/oder Fassware) zum Einsatz. Da bei einem Kunden (vor allem bei Abholung von Stückgut) das Fahrzeug in der Regel nicht voll beladen ist und daher in der Regel Sammeltouren zusammengestellt werden, wurde nach Auswertung der

Übernahmen 2023 ein mittlerer Umkreis von etwa 78 km und eine durchschnittliche Tonnage von 4,6 t pro Kunden angenommen. Unter diesen Annahmen ergibt sich für den Transport vom Kunden zur Anlage ein Wert von 0,025004087 t CO₂-Äquivalente pro t an Material

Für das THG-Aufkommen durch den Transport der Sandfanginhalte und des Filterkuchens aus der Kammerfilterpresse wurden die Wiege- und Fahrzeugdaten aus dem Jahr 2023 herangezogen. Insgesamt wurden 580 t mittels Abroller-LKW zur Behandlungsanlage (Hin und Retour jeweils 96 km, im Mittel jeweils etwa 20 t pro Transport) verbracht. Unter diesen Annahmen ergibt sich für den Transport vom Kunden zur Anlage ein Wert von 0,003487128 t CO₂-Äquivalente pro t an Sekundärabfall welcher einer nachgeschalteten Behandlung übergeben wurde.

4.2 Überlegungen zur Emissionseinsparung durch einen HV100-Einsatz

Der Einsatz von HVO (hydrotreated vegetable oil = hydriertes Pflanzenöl) als paraffinischer Diesel wird von den diversen Herstellern u.a. mit den erzielbaren Emissionseinsparungen beworben. So ist durchwegs von bis zu 90% geringeren CO₂-Emissionen die Rede (Verkehr, 2024). Durch Tourenoptimierung ist nur eine begrenzte Verringerung der Emission möglich (zeitnahe Entsorgung beim Kunden). Unter Annahme der ausreichenden Verfügbarkeit (die technische Umstellung auf HVO ist kein Problem) und einer 90% igen Emissionsreduktion bei den verkehrsbedingten Emissionen würde sich der Emissionsanteil durch die Transportvorgänge von knapp 57 % auf 11 % reduzieren.

Tab. 1: Entwicklung der Emissionen beim HVO-Einsatz

Emissionsquelle	Diesel [tCO ₂ eq/t input]	%	HVO [tCO ₂ eq/t input]	%
Behandlung	0,02162336	43,15	0,02162336	88,36
Eingang Transport	0,025004087	49,89	0,002500409	10,22
Ausgang Transport	0,003487128	6,96	0,000348713	1,42

5 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die Datenbereitstellung gestaltet sich für den Bereich der Chemikalien (Fertigmischungen) als schwierig, wodurch allgemeine Daten herangezogen werden mussten. Ein Vergleich der (abgeschätzten) THG-Emission aus Transport und Behandlung zeigt einen relativ hohen Anteil für das Aufkommen vom Kunden zur Behandlung. Da eine Tourenoptimierung (Entsorgungssicherheit für den Kunden) nur beschränkt möglich ist, erscheint die Substitution von Diesel mit HVO als interessante Verbesserungsmaßnahme zur Senkung der CO₂-Emissionen.

LITERATURVERZEICHNIS

- Roßkogler, S., & Pomberger, R. (2024). *End of Life - Bilanz Abfallfraktion*. Leoben: Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft.
- Umweltbundesamt. (2024). *Emissionsfaktoren für Verkehrsträger*. Von https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/mobilitaet/daten/ekz_fzkm_verkehrsmittel.pdf abgerufen
- Verkehr, B. f. (2024). *FAQ zu HVO 100*. Von <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/faq-zu-hvo-100.html#:~:text=Der%20entscheidende%20Unterschied%20zu%20fossilem,THG%20%2DEinsparung%20von%2087%20Prozent.> abgerufen

Digital Product Passport: Enabling Sustainable Supply Chain Management for Electric Vehicle Batteries

Claus Mersch¹, Felix Strohmeier² & Maria Dos Santos¹

¹⁾ iPoint-Austria GmbH, Research & Innovation, Vienna, Austria

²⁾ Salzburg Research Forschungsgesellschaft mbH, Intelligent Connectivity, Salzburg, Austria

ABSTRACT: The circular economy is a transformative approach that aims to decouple economic growth from linear resource consumption, thereby promoting environmental sustainability and resource efficiency. Digital Product Passports (DPPs) include data on product lifecycles to increase transparency, improve resource efficiency and extend product life. The Circular Economy (CE)-Pass project aims to assess the feasibility of a DPP and associated data exchange to improve the circularity of automotive products. The present study considers specific data needs of stakeholders over the life cycle of an electric vehicle battery leading to the development of a DPP-prototype. Persona workshops with experts were conducted to identify the potential passport "users" (e.g., battery designers, recyclers, etc.) and the most relevant data attributes for a digital battery passport. This led, applying a user-centered design approach, to the development of a holistic data model and prototype considering the stakeholder requirements. Circularity within the prototype will be supported by data transfer between stakeholders as well as relevant data attributes; e.g., product carbon footprint (Beginning of Life), dismantling instructions (End of Life), material circularity indicator, etc. The prototype shows visualizations of the data attributes and provides data relevant for stakeholders along the product's life cycle. The study further sheds light on the existing gaps in data and the challenges associated with exchanging information among stakeholders. This is illustrated by the example of the dismantling instructions required by the legislation.

1 INTRODUCTION

The European Union will soon mandate Digital Product Passports (DPP) across many industries. According to the battery regulation (Article 77, (European Union, 2023)) from 2027, each industrial battery with a capacity greater than 2 kWh and hence each electric vehicle battery placed on the market or put into service shall have an electronic record. Additionally, the End of Life Vehicle Directive mentions that a Circularity Vehicle Passport will be requested as a digital instrument to provide dismantling and circularity information for every single vehicle, that is connected with other digital product passports (European Commission, 2023). Also, the Ecodesign for Sustainable Products Regulation (Article 8) refers that specific products can only be placed on the market or put into service if a product passport is available (European Council, 2022).

A Digital Product Passport (DPP) is a structured collection of product related data with pre-defined scope and agreed data management and access rights conveyed through a unique identifier and that is accessible via electronic means through a data carrier (CIRPASS project, 2023). In a nutshell, a DPP is a digital record that provides information about a product's life cycle, including for example, information related to sustainability, circularity, value retention for re-use, remanufacturing, and recycling. DPPs could enhance the sustainable production; extending product lifetimes, optimizing product use, and providing new business opportunities to economic actors through circular value retention and extraction. Passports are likely to enable the transition to a circular economy by increasing material and energy efficiency, helping authorities to verify compliance and supporting consumers to make sustainable choices (Götz et al., 2022).

The focus of this study is on the Digital Battery Passport (DBP) as part of electric vehicle batteries, and relates to two complementary research projects: CE-Pass, focusing on traction batteries for electric vehicles (CE-PASS, 2024) and IDcycLIB working on recycling of lithium-ion batteries (IDcycLIB, 2024). The aim of this research is to assess the impact of a DBP on Batteries' End of

Life (EoL) stakeholders. In the above research projects, a prototype was developed taking into account the designer and recycler "Personas".

The CE-Pass project evaluates the feasibility of a DBP and the associated data exchange to improve sustainability and circularity of automotive products. The IDcycLIB project aims to develop an automatically recyclable "green" lithium-ion battery and to map its life cycle digitally with the help of a digital twin and battery passport.

2 METHODOLOGY

The methodology of the study aims to streamline Digital Battery Passports (DBPs) for enhancing sustainable recycling practices. We conducted interviews, developed personas, and reviewed regulations to understand the diverse needs within the product lifecycle, with a particular focus on recyclers. To achieve this, we leveraged insights from the IDcycLIB project and refined the DBP prototype to meet recyclers' needs effectively, incorporating a user rights management system for secure data sharing in line with Catena-X Automotive Network standards (IDcycLIB, 2024). This prototype was validated extensively to ensure its practical applicability and alignment with circular economy principles.

2.1. *Conceptual Framework and Preliminary Analysis*

The initial phase focused on comprehending needs and expectations across the lifecycle of products/components. It aimed at gathering detailed requirements and insights, ensuring the solutions were aligned with industry needs and compliance standards. Engagement with industry stakeholders was crucial. This was achieved through interviews. Additionally, a thorough review of relevant regulations and guidelines was conducted. This made it possible to establish a comprehensive conceptual framework to understand the potential of DBPs in promoting sustainability within the automotive sector.

2.2 *Development of Prototype*

The objective of the prototype development was translating the insights and requirements gathered into a tangible solution. To simulate interactions between various systems, two prototypes were created: one by iPoint and another by Salzburg Research Forschungsgesellschaft (SRFG). The development phase of iPoint is described by the following key steps:

User-Centered Design: The prototype was developed by using User-Centered Design (UCD) process, which is rooted in the ISO standard 9241-210:2019. The UCD process is a product design methodology that prioritizes the users and their needs throughout the design journey. This process follows a well-defined set of techniques for analysing, designing, and evaluating software interfaces. This focus on user needs led to the prototype's design being intuitive and efficient, facilitating ease of navigation through the creation of distinct information sections, thereby making the prototype more accessible and beneficial for all stakeholders involved.

Personas Development: In the early stages of product development or redesign, personas serve as a pivotal tool. A "persona" is a fictional but realistic representation of a key user group, created based on research and insights into actual user needs, behaviors, and goals. These personas are helpful in guiding the development process, ensuring that the end product aligns closely with the expectations and requirements of its intended users. This study focuses on the needs of a battery recycler, highlighting the critical importance of accessing detailed lifecycle information, to optimize EoL processes, recover valuable materials, and minimize environmental impact.

Data Model Development: The Master Data Model offers a structured way to manage and share product data throughout its life. It features a robust tree like data model (see Figure 1), incorporating advanced access rights management to ensure secure storage and sharing of sensitive information, like documents (see Figure 2) for example with EoL stakeholders. This model is scalable and adaptable, addressing the evolving requirements of the Battery Pass initiative (BatteryPass, 2024).

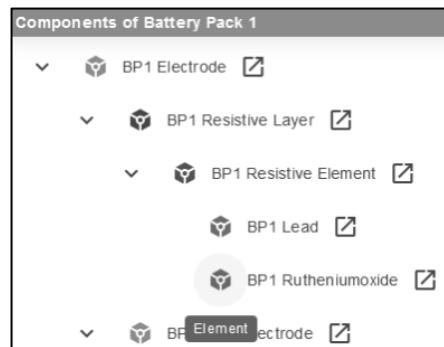


Fig. 1: Data model tree structure - SRFG prototype

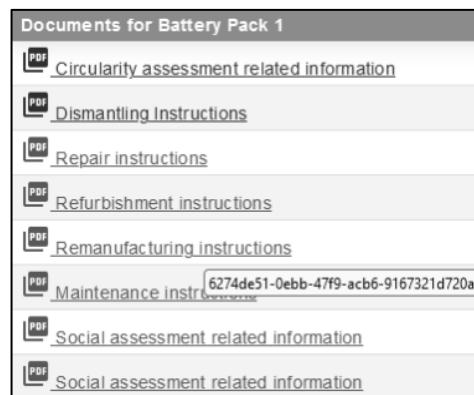


Fig. 2: Document references - SRFG prototype

2.3 Testing and Validation

Following the development of the prototype, testing and validation exercises were conducted. This phase ensured that the prototype not only meets the technical specifications and user requirements, but also demonstrated real-world applicability and effectiveness in enhancing sustainable recycling practices through the use of DBPs. The feedback generated was crucial for refining the prototype, ensuring it effectively addresses the challenges associated with DBPs and sustainable recycling practices.

3 RESULTS

Digital Battery Passports offer valuable information beneficial for EoL stakeholders, including recyclers. The DBP encompasses several key categories of information: material/product summary, recycled content & circularity, compliance, carbon footprint & Life Cycle Assessment (LCA) summary, and essential documents (see Figure 4).

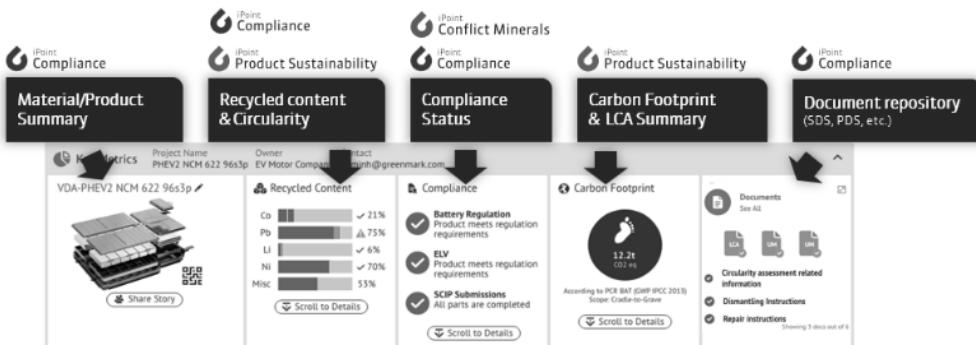


Fig. 3: DBP key metrics overview – iPoint Prototype

These categories are integral to improving the recycling process, improving operational efficiency, and supporting sustainability efforts.

Material/Product Summary: This category provides crucial data for recyclers, detailing the battery's dimensions, weight, materials, and included parts. Such information is vital for EoL stakeholders to optimize logistics and make informed decisions at the recycling stage. It assists in the identification of batteries that may necessitate specific handling procedures, whether due to the need for specific disassembly tools or the presence of materials that necessitate particular treatment methods.

Recycled Content & Circularity: Information on circularity not only includes details about the recycled material content, but also provides guidance on separate collection, EoL procedures, waste prevention, and safety requirements.

Compliance Status: This section is beneficial for the safety aspect of recycling operations. It confirms that the battery meets all regulatory compliance requirements, ensuring that recyclers are handling products that adhere to safety standards and regulations. This is necessary for maintaining safe working conditions in recycling facilities.

Carbon Footprint: This section focuses on showcasing the batteries' carbon footprint. It presents important data and the relevant information to back up these numbers, offering insights into the environmental impact of the battery throughout its lifecycle. This information is relevant for stakeholders looking to minimize the ecological footprint of their products.

Documents: This category includes practical aspects of battery recycling; e.g. detailed instructions for disassembly, repair, refurbishment, and recycling. Such documents might include comprehensive guides related to the recycling process as well as additional information (tools required, diagrams, etc.). This ensures that recyclers have access to the necessary information to recycle batteries efficiently and safely.

These categories underscore the DBP as a tool for EoL stakeholders, streamlining access to comprehensive information across various critical domains. The results are organized into several key areas.

Optimizing Recycling Logistics: The DBP plays an important role enhancing the efficiency of recycling logistics. By offering detailed recycling instructions — for instance, the necessity of removing the battery management system before crushing, and providing safety guidelines for handling batteries with damaged cells — the DBP ensures that batteries can be processed in an efficient and safe manner by recyclers.

Promoting Sustainable Recycling Practices: The introduction of the DBP is a significant leap towards fostering sustainable recycling practices within the battery industry. It aids in the safe and effective recycling of batteries, crucial for both environmental preservation and the recovery of valuable materials. This is especially relevant for electric vehicle (EV) batteries, which may contain hazardous materials or complex components requiring specialized handling.

Facilitating Access to Information: One of the DBP's features is its ability to grant recyclers access to information not available to the public. This access is vital for obtaining detailed recycling processes and dismantling instructions, which were previously challenging to access and relied on time-consuming methods.

Improving Transparency and Accountability: DBPs contribute to transparency and accountability within the recycling ecosystem by offering a secure and standardized platform for the exchange of information. DBPs facilitate better material tracking throughout the recycling chain. This transparency is crucial for building trust among stakeholders, including manufacturers, recyclers, and consumers, who are increasingly concerned about the environmental impact of products and their end-of-life treatment.

4 DISCUSSION

A point of discussion is how recyclers should contribute to DBP data. Allowing recyclers to update DBPs with information on the share of materials recovered and the recycling processes used could enrich the passport's data pool. This information possibly will be helpful in conducting more comprehensive Life Cycle Assessments (LCAs), facilitating a deeper understanding of the environmental impacts associated with different stages of a product's lifecycle. Moreover, this practice could promote transparency in the recycling process, enabling manufacturers to trace the end-of-life outcomes of their products and encouraging them to design more sustainable and easily recyclable products. Beyond the current scope, there is potential to extend the application of DBPs to encompass a broader range of information that may possibly support the circular economy. For example, integrating data on the potential for reusing components or materials could guide not just recycling but also remanufacturing and refurbishing efforts. This might significantly reduce waste and the demand for primary raw materials.

To fully realize the benefits of DBPs, efforts should be made to enhance their accessibility and interoperability. Ensuring that DBPs can be easily accessed and understood by all stakeholders, including consumers, manufacturers, and recyclers, is crucial. Furthermore, developing standards for DBP interoperability would facilitate the exchange of information across different sectors and geographical regions, thereby supporting global efforts towards sustainability. As DBPs evolve, regulatory and ethical considerations regarding data privacy and security become increasingly important. It is essential to establish clear guidelines on who can access certain types of information and to ensure that sensitive data is protected. Balancing transparency with privacy and security will be key to maintaining stakeholder trust in DBP systems.

5 CONCLUSION

The information included in the prototype (see Figures 1 - 3) impacts stakeholders involved in the recycling. For recyclers, the relevance digital tools as the DBP, provide a source of detailed product information that is crucial for the efficient, safe, and environmentally responsible recycling. By accessing DBPs, EoL stakeholders gain insights into the specific composition and materials used in EV batteries, including any hazardous substances they might contain. This information is essential for determining the most appropriate recycling methods and ensuring that these processes are carried out safely and in compliance with environmental regulations. The detailed data available through DBPs, such as dismantling instructions, can streamline recycling operations by

reducing the time and effort needed to process EV batteries. This not only makes the recycling process more efficient but also potentially lowers costs.

Moreover, the safety of recycling operations is enhanced through the use of DBPs. The passports provide recyclers with critical information needed to identify and mitigate the risks associated with handling and processing EV batteries, such as the risk of fires or exposure to toxic materials. This contributes to a safer working environment for recyclers and helps prevent accidents.

Additionally, the environmental impact of disposing of EV batteries is reduced through more efficient and effective recycling processes facilitated by DBPs. Proper recycling supported by DBPs helps recover valuable materials, reduce waste, and minimize the carbon footprint associated with the production of new batteries.

During recycling of EV batteries, the DBP provides recyclers access to comprehensive and detailed information as well as improve the efficiency, safety, and environmental impact of recycling processes. This makes DBPs a pivotal tool in advancing sustainable recycling practices and contributing to the broader goals of a circular economy.

6 OUTLOOK

To realize a DBP's full potential, it is imperative to address current limitations and explore opportunities for expanding their application. This will require collaborative efforts among manufacturers, recyclers, policymakers, and other stakeholders to refine DBP frameworks, ensuring they not only serve as passports for information but also act as catalysts for innovation and sustainability in the product lifecycle. As we move forward, the continued evolution and adoption of DBPs will be instrumental in fostering a more sustainable, efficient, and circular economy. The full potential of DBPs extends beyond the current practice of simply providing access to information. The discussion around the retention of DBPs post-recycling and the possibility for recyclers to contribute data back to these passports opens up new avenues for enhancing the sustainability and efficiency of recycling processes. By retaining and enriching DBPs with data on recovered materials and recycling methodologies, a more robust dataset should be created, which can inform future LCAs and drive improvements in product design, material recovery, and recycling technologies.

REFERENCES

- BatteryPass. (2024). <https://thebatterypass.eu/about/>
- CE-PASS. (2024). [ce-pass-project. https://www.ce-pass-project.at/](https://www.ce-pass-project.at/)
- CIRPASS project. (2023). [Cirpassproject. https://cirpassproject.eu/wp-content/uploads/2023/03/CIRPASS-presentation.pdf](https://cirpassproject.eu/wp-content/uploads/2023/03/CIRPASS-presentation.pdf)
- European Commission. (2023). *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles, amending Regulations (EU) 2018/858 and 2019/1020 and repealing Directives 2000/53/EC and 2005/36/EC*. European Commission.
- European Council. (2022). *Regulation establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC*. Council of the European Union.
- European Union. (2023). *REGULATION (EU) 2023/1542 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION.
- IDcycLIB. (2024). <https://www.isc.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/IDcycLIB-innovation-platform-green-recyclable-lithium-ion-batteries.html>
- Thomas Götz, H. B. (2022). *Digital Product Passport: The ticket to achieving a climate neutral and circular European economy?* Cambridge Institute for Sustainability Leadership.

CONTACT

Dr Maria Dos Santos
maria.dossantos@ipoint-austria.at

Recycling kunstharzgebundener Schleifwerkzeuge

Sabrina Sasse¹, Sebastian Pentz¹, Lukas Lämmermaier¹, Niklas Diller¹ & Daniel Vollprecht¹

¹⁾ Institut für Materials and Resource Management, Lehrstuhl für Resource and Chemical Engineering, Universität Augsburg, Deutschland

KURZFASSUNG: Kunstharzgebundene Schleifscheiben werden in allen materialverarbeitenden Industriezweigen eingesetzt, wobei zwischen 30 und 50 % einer Schleifscheibe nach dem Einsatz als Abfall zurückbleiben. Die Herstellung von Schleifkörnern wie Schmelzkorund ist sehr energieintensiv. Der Grund für eine bisherige Deponierung von kunstharzgebundenen Schleifscheiben ist die nicht sortenreine und harzfreie Rückgewinnung der Schleifkörner, was einen Rezyklateinsatz bislang unmöglich macht. In dem von der Forschungsgemeinschaft Schleiftechnik (FGS) beauftragten Projekt wurden verschiedene Aufschlussmethoden wie der mechanische, chemische und thermische Aufschluss untersucht. Die Verfahrenskombination aus mechanischer Vorzerkleinerung mittels Einwellenzerkleinerer, Abtrennung des Glasfasergewebes mittels Zickzacksichter, thermischer Behandlung unter oxidierenden Bedingungen und Abtrennung von verbleibenden Harzresten mittels Luftstrahlmühle und abschließendem Abspülen mit Wasser lieferte Rezyklate hinreichender Qualität, die anhand rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen bewertet wurden.

1 MOTIVATION

Kunstharzgebundene Schleifscheiben werden in allen materialverarbeitenden Industriezweigen eingesetzt, wobei zwischen 30 und 50 % einer Schleifscheibe nach dem Einsatz als Abfall zurückbleiben. Die Herstellung von Schleifkörnern wie Schmelzkorund ist sehr energieintensiv. Der Grund für eine bisherige Deponierung von kunstharzgebundenen Schleifscheiben ist die nicht sortenreine und harzfreie Rückgewinnung der Schleifkörner, was einen Rezyklateinsatz bislang unmöglich macht. Frühere Untersuchungen der RWTH Aachen („Rückgewinnung von Schleifkörnern aus Produktionsabfällen flexibler Schleifmittel (ReCab)“, und „Entsorgungs- und Verwertungsmöglichkeiten von Schleifwerkzeugen“) zeigten, dass für flexible Schleifmittel eine thermisch-mechanische Verfahrenskombination geeignet ist (Giani et al. 2018). Die Herausforderung des aktuellen Projekts liegt in der Rückgewinnung von Rezyklaten aus faserverstärkten, kunstharzgebundenen Schleifwerkzeugen mit fluorhaltigen Schleifzusätzen. Das Ziel des Projekts ist die Klärung der Frage, ob die zukünftige Forschung eher auf mechanische, thermische oder chemische Prozesse bzw. auf welche Kombination der Verfahren zum Recycling kunstharzgebundener Schleifscheiben fokussiert werden sollte. In Laborversuchen wurden die drei Verfahrensrouten untersucht und ein systematischer Vergleich durchgeführt.

2 MATERIALEN UND METHODEN

2.1 Materialien

Als Ausgangsmaterialien der kunstharzgebundenen Schleifwerkzeuge wurden zum einen eine Schruppscheibe, zwei Arten von Trennscheiben und außerdem Schleifmittel auf Unterlage untersucht. In der Studie wurden hiervon Neuware, d.h. keine Abfälle verwendet. Diese enthielten wie in Tab. 1 dargestellt unterschiedliche Kornarten. Die Harzbindung war jedoch in allen Fällen auf Phenolharzbasis. Außerdem enthielten alle Materialien fluorhaltige Schleifzusätze, u.a. Kryolith (Na_3AlF_6), Kaliumaluminiumfluorid (KAIF_4) oder Kaliumtetrafluorborat (KBF_4).

Tab. 1: Untersuchte Materialien (M1 bis M4) mit Angaben zu Kornarten, Harzen und Füllstoffen

	M1 -Schrupscheibe	M2 -Trennscheibe 180mm	M3 -Trennscheibe 125mm	M4 -Schleifmittel auf Unterlage
Kornart	Korund, Zr-Korund, SiC	Einkristall-Korund, ummantelter Normal- korund (mit Eisen- oxidpulver)	Nur eine Kornart: Einkristallkorund	Keramikkorn, Halbedelkorund (ca. 1:1)
Harz	Bakelit: Phenolharz mit Resole (schmelzbare, lösliche Phenoplaste)+Novolak	Phenolharz mit Re- sole+Novolak	Phenolharz mit Resole+Novolak	
Gewebe	Glasfaserverstärkt	Glasfaserverstärkt	Glasfaserver- stärkt	
Füllstoff	Kryolith (Na_3AlF_6)	Kaliumaluminium-fluo- rid (KAIF_4)	KAIF_4	Kryolith/ KBF_4 CaCO_3

2.2 Methoden

Die untersuchten Aufschlussmethoden beinhalteten mechanische, chemische und thermische Verfahren. Zunächst erfolgte eine Vorzerkleinerung der Probe (10 kg) mittels Einwellenzerkleinerer (FA Erdwich). Die Maschenweite des eingesetzten Siebkorbes betrug 10 mm. Eine Teilprobe von 450 g wurde mittels Siebanalyse auf ihre Partikelgrößenverteilung untersucht. Der Output des Einwellenzerkleinerers wurde geteilt. Ein Teil wurde zunächst mittels Schneidmühle (FA Siebtechnik Tema) bis zur Ausgangskorngröße der Schleifkörner von <1 mm und anschließend mittels Kugelmühle feinzerkleinert, ein Teil wurde mittels Zickzacksichter (FA Hosokawa Alpine) in eine Leicht- und eine Schwerfraktion getrennt.

Das mittels Kugelmühle zerkleinerte Material, das ein Gemenge von Harz und Schleifkörnern darstellt, wurde mittels thermoanalytischer Messungen (Thermogravimetrie (TG) mit Abgasanalytik mittels Infrarotspektroskopie) charakterisiert, um die Zersetzungstemperatur des Harzes zu bestimmen. Darauf aufbauend wurden vorzerkleinerte Proben sowohl unter Luft im Muffelofen als auch mit erhöhtem Sauerstoffgehalt im Rohr Ofen erhitzt. Zudem wurde auch die unzerteilte Ausgangsprobe im Muffelofen unter Luft erhitzt.

Der Rückstand der thermischen Behandlung wurde mittels Autogenmahlung und Sichtung mittels Luftstrahlmühle behandelt, um verbliebene Harzanhäfungen abzuscheren und mit dem Feinanteil auszutragen. Um verbleibende Harzanhäfungen abzulösen wurden die Körner in verschiedenen Säuren und Alkoholen sowie mit Wasser nachbehandelt.

Das letztlich gewählte Verfahrensfließbild zeigt Abb. 1.



Abb. 1: Gewählte Verfahrenskombination

Sowohl der Input als auch die Outputs der einzelnen Prozessschritte wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) im Hinblick auf die Morphologie bzw. die chemische Zusammensetzung der Körner charakterisiert. Hierzu wurde ein Zeiss Merlin 450 mit Feldemissionskathode sowie die EDX-Detektoren von Oxford Instruments X-MaxN 80 und der Oxford Instruments Ultim Max 170 eingesetzt.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Aufschlussverfahrenskombination zur Trennung von Faser, Harz und Schleifkorn

Die Vorzerkleinerung mittels Einwellenzerkleinerer auf < 10 mm lieferte laut Siebanalyse einen Feinanteil < 2 mm von 58 %. Die weitere mechanische Zerkleinerung mittels Schneidmühle, auf <1 mm reichte noch nicht aus, um diese von Anhaftungen des Harzes zu befreien; die weitere Feinmahlung in der Kugelmühle mit dem Ziel der Abscherung dieser Anhaftungen beschädigte jedoch bereits das Korn. Die mechanische Vorzerkleinerung hinterließ jedoch die ebenfalls enthaltenen Glasfasern in undefinierter Länge. Mittels Zickzack-Windsichter gelang eine fast vollständige Faserabtrennung in die Leichtfraktion ohne den Verlust von Schleifkörnern. Die thermische Behandlung bewirkte bei allen Atmosphären eine Zersetzung des Harzes und führte zu einer weitgehenden Freilegung der Körner. Nach der thermischen Behandlung des Ausgangsmaterials im Muffelofen unter Luftsauerstoff liegt ein weitestgehender Aufschluss von Harz und Korn vor.

Mittels Luftstrahlmühle gelang eine weitgehende Desagglomeration verbrannter Harzreste und eine Abtrennung dieser in die Feinfaktion (<200 µm).

Die Behandlung der Körner mittels Säuren und Alkohol führte zu einer sehr hohen Reinheit der Rezyklate. Jedoch wurde auch bereits durch ein Abspülen der Körner in einem Bad aus destilliertem Wasser eine nahezu vergleichbare Reinheit der Kröner erreicht (Abbildung 2c).

3.2 Analyse von Kornform und Kornreinheit mittels REM/EDX

Abb. 2 zeigt die Schleifkörner nach der in 3.1 beschriebenen Aufschlussverfahrenskombination. Die Analysen mittels REM/EDX ergeben teilweise noch verbleibende Harzanhaltungen an ansonsten weitestgehend freigelegten Körnern, welche im wesentlichen unverbranntes Harz sowie fluorhaltige Rückstände aus Schleifzusätzen enthalten.

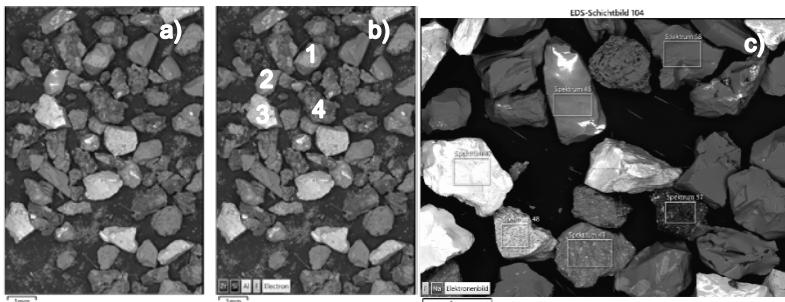


Abb. 2: recyclete Schleifkörner nach der in 3.1 beschriebenen Kombination an Aufschlussverfahren a) das RückstreuElektronenbild zeigt die Kornmorphologie; b) das EDX-Überlagerungsbild ergibt die Kornart sowie verbleibende Verunreinigungen nach Desagglomeration; c) saubere Schleifkörner nach abschließender Nachbehandlung im Wasserbad

Mittels EDX-Analysen erfolgte eine Zuordnung der in Abb. 2 markierten Körner (1-4) (Tab. 2). Bei Korn 1 handelt es sich um Siliciumcarbid, Schleifkorn 2 ist Korund, Korn 3 ist Zirkonkorund und Nummer 4 ein verbleibendes Rußpartikel mit Verunreinigung (u.a. Kohlenstoff als Harzrest und Fluor aus Schleifzusatzstoff). Der erhöhte Kohlenstoffanteil resultiert aus dem verwendeten Graphitpad zum Aufkleben der Körner im REM. Abb. 2c zeigt sehr saubere Körner nach dem abschließenden Abspülen mit Wasser.

Tab. 2: Detail EDX-Zusammensetzung [At.-%] der in Abb. 2 markierten Körner Nummer 1-4

At.-%	C	O	F	Na	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Zr
1	50,9	15,1	4,9	1,2	1,2	25,6	0,4	0,0	0,3	0,4	0,1
2	18,9	51,1	1,7	0,5	27,1	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0
3	25,7	42,9	7,8	1,6	16,6	0,1	0,5	0,1	0,4	0,4	4,0
4	66,0	17,3	7,9	2,3	2,1	0,3	1,3	0,1	0,6	2,3	0,0

4 AUSBLICK

Ziel eines laufenden Folgeprojekts ist die anschließende sortenreine Trennung der unterschiedlichen Kornarten. Hierfür werden Dichtetrennverfahren, Elektroscheidung, Trennung in magnetischen Feldern oder auch Flotation untersucht. Mittels Dichtetrennung können verschiedene Kornarten wie z.B. Korund von Siliciumcarbid oder auch Zirkonkorund getrennt werden. Über die Elektroscheidung gelingt möglicherweise eine Abtrennung innerhalb unterschiedlicher Korundvarietäten. Mittels Flotation soll eine Abtrennung aufgrund unterschiedlicher Benetzbarkeit untersucht werden. Die weiteren wissenschaftlichen Kriterien, anhand derer eine Bewertung erfolgen soll, umfassen wirtschaftliche Aspekte (Kosten des Recyclingverfahrens, Wert der Rezyklate, Deponie- und Transportkosten), technische Parameter (Wertstoffausbringen, Reinheit, Rezyklatqualität) und ökologische Faktoren.

LITERATURVERZEICHNIS

Giani, H., Althaus, M., Pretz, T., Schnell, M., Schenke, L., Horst, T., Hilebrand, T. (2018). Rückgewinnung von Schleifkörnern aus Produktionsabfällen flexibler Schleifmittel (ReCab). *Projektabchlussbericht*.

Benchmarking-Projekt zur Bemessung der Nachhaltigkeit von Kosmetikverpackungen

Michelle Klein¹, Anna Oleynikova², Charlotte Werner², Manfred Tacker² & Silvia Apprich¹

¹⁾ FH Campus Wien, Fachbereich Verpackungs- und Ressourcenmanagement, Wien, Österreich

²⁾ Circular Analytics TK GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: Die europäischen Ambitionen fordern die Nutzung recyclingfähiger Kunststoffverpackungen und ambitionierte Recyclingquoten, wodurch die Nachfrage nach nachhaltigen Lösungen steigt und die Kosmetikindustrie bestehende Verpackungen überprüfen und optimieren muss, um die EU-Ziele zu erreichen. Das Modell der holistischen Nachhaltigkeitsbewertung von Verpackungen bietet eine Methode, die alle relevanten Nachhaltigkeitsaspekte einbezieht und länderspezifische Sammel- und Recyclingsysteme berücksichtigt. Über 200 Verpackungsproben aus den Kosmetiksegmenten Shampoo, Haargel-/wachs, Handcreme, Bodylotion, Gesichtscreme und Seren wurden hinsichtlich ausgewählter Parameter analysiert. Erste Erkenntnisse zeigen umfassendes Optimierungspotential hinsichtlich Materialeinsatz, Recyclingfähigkeit und Umweltauswirkungen von Verpackungen.

1 EINLEITUNG

Das Ziel der europäischen Bestrebungen ist es, die Verpackungsindustrie in einen Kreislauf einzubinden. Dies beinhaltet die Verpflichtung, zukünftig ausschließlich recyclingfähige Kunststoffverpackungen zu verwenden sowie ehrgeizige Recyclingquoten für alle Verpackungsmaterialien zu erreichen. Diese Anforderungen erhöhen die Nachfrage nach nachhaltigen Verpackungslösungen im Sinne der ganzheitlichen Nachhaltigkeit.

Die Kosmetikindustrie muss bei der Herstellung und Verpackung ihrer Produkte hohe Qualitäts-sicherungsstandards einhalten, wobei der Produktschutz eine zentrale Rolle spielt. Für eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung von Verpackungen sind zusätzlich die Kreislauffähigkeit und Umweltaspekte entscheidend. Diese drei Kriterien sind die Hauptsäulen der Nachhaltigkeit.

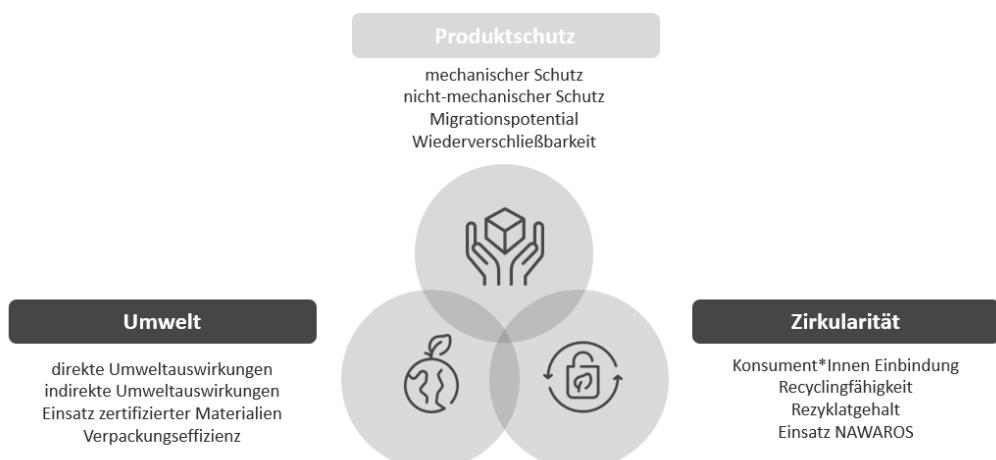


Abb. 1 Modell der holistischen Nachhaltigkeitsbewertung

Um die EU-Ziele zu erreichen, muss die Kosmetikindustrie ihre Verpackungen überprüfen und optimieren. Sie steht vor der Herausforderung, unterschiedliche Verpackungssysteme für verschiedene Produktkategorien zu managen, die vielfältige Anforderungen haben.

Mit dem „Benchmarking-Projekt zur Bemessung der Nachhaltigkeit von Verpackungen von Kosmetikprodukten in Deutschland, Österreich und der Schweiz“ setzen sich die FH Campus Wien und Circular Analytics TK GmbH zum Ziel, einen Vergleich der zahlreichen Verpackungssysteme der jeweiligen Produktkategorie im deutschsprachigen Raum anhand ökologischer Kriterien zu ermitteln.

Es wurden 215 Proben in den Kategorien Shampoo, Haarwachs und -gel, Handcreme, Bodylotion, Gesichtscreme, Serum und Augencreme analysiert, verglichen und bewertet.

Die teilnehmenden Unternehmen umfassen Produkthersteller, Verpackungshersteller, Drogerien und Supermärkte, darunter lokale Kleinunternehmen, Start-ups und Großkonzerne aus Deutschland, Österreich und der Schweiz.

2 METHODISCHE VORGEHENSWEISE

2.1 *Technische Recyclingfähigkeit*

Die Bewertungsmethode der technischen Recyclingfähigkeit basiert auf der aktuellen FH Circular Packaging Design Guideline (Stand 2022) und wurde mit der Software Packaging Cockpit durchgeführt.

Eine Verpackung muss bestimmte Kriterien aufweisen, um technisch recyclingfähig zu sein:

Für die Verpackung liegt im jeweiligen Land eine Sammelstruktur vor.

Das Verpackungssystem kann mit der im jeweiligen Land befindlichen Sortieranlagen vorhandenen Infrastruktur in definierte Materialströme sortiert werden.

Das sortierte Material kann in einem stofflichen Recyclingprozess zu Rezyklat verwertet werden.

Die daraus gewonnenen Sekundärstoffe haben ein Marktpotenzial, um als Ersatz materialidenter Neuware verwertet zu werden.

2.2 *Rezyklatgehalt und Anteil nachwachsender Rohstoffe*

Der Rezyklatgehalt gibt den Anteil an eingesetztem Sekundärmaterial pro Verpackung an. Durch die Verwendung von recycelten Materialien wird der Bedarf an neuen Rohstoffen reduziert und somit eine positive Ökobilanz gefördert. Der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen (NA-WARO) reduziert den Bedarf an nicht erneuerbaren Ressourcen. Der Anteil an Rezyklat und NA-WARO wird in Gewichtsprozent im Verhältnis zum Gesamtgewicht der Verpackung angegeben.

2.3 *Konsument*inneneinbindung*

Das Kriterium Konsument*inneneinbindung zeigt, inwieweit Endverbraucherinnen aktiv trennen müssen, um hochwertiges Recycling zu ermöglichen. Wenn eine Trennung erforderlich ist, sollte dies auf der Verpackung angegeben und durch mechanische Trennung, z.B. Perforationen, erleichtert werden. Laut Deutschem Mindeststandard ist eine separate Bewertung von Verpackungskomponenten nur erlaubt, wenn diese für den Gebrauch und Verbrauch des Produkts unbedingt erforderlich sind.

Die Einteilung erfolgt in den folgenden Kategorien:

1. Vor Entsorgung der Verpackung ist eine Trennleistung von Konsument*innen erforderlich, diese ist unzureichend gekennzeichnet
2. Vor Entsorgung der Verpackung ist eine Trennleistung von Konsument*innen erforderlich, diese ist ausreichend gekennzeichnet
3. Vor Entsorgung der Verpackung ist keine Trennleistung von Konsument*innen erforderlich.

- X Keine Trennleistung erforderlich, da das Design der Verpackung ein hochwertiges Recycling verhindert.

2.4 Direkte Umwelteffekte

Für die Bewertung des direkten Umweltwirkungspotenzials der Verpackungen wurde ein streamlined Life Cycle Assessment durchgeführt. Die Modellierung dieser basiert auf der ISO 14040 und 14044, sowie in Anlehnung an den Regeln des Product Environmental Footprints der Europäischen Kommission. Diese Methode stellt eine Abschätzung der Umweltwirkungspotenziale, eine sogenannte erste Hot-Spot-Analyse, dar und wird mit Hilfe weniger verfügbarer primärer Inputdaten, so z.B. Spezifikationen von Verpackungen, Verpackungsgewicht und Materialtypen, durchgeführt und auf Basis von Sekundärdatensätzen aus Emissionsdatenbanken und weiteren Annahmen modelliert. Es wurde nur die Wirkungskategorie „Klimawandel“ berücksichtigt.

2.5 Indirekte Umwelteffekte

Für die Bemessung der indirekten Umwelteffekte wurde der Aspekt der Restentleerbarkeit und somit die Quantifizierung der Produktrückstände herangezogen. Dafür wurden abhängig vom Verpackungssystem neue standardisierte Entleerungsmethoden entwickelt. Die Basis dafür bildet eine realistische Abbildung vom Verhalten eines umweltbewussten Konsumenten, sowie andererseits die bestmögliche Entleerung der Verpackung ohne Zerstörung eben dieser.

2.6 Verpackungseffizienz

Die Verpackungseffizienz gibt das Verhältnis von Verpackungsgewicht zu Füllgutgewicht an. Bei befüllten Proben wurde das reale Füllgutgewicht in die Berechnung einbezogen. Bei leeren Verpackungsmustern wurde anstelle des Füllgutgewichts die Füllgutmenge in die Formel einbezogen.

2.7 Zertifizierte Materialien

Ja / nein Bewertung, Bewertung des Einsatzes von zertifizierten Materialien (z.B. FSC, ISCC).

3 ERGEBISSE

Folgend werden exemplarisch Ergebnisse der Produktkategorie Handcreme vorgestellt.

3.1 Recyclingfähigkeit und direkte Umweltauswirkungen

Die Recyclingfähigkeit der Proben unterscheidet sich in den Ländern aufgrund unterschiedlicher Recyclinginfrastruktur und unterschiedlichen Standards. In Deutschland wird die Recyclingfähigkeit auf Basis des deutschen Mindeststandards berechnet, in Österreich werden hier Limits nach Recyclass angesetzt. Die Unterschiede sind hier besonders auffällig bei PE-Hauptkörpern mit Verschlüssen aus PP. Während hier keine Beeinträchtigung des PE-Recyclings durch PP-Teile beim deutschen Mindeststandard angenommen wird, liegen die Grenzen bei Recyclass bei 10 Gew%. Verpackungen, bei denen der Verschluss >10% des Gesamtgewichtes ausmacht, sind demnach in Österreich nicht recyclingfähig. Gute Werte wurden hier von Verpackungssystemen aus Glas und Aluminium erreicht.

Die Ergebnisse beim CO₂--Fußabdruck bei den Handcremes sind zwischen den Ländern vernachlässigbar. Sie ergeben sich zu großem Teil aus der Differenz an Transportdistanzen und unterschiedlichem Strommix.

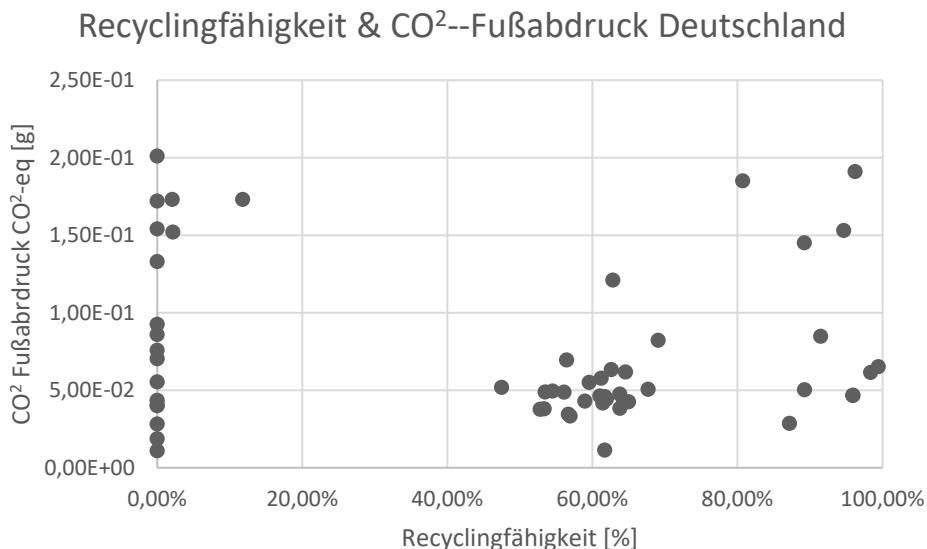


Abb. 2 Recyclingfähigkeit und CO₂--Fußabdruck für Handcremes in Deutschland

Durch die hohe Anzahl an Tuben kommt es zu einer Gruppierung bei 50-70% Recyclingfähigkeit. Tuben erreichen auch in dieser Produktkategorie die besten Werte beim CO2-Fußabdruck. Im selben Bereich befindet sich die Flasche. Bei Pumpspendern erreichen zwei Behälter aus Glas gute Werte von über 90% in der Recyclingfähigkeit. Die restlichen Spender aus HDPE oder PET, mit einer Ausnahme, sind nicht recyclingfähig und weisen im Schnitt die schlechteste Ökobilanz auf. Auch Airless Pumpspender schneiden in beiden Bewertungskategorien vergleichsweise schlecht ab. Nur ein Produkt in diesem Verpackungssystem kann einen guten/ausreichenden Wert in der Recyclingfähigkeit erreichen, wonach das jeweilige Produkt in der jetzigen Form auch nach der neuen PPWR weiterhin in der Form vertrieben werden dürfte. Tiegel erweisen sich im Hinblick auf die hier betrachteten Bewertungskategorien als beste Verpackungsvariante. Die erhöhten Werte im CO2-Fußabdruck entfallen auf Tiegel aus Glas und Aluminium, die geringen auf Tiegel aus PP.

3.2 Rezyklatgehalt, Einsatz NAWAROs und zertifizierte Materialien

Bei den Handcremes konnten bei 38 von 55 Proben keine Rezyklate nachgewiesen werden. Die höchsten Rezyklatanteile wiesen rPET-Pumpspender (62,00% und 64,00%) auf, sowie ein Pumpspender aus HDPE (63,00%). Von 37 beprobenen Tuben enthielten 11 Proben Rezyklate. Sieben Proben in der Kategorie Handcreme wiesen NAWAROs auf. Dabei handelt es sich bei vier Proben um Umverpackungen. In zwei Fällen davon waren Aluminiumtuben in den Umverpackungen enthalten (50% & 54%). Ein Pumpspender kam in einer Umverpackung und mit zusätzlichem ausführlichem Beipackzettel (30%). Bei einer Probe bezieht sich die Angabe auf den verwendeten Deckel (30%). Dieser ist zu einem großen Teil aus Holz gefertigt. Lediglich bei einem Produkt konnte ein FSC-Siegel nachgewiesen werden.

3.3 Konsument*inneneinbindung

44 der 55 bearbeiteten Proben erfordern keine Trennleistung, um eine erhöhte Recyclingfähigkeit zu erreichen. Bei einer Probe sind Trennleistungen erforderlich, diese ist ausreichend auf dem

Etikett vermerkt. Bei drei Proben wäre auch durch eine Trennung einzelner Komponenten kein ausreichendes Recycling möglich. Hingegen wäre bei sieben Proben durch eine Trennung einzelner Komponenten ein besseres Recycling möglich, dies ist aber nicht ausreichend gekennzeichnet.

3.4 Verpackungseffizienz

Aufgrund der hohen Anzahl an Tuben ist die Streuung bei der Verpackungseffizienz bei Handcremes gering. Die höchsten Werte werden von Tiegeln und Pumpspendern (60,23% und 57,08% bei 50ml Produktinhalt) aus Glas erreicht und den niedrigsten Wert erreicht ein Pumpspender aus PET mit einer Füllmenge von 500ml (8,91%). Verglichen dazu weist ein Pumpspender aus Glas mit derselben Füllmenge eine Verpackungseffizienz von 56,46% auf. Eine Karton als Umverpackung für eine PE-Verbundtube mit einer Füllmenge von 75ml kann das Ergebnis um ungefähr 7% erhöhen.

3.5 Indirekte Umwelteffekte

Bei Handcremes erreichte eine Flasche den dritthöchsten Wert an gemessenen Produktrückständen mit 24,51%. Aufgrund des geringen Marktanteils an Handcremes in Flaschen konnten hier keine Vergleichswerte herangezogen werden. Des Weiteren erweisen sich Pumpspender im Hinblick auf die Restentleerbarkeit als hinderlich für die Produktentnahme. Der höchste Wert liegt bei diesem Verpackungssystem bei 26,65% und der geringste bei 12,56%. Bei Tuben liegen die Werte im Mittel bei 9,82% mit einem Ausreißer bei 20,17%. Hier wies das Verpackungssystem einen besonders steifen Schulterbereich auf, der eine rückstandsarme Entleerung erschwerte. Die geringsten Werte erreichten Tiegel und Airless Pumpspender mit Werten von unter 1%.

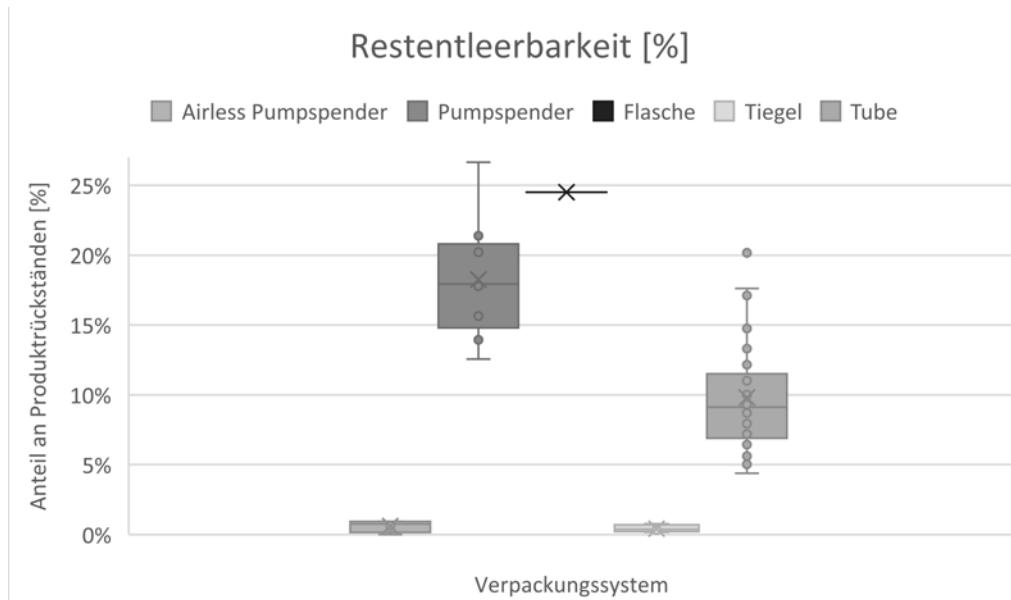


Abb. 3 Menge der Produktrückstände in unterschiedlichen Verpackungssystemen nach standardisierter Methodik

4 SCHLUSSFOLGERUNG BZW. ZUSAMMENFASSUNG

Die Bewertung der Nachhaltigkeit von Verpackungen ist komplex, da sie eine ganze Anzahl an Kriterien berücksichtigen muss. In dieser Studie wurden die am deutschsprachigen Markt befindlichen Kosmetikverpackungen für die Produktkategorien Shampoos, Haargel & Haarwachs, Handcreme, Bodylotion, Gesichtscreme, Augencreme und Serum analysiert und wichtige Nachhaltigkeitskennzahlen erhoben.

Dabei konnten folgende wichtige Erkenntnisse gewonnen werden:

1. Die Recyclingfähigkeit vieler Verpackungen am Markt liegt für Deutschland und Österreich bei weniger als 70%, das ist die Mindestvoraussetzung für recyclingfähige Verpackungen gemäß dem derzeitigen Entwurf der PPWR. In der Schweiz ist die Recyclingfähigkeit noch geringer, dies liegt aber an der derzeit noch geringen Sammlung und Rezyklierung von Kunststoffverpackungen.
2. Ein wichtiger Faktor, der die Rezyklierbarkeit beeinflusst, ist das Verpackungsdesign, besonders die Wahl von vollflächig gesleevten Verpackungslösungen ohne Nachweis der NIR-Detektierbarkeit.
3. Hinsichtlich Verpackungseffizienz bestehen große Unterschiede zwischen den eingesetzten Verpackungen, was bedeutet, dass Verpackungen am Markt sind, die deutlich schwerer sind als vergleichbare Verpackungslösungen und damit unnötig hohen Ressourceneinsatz aufweisen.
4. Der CO₂--Fußabdruck der eingesetzten Verpackungen zeigt, dass Unterschiede bis zum Fünffachen in manchen Produktkategorien vorkommen – durch diese Verpackungen werden unnötig hohe negative Umweltbelastungen verursacht.
5. Die Restentleerbarkeit vieler Verpackungen ist oft unzureichend, in manchen Verpackungen verbleiben mehr als 20% des Füllgutes, die von den Konsumenten nicht entleert werden können. Da das Füllgut zumeist weit höheren CO₂--Fußabdruck als die Verpackung aufweist, ist die Restentleerbarkeit so gut wie möglich sicherzustellen.

Aus diesen Erkenntnissen leiten sich umfassende Optionen zur Optimierung der Nachhaltigkeit von Verpackungen ab. Ziel der Optimierungen sollte es sein, den Ressourcenverbrauch und die negativen Umweltauswirkungen der Verpackung zu minimieren und gleichzeitig die Restentleerbarkeit zu verbessern. Dies bedingt eine mehrdimensionale Optimierung – und keinesfalls die Ausrichtung auf nur ein Kriterium und sei es noch so wichtig wie die Recyclingfähigkeit.

Besonders bei der Neueinführung von Verpackungen sollte darauf geachtet werden, möglichst nachhaltige Lösungen auszuwählen.

Chancen und Risiken bei der Verwertung von Tunnelausbruchmaterial

Manfred Nahold¹

¹⁾ GUT GRUPPE UMWELT+TECHNIK GMBH, Linz, Österreich

KURZFASSUNG: In den letzten Jahren sind in Österreich die umfangreichsten Tunnelbauvorhaben in Arbeit. Tunnelausbruchmaterial (TUA) ist Aushubmaterial zuzuordnen und somit als Abfall zu betrachten. Auch deshalb macht Aushubmaterial mit rund 60% den größten Anteil aller Abfälle je Jahr in Österreichs aus. Das Ziel, Abfälle in den nächsten Jahren drastisch zu verringern, kann deshalb nur über die Steigerung der Verwertung von Bodenaushub und damit auch von TUA erreicht werden. Bei ungebundenen Verwertungen werden häufig große Mengen an TUA an einem Ort für eine Geländegestaltung eingebaut. Aus diesem Grund muss geprüft und sichergestellt werden, dass von dem TUA keine nachteiligen Wirkungen auf Schutzgüter (vorrangig Grundwasser) ausgehen.

Beton wird im Tunnelbau vorrangig als mineralisches Stützmittel eingesetzt und ist folglich auch in TUA in meist untergeordneten Mengenanteilen enthalten.

Anhand von Analysendaten mehrerer Tunnelbauvorhaben werden stoffliche Risiken vorgestellt und mögliche nachteilige Auswirkungen auf eine Verwertung diskutiert. Die Beispiele behandeln die Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Chrom und Aluminium sowie Nitrat, Nitrit und Ammonium.

1 EINLEITUNG

Die langjährig umfangreichsten Tunnelbauvorhaben werden von den ÖBB und der ASFINAG betrieben sowie von den Ländern und von Kraftwerksbetreibern. ist Aushubmaterial zuzuordnen, welches nach den Angaben im BAWP 2019 und 2023 (Abb. 1) mit knapp 60 % den größten Anteil aller Abfälle Österreichs ausmacht. Eine Verwertung von TUA eröffnet uns Chancen, Rohstoffe in großem Ausmaß einzusparen und die Verwertungsquote von Abfällen zu steigern. Zu letztem sind wir nach §1(1) 3 des Abfallwirtschaftsgesetzes (AWG) sogar gesetzlich verpflichtet.



Abb. 1: Abfallaufkommen (links) und Behandlungsanteile aus BAWP 2023

Durch den rechtlichen Rahmen wird eine Verwertung insofern erschwert, als TUA auf Grund der Entledigungsabsicht am Anfallsort als Abfall definiert wird, welcher nicht länger als 1 Jahr gelagert werden darf. Bei Überschreitung dieser Frist ist eine Gebühr von € 9,20/t (ab 1.1.2025 € 10,60/t) abzuführen (österreichisches Altlastensanierungsgesetz, ALSAG 1989). Diese Befristung der Lagerung kann auf bis zu 3 Jahre verlängert werden, falls TUA (qualitätsgesichert) zu einem Recyclinggestein verarbeitet wurde.

Handlungsbedarf besteht insofern, als große Mengen an TUA mit verwertbarer Qualität oftmals nicht in kurzer Zeit vom Markt in wirtschaftlich vertretbarer Entfernung vom Anfallsort aufgenommen werden kann. Da ein Abfallende erst mit dem Zeitpunkt des rechtskonformen Einbaus an einem Verwertungsstandort entsteht, wird das Risiko einer erheblichen Gebührenzahlung dem Übernehmer von TUA übertragen. Aus diesem Grund werden häufig zwei Alternativen gewählt: 1. Die Deponierung von TUA oder 2. Die Verbringung in „Geländemodellierungen“, welche als

Verwertung projektiert werden, weil Deponien von der Bevölkerung emotional schlecht angenommen werden. Dadurch wird eine mögliche ALSAG-Beitragspflicht vermieden, aber eine wünschenswerte höherwertige Verwertung verhindert. Vorteile von Geländemodellierungen sind deren planbare Berücksichtigung im Umweltverträglichkeits-Verfahren und die Minimierung transport-bedingter Emissionen. Da für Geländemodellierungen mit TUA große Mengen an einem Ort ungebunden eingebaut werden, ist sicherzustellen, dass aus dem Material keine Schadstoffe freigesetzt werden und ins Grundwasser (oder andere Schutzgüter) gelangen.

Den mengenmäßig größten Anteil bodenfremder mineralischer Anteile in TUA bildet meist Beton (Spritzbeton mit/ohne Armierungsfasern aus Stahl oder Kunststoff), in untergeordnetem Ausmaß auch Injektionsmörtel. Andere anthropogen eingebrachte nicht mineralische Verunreinigungen sind in der Menge untergeordnet, aber wasserlöslich und in der Wirkung nachteilig, wie Sprengmittelrückstände oder chemische Bauhilfsstoffe. Zu erwähnen sind noch Mineralöle (z.B. Hydraulik- und Schalöle, Diesalkraftstoff), die bei Gebrechen TUA verunreinigen können. Solche Mineralöle sind in der Regel sehr gering wasserlöslich. Mit wenigen Ausnahmen sind Fest- und Lockergesteine arm an geogenen organischen Stoffen, welche als TOC gemessen werden. Bei TOC-Werten unter 5.000 mg/kg muss für die Qualität „Bodenaushub“ der niedrigste der drei gestaffelten Grenzwerte für den KW-Index (50 / 100 / 200 mg/kg) angewendet werden. Entsprechend eng ist der Handlungsspielraum im Fall gering erhöhter KW-Gehalte.

2 AUSWIRKUNGEN VON (SPRITZ-)BETON AUF DIE EIGENSCHAFT VON TUA

Das erste Beispiel in Abb. 2 links zeigt typische pH-Werte und elektrische Leitfähigkeiten (ELF) von 64 Proben eines zyklischen Vortriebs in kristallinem Festgestein. pH und ELF zeigen die charakteristische exponentielle Abhängigkeit. Besonders auffällig ist, dass in keiner Probe pH 12 erreicht oder überschritten wurde und dass in 1/3 der Proben der Grenzwert der ELF von 250 mS/m deutlich überschritten wurde. In 13 Proben wurden sogar ELF zwischen 400 und 1600 mS/m gemessen. Der Spritzbeton auf dem Gestein hatte bis zu einer Woche Zeit zum Aushärten, weswegen hier wohl keine pH-Werte über 12 gemessen wurden. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass TUA mit Spritzbeton (in diesem Fall klar weniger als 5 %) zu rund 30 % die Grenzwerte des BAWP für die Leitfähigkeit überschreitet.

Im Gegensatz zum TUA aus dem zyklischen Vortrieb zeigen die Daten von TUA aus einem kontinuierlichen Vortrieb (ÖBB Koralmstunnel, Baulos KAT2, Abb. 2 rechts) pH-Werte zwischen 8,5 und 9,5 und ELF von weniger als 15 mS/m, was am fehlenden Einsatz von Spritzbeton liegt.

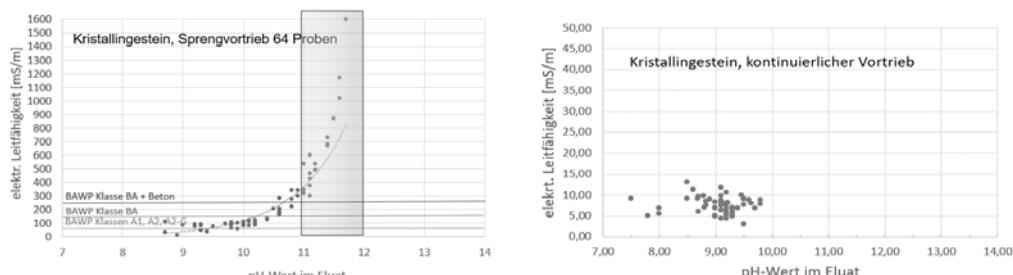


Abb. 2: Leitfähigkeiten (ELF) der Eluate gegen pH-Werte, Grenzwerte der ELF nach BAWP und blau der Bereich der zulässigen Erhöhung des pH von 11 auf 12

Die bekannte Funktion pH / ELF zeigt auch das nächste Beispiel (Abb. 3 links unten). Es handelt sich aber um einen Baggervortrieb mit Spritzbetonsicherung der Ortsbrust. Im Gegensatz zum Beispiel in Abb. 2 wurden hier in wenigen Proben auch pH-Werte über 12 gemessen. Dennoch lagen die Leitfähigkeiten unterhalb des Grenzwerts von 250 mS/m für Bodenaushub mit Beton-anteilen.

2.1 Chromat in Eluaten aus TUA

Bei abfallchemischen Analysen werden Feststoffgehalte (Gesamtgehalte) und Eluatgehalte untersucht. Zur Bestimmung des Feststoffgehalts wird das gemahlene Gestein in Königswasser gekocht und damit weitestgehend aufgelöst. Gemessen wird in diesem Königswasseraufschluß der Gesamtgehalt eines Metalls (oder anderer Elemente), unabhängig von dessen Bildungsform. Zur Bestimmung des Eluatgehalts nach EN 12457-4 hingegen wird die Körnung <10 mm einer Gesteinsprobe 24 Stunden lang in destilliertem Wasser geschüttelt. Dann wird das Eluat filtriert und die darin gelösten Metalle (oder anderen Elemente und auch Ionen) sowie der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit gemessen. Somit werden in Eluaten die wasserlöslichen (und leichter mobilisierbaren) Anteile gemessen.

Die aus Abb. 2 links bekannte Funktion pH / ELF zeigt auch das nächste Beispiel (Abb. 3 links). Es handelt sich hier aber um einen Baggervortrieb in Lockergestein mit Spritzbetonsicherung der Ortsbrust. In diesem Datensatz von 51 Proben dieses Vortriebs in lehmigem Kies wurden in Eluaten aus TUA-Proben Cr-Gehalte bis zu 0,99 mg/kg gemessen. Der Mittelwert von knapp unter 0,5 mg/kg entspricht dem Grenzwert der Klasse BA des BAWP. Das Maximum hält den Grenzwert der Bodenaushubdeponie nach Tab. 2 DVO von 1 mg/kg ein.

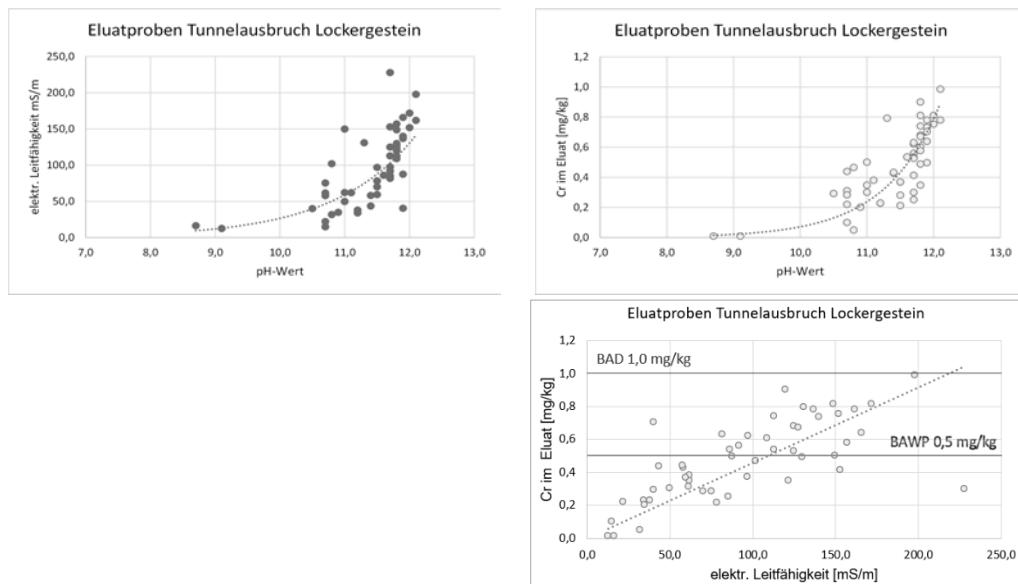


Abb. 3: Die Löslichkeit von Cr^{VI} ist nicht vom pH-Wert bestimmt, sondern abhängig vom Anteil an nicht ausgehärtetem Spritzbeton im TUA (Grafik Cr/ELF rechts)

Die Cr(VI)-Gehalte liegen im Mittel bei 0,47 mg/kg und damit unter dem Grenzwert der Klasse BA nach BAWP. Die Verläufe der oberen beiden Grafiken zeigen mit steigenden pH-Werten auch steigende Leitfähigkeiten und steigende Chromatkonzentrationen. Dies weist zusammen mit dem Cr³⁺-armen Kalkgestein auf die Herkunft des Cr(VI) aus Zementen hin (Spritzbeton und Injektionsmörtel).

In der Literatur finden sich Hinweise auf die Bildung von Cr(VI) durch Oxidation von geogenem Cr³⁺ beim Sprengvorgang oder eine Reaktion von Cr³⁺ mit Nitrat aus Sprengmitteln (GEO Partner AG 2018). Diese Argumente treffen hier nicht zu, da die erforderliche hohe Energie nicht verfügbar ist (kein Sprengmittel eingesetzt) noch andere Oxidationsmittel eingesetzt wurden.

Für die Untersuchungen wurden relativ große Probemengen des TUA gezogen. Demnach muss die Konzentration an Cr(VI) im eingesetzten Spritzbeton relativ hoch sein, weil das TUA nicht mehr als 5 % Spritzbeton enthält. In diesem Fall wurde Cr(VI) des Zements bei der Hydratisierung nicht oder zu wenig zu Cr³⁺ reduziert. Die Reduktion von Chromat ist in der EU seit 2005 durch die Richtlinie 2003/53/EG verpflichtend als auf weniger als 0,0002 % (2 mg/kg) bezogen auf die Trockenmasse des Zements begrenzt.

Zur Reduktion des Chromats wird dem Zement ein Produkt mit einem Reduktionsmittel wie Eisen-II-sulfat zugesetzt. Die Prüfung eines Mörtels auf den Gehalt an wasserlöslichem Chrom(VI) ist geregelt in der ÖNORM EN 196-10 (2016). Davon ausgehend, dass Zement mit der sog. „Chromatbremse“ geliefert wurde, könnte die Wirkung des Reduktionsmittels durch Alterung des Zements oder durch andere Zuschlagstoffe abgeschwächt worden sein.

3 STICKSTOFFVERBINDUNGEN AUS SPRENGMITTELN

Häufig verwendete Sprengmitten enthalten Ammoniumnitrat, Kohlenwasserstoffe und gegebenenfalls Aluminiumpulver. Beim Abarbeiten entsteht zusätzlich Nitrit-N in den Schwaden. Eine Übersicht dieser drei N-Verbindungen in 64 Proben eines zyklischen Vortriebs in kristallinem Festgestein (Gneis) zeigen die beiden folgenden Abbildungen. Bei Nitrat-N ist der Grenzwert nach BAWP für die Verwertung immer eingehalten. Bei Ammonium-N ist in nur 5 % der Proben der Grenzwert der Klasse BA überschritten, in 11 der Proben ist der Grenzwert der Klasse A2-G überschritten. Bei Nitrit-N ist der Grenzwert der Klassen A2 und BA in einer einzigen Probe überschritten, der Grenzwert der Klasse A2-G ist allerdings in 14 der Proben überschritten.

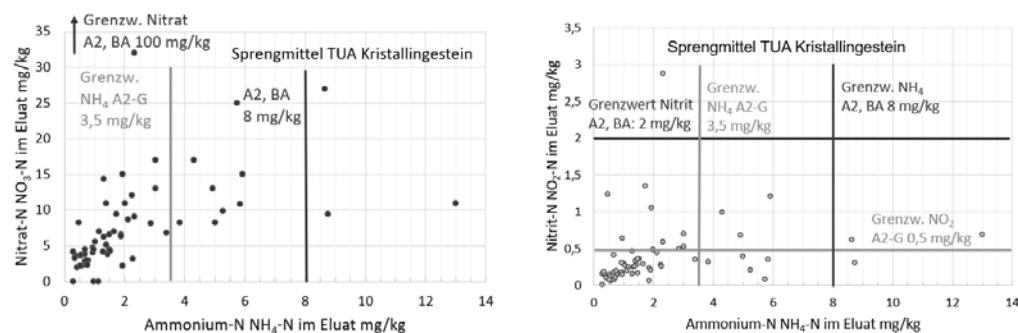


Abb. 4: Nitrat-N (links) bzw. Nitrit-N (rechts) gegen Ammonium-N in TUA-Eluaten

Die Daten zeigen, dass durch gut dosierten Einsatz patronierter Emulsionssprengstoffe die Belastung des TUA sehr gut in den genannten Grenzen der Verwertbarkeit gehalten werden konnte (NH₄-N<8 mg/kg und NO₂-N<2 mg/kg). Zwar erlauben sowohl die Deponieverordnung als auch der BAWP bei den drei N-Parametern Erhöhungen der Grenzwerte, jedoch sind hierzu das Emissionspotenzial, die Menge an TUA am Einsatzort und die Schutzwerte zu berücksichtigen. Dies spricht bei ungebundenen Verwendungen gegen eine Grenzwerterhöhung, weil Nitrat, Nitrit und besonders Ammonium gut wasserlöslich und sehr mobil sind.

4 ALUMINIUM IN TUNNELAUSBRUCHMATERIAL

Kristallingesteine und tonige Lockergesteine bestehen zum überwiegenden Teil aus Alumosilikaten und Quarz. Wenn die Minerale verwittern, werden häufig Silizium, Eisen und Aluminium gelöst und fallen wieder als Oxide und Hydroxide aus. Wird Kristallingestein frisch gebrochen, so entsteht im Eluat mit destilliertem Wasser durch Hydrolyse ein Überschuss an OH⁻-Ionen, das Eluat ist leicht basisch (pH 8,5-9,5). Bei einem kontinuierlichen Vortrieb ohne Spritzbetonsicherung der Ortsbrust zeigen die Eluatuntersuchungen die in Abb. 5 oben dargestellten Messwerte mit

Leitfähigkeiten von weniger als 15 mS/m als ein Zeichen geringer gelöster mineralischer Wasserinhaltsstoffe. In diesen Eluaten ist auch in geringem Ausmaß Aluminium bis zu 15 mg/kg gelöst. Bei einem zyklischen Vortrieb mit Spritzbetonsicherung (Abb. 5 unten) sind teils hohe Leitfähigkeiten und hohe pH-Werte in den Eluaten zu messen. In diesen Eluaten werden höhere Konzentrationen an Al (15-35 mg/kg) gemessen, als in TUA-Proben mit wenig Spritzbeton.

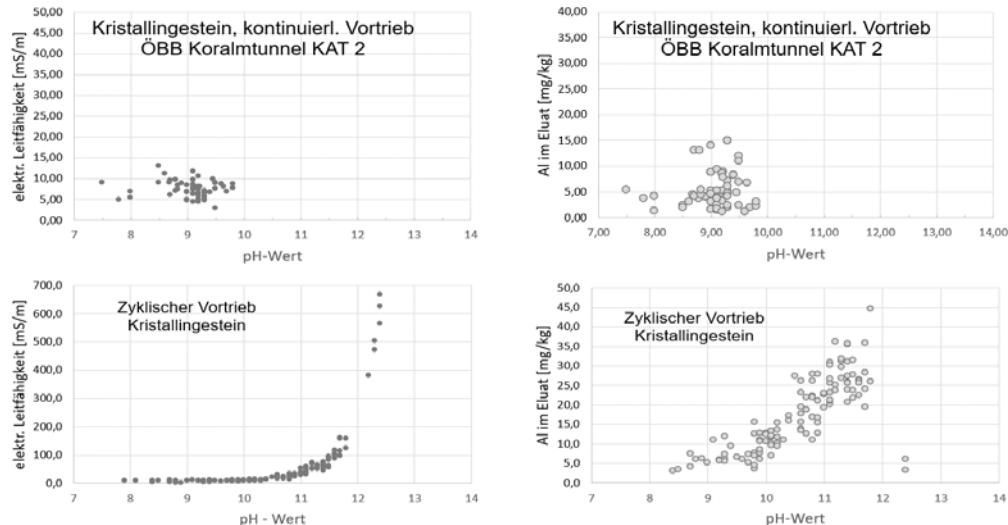


Abb. 5: pH-Werte und Leitfähigkeiten (links) bei unterschiedlichen Vortrieben und Al im Eluat (rechts) bei unterschiedlichen Vortrieben

Aluminium ist ein Metall mit amphoteren Eigenschaften, d.h. die Löslichkeit steigt sowohl in saurer als auch in basischer Lösung. Die Bildung des Al(OH)_4^- -Komplexes lässt die Löslichkeit bei alkalischen pH-Werten erneut zunehmen. Beim pH 6,5 ist die Aluminiumlöslichkeit am geringsten und Al fällt als feste mineralische Phase (Gibbsit) aus (Abb. 6).

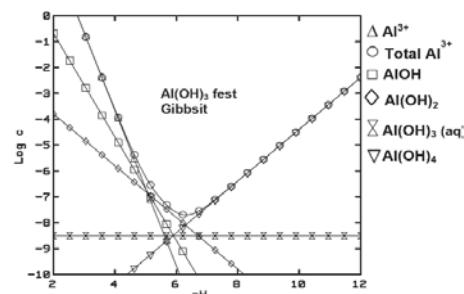


Abb. 6: Löslichkeit von Gibbsit, des freien Aluminiums und der Aluminiumhydroxidkomplexe in Abhängigkeit vom pH-Wert, erstellt mit MINEQL+ 5.0

Die Daten aus Abb. 5 stammen aus Eluaten von (auf <10 mm gebrochenem) TUA mit destilliertem Wasser. Im Unterschied dazu weist ein Eluat mit betonhaltigem TUA in einem Grundwasser oder Wasser aus einem Fließgewässer mit 400-500 mg/l Mineralisierung nur einen pH um 8-9 auf, der nach 10-20 Stunden wieder geringfügig sinkt. Auch die Leitfähigkeit sinkt geringfügig, was auf Ausfällungen hinweist. Die Konzentrationen an Aluminium sind in solchen Eluaten geringer und Al fällt aus solchen Lösungen wieder aus.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

In Eluaten aus Tunnelausbruchmaterial (TUA) von zyklischen Vortrieben sind auf Grund von Spritzbeton-Anteilen der Ortsbrust (ev. mit zusätzlichem Rückprall auf der Sohle) hohe pH-Werte bis 12,5 erwartbar und hohe elektrische Leitfähigkeiten (ELF) bis 300 mS/m (wenige darüber).

Der Stand der Technik zur Verwertung von Bodenaushub und TUA ist im Bundesabfallwirtschaftsplan 2023 dokumentiert. Demnach sind ungebundene Verwertungen bis zu einem pH-Wert von 11 (teils bis 12) und bis zu einer ELF von 250 mS/m begrenzt. Diese Grenzen können bei zyklischen Vortrieben mit Einsatz von Spritzbeton nicht zuverlässig eingehalten werden.

TUA fällt in großen Mengen an und eine Verwertung lässt sich nicht immer entsprechend der gleichen definierten Vorgehensweise regeln. Deshalb schlagen wir vor, den Rahmen einer Verwertung (in Anlehnung an den BAWP) durch ein standortspezifisches Verwertungskonzept für das jeweilige TUA und dessen allfällige grenzwertrelevanten Eigenschaften zu erarbeiten. Dieser Rahmen sollte den Rahmen für den pH-Wert bis 12,5 erstrecken und auch eine höhere Leitfähigkeit zulassen, falls diese Eigenschaften nicht Mobilisierungen anderer Stoffe in vielleicht umweltschädlichen Konzentrationen zur Folge haben.

In einigen Fällen sind bei zyklischen Vortrieben Chromatgehalte bis zu 1 mg/kg in TUA-Eluaten zu beobachten. Hier bedarf es Anstrengungen zum Einsatz chromatärmer Zemente bzw. von Reduktionsmittel, sofern dies nicht den nötigen Eigenschaften des Spritzbetons entgegenwirkt (siehe auch Kronos ecochem, 2011; 2019).

Aluminium ist nach Deponieverordnung (DVO) und nach BAWP nicht begrenzt, jedoch hinsichtlich der Auswirkungen bei der Ablagerung zu beurteilen. Deshalb besteht Forschungsbedarf nach Ursachen und nach Mechanismen der Mobilisierung. Weiters sollen Ausfällungsprozesse unter natürlichen Bedingungen geprüft werden. TUA mit oder ohne geringe Anteile an Spritzbeton wird bei ungebundener Verwertung CO₂ aus dem Niederschlagswasser aufnehmen (Karbonatisierung) und Aluminium wird als feste Phase (Gibbsit) ausfallen.

Handlungsbedarf besteht neben der Minimierung abfallchemisch relevanter Verunreinigungen auch aus abfallrechtlicher Sicht: Die zulässige Lagerzeit von Abfall (1 Jahr) bzw. von Recyclingmaterial (3 Jahre) muss verlängert werden. Falls der Auftraggeber nicht vorab Lösungen für die Entsorgung oder Verwertung vorsieht, kann der Markt große Mengen an TUA kaum aufnehmen, besonders wenn das TUA nur in gebundener Form verwertet werden darf (falls es mehr als 5% Betonanteile enthält oder pH>11 bzw. >12 oder ELF>250 mS/m). Bei den Überlegungen ist vorab zu berücksichtigen, dass die UVP-Genehmigung kaum Änderungen großer Massenströme zulässt und dass Transporte umweltschonend kurz und per Bahn ermöglicht werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- GEO Partner AG (2018): CD Ost: Erfahrungen zur Verwertung von Tunnelausbruchmaterial.- Umweltrelevante Erfahrungen beim Tunnelbau mit Sprengvortrieb mit Massnahmen zur Optimierung einer umweltgerechten Entsorgung und Verwertung von Tunnelausbruchmaterial Projektbericht vom 8. März 2018 im Auftrag der Cercle Déchets Ost c/o AWEL, Abt. Abfallwirtschaft, Betriebe, Baudirektion, Kanton Zürich.
- Kronos ecochem (2011): Chromatreduktion im Zement mit Eisen-II-sulfaten.- Produktinformationsblatt der Kronos International Inc., Leverkusen, Deutschland, Eigenverlag.
- Kronos ecochem (2019): Reduktion von Chrom-VI in Reststoffen wie Aschen, Schlacken und Stäuben,- Technische Information 3.11 der der Kronos International Inc., Leverkusen, Deutschland, Eigenverlag.
- ÖNORM EN 196-10 (2016-10-15): Prüfverfahren für Zement. Teil 10: Bestimmung des Gehaltes an wasserlöslichem Chrom(VI) in Zement.- Austrian Standards, Wien, Österreich.
- ÖNORM EN 12457-4 (2003): Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung - Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen - Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialen mit einer Korngröße unter 10 mm.
- Richtlinie 2003/53/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 17.07.2003 zur 26. Änderung der Richtlinie 76/769/EWG des Rates über Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen (Nonylphenol, Nonylphenolethoxylat und Zement).
- MINEQL+ 5.0: Advanced Tools for Aqueous Chemical Equilibrium.- Environmental Research Software.

Unkonventionelle Lagerstätten: Neue Quelle für Gewinnung von kritischen Metallen

Olga Ulanova

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

KURZFASSUNG: Der Artikel stellt unkonventionelle Lagerstätten als neue Quelle für Gewinnung kritischer Metalle in Zentralasien und Sibirien vor. Im Artikel ist gezeigt, dass unterirdische Solen zum Hydromineralrohstoffes gehören und sind einzigartige unkonventionelle Lagerstätten von kritischen Metallen des Zentralasiens und Sibiriens. Die Solen in Sibirien sind aufgrund des hohen Gehalts an seltenen Erdalkalielementen (u.a. Lithium, Rubidium, Zäsim, Strontium, Brom, Magnesium) besonders wertvoll. Die absolute Konzentration dieser Elemente ist dutzendmal höher als die untere Grenze konventioneller Lagerstätten. Auf der Grundlage der theoretischen und experimentellen Untersuchungen wurden Bedingungen der selektiven Extraktion von Sr, Li und Rb aus hochkonzentrierten natürlichen Solen durch Ionenaustauschsorption festgestellt. Außerdem wurde eine Reihe von technologischen Schemen für die Extraktion des Strontium, Lithium und Rubidium aus Tagebaurestseen und Solen aus eisenhaltigen und diamantenhaltigen Vorkommen in Sibirien entwickelt.

1 EINLEITUNG

Die nachhaltige Versorgung mit «kritischen» Metallen steht nach wie vor im Zentrum der Strategien großer Volkswirtschaften weltweit. Die Sicherung der Rohstoffversorgung ist für die EU-Länder als führenden Innovations- und Technologiestandort unabdingbare Voraussetzung. Europäisches Gesetz zu kritischen Rohstoffen (2023) legt die strategischen Ziele fest:

- Verbesserung und Diversifizierung der Versorgung der EU mit kritischen Rohstoffen
- Förderung einer nachhaltigen und kreislauforientierten Rohstoffwirtschaft, einschließlich des Recyclings
- Unterstützung von Forschung und Innovation in den Bereichen Ressourceneffizienz und Entwicklung von Ersatzstoffen

Als kritische Rohstoffe bezeichnet man 34 Rohstoffe, von denen 17 als strategische Metalle betrachtet werden, die wegen ihrer elektronischen, magnetischen, optischen und katalytischen Eigenschaften bei der Herstellung von Produkten der Spitzentechnologie und bei der Entwicklung von umweltfreundlichen Technologien eingesetzt werden.

Ein perspektiver Ansatz der rohstoffpolitischen Steuerung mit kritischen Metallen ist die stärkere Vernetzung der Akteure des Rohstoffes-, und Verarbeitungssektors. Auf internationaler Ebene durch das Instrument der Rohstoffpartnerschaften könnten die politischen Rahmenbedingungen für eine bessere Vernetzung der Unternehmen des Rohstoffsektors mit Regierungen, Behörden, Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen rohstoffreicher Länder geschaffen werden. [1].

1.1 Lagerstätten von kritischen Metallen

Nach Angaben der Weltbank verfügt Kasachstan über mehr als fünftausend unentdeckte Vorkommen im Wert von über 50 Milliarden Euro. In dieser Richtung bestehen große Perspektiven für die technologische Kooperation nicht nur für Rohstoffabbau, sondern auch für die Verarbeitung von kritischen Metallen. Nach Angaben des Ministeriums für Industrie und Infrastrukturrentwicklung der Republik Kasachstan gibt es insgesamt mehr als 35 erkundete Vorkommen von Seltenerdmetallerzen, darunter acht mit Restreserven: Belogorskoye, Verkhne-Baymurzinskoye, Bakenny, Yubileynoye, Kvartsevoye, Akhmetkino, Kalai-Topkan

(Ostkasachstan), Karaobinskoye (Greisen) in Zentralkasachstan, darüber hinaus befinden sich 70 % der Seltenerdmetallreserven in der Region Mangistaguy. Der Abbau und die Verarbeitung von Erzen der seltenen Erdmetalle wird von UK «TMK JSC», «Kazakhmys» LLP, «Kazzinc» LLP und JSC NGK «Tau-Ken Samruk» usw durchgeführt. [2].

Russland verfügt über eine der weltweit größten Rohstoffquellen für Seltenerdmetalle (REM). Nach Angaben 01.01.2023 [3] beliefen sich die Bilanzreserven an Seltenerdmetallen in 18 Primärlagerstätten auf 28,7 Millionen Tonnen Σ TR2O3, womit das Land nach China den zweiten Platz weltweit einnimmt. Die außerbilanziellen Reserven im gesamten Land belaufen sich auf 11,6 Millionen Tonnen Σ TR2O3. Bei allen berücksichtigten Lagerstätten handelt es sich um komplexe Vorkommen, in denen überwiegend Seltenerdmetalle als Begleitbestandteile vorkommen; nur bei Lovozersky und Katuginsky Vorkommen zählen sie zu den Hauptbestandteilen. Darüber hinaus werden 2 unkonventionelle Lagerstätten (Bergeteiche der abgelagerten Rückstände) mit Gesamtreserven von 12,9 Tausend Tonnen Σ TR2O3 berücksichtigt.

Die Rohstoffbasis der Seltenerdmetalle in Russland zeichnet sich durch eine hohe geografische Konzentration aus: 46,1 % der Reserven sind auf neun Standorte in der Region Murmansk konzentriert. Davon befinden sich 25 % in der Lovozersky-Lagerstätte mit komplexen Loparit-Erzen – dem einzigen Objekt im Land, das unter Verwendung von Seltenerdmetallen erschlossen wurde. Vorkommen in Sibirien und im Fernen Osten enthalten 50,2 % der Seltenerdmetallreserven. [3]

1.2 Unkonventionelle Lagerstätten von kritischen Metallen

Von großem Interesse in Russland und Zentralasien sind dabei nicht nur die Lagerstätten von Primärressourcen, sondern auch unkonventionelle Lagerstätten von kritischen Metallen.

Zu den unkonventionellen Lagerstätten kritischer Metalle gehören:

- Bergbauliche Aufbereitungsrückstände und Produktionsrückstände, Abraumhalde
- Bergeteichen abgelagerte Rückstände (Tailings) aus der Erzaufbereitung; Schlammtische, Absetzbecken zur Klärung von Abwässern (Trüben) aus der Aufbereitung mineralischer Rohstoffe
- Schlackenhalden von Hüttenwerken und Aschehalden von Kohlekraftwerken
- Öl- und Gassole, mitgefördert beim Öl, und Gasgewinnung
- Tagebaurestsee, Grubenwasser (Schachtwasser)
- Hydromineralressourcen, einschl. Thermalwässer, hochkonzentrierte natürliche Grundwassersole
- Wässrige Lösungen der Salzseen

1.3 Unkonventionelle Lagerstätten in Zentralasien

Der industrielle Wert von unkonventionellen Lagerstätten aus Zentralasien beruht auf dem hohen Gehalt an seltenen Elementen (Lithium, Strontium, Yttrium, Niob, Molybdän, Thorium, Zirkonium, Titan, Gallium, Antimon, Wismut, Indien, Baryt, Kobalt usw.). Die absolute Konzentration dieser Metalle ist dutzendmal höher als die untere Grenze konventioneller Lagerstätten.

Zum Beispiel, Rotschlamm von Bauxiten der Koktal-Lagerstätte (Kasachstan) ist ein giftiger Rückstand, der bei der Gewinnung von Aluminiumoxid (Tonerde) – einem Zwischenprodukt der Aluminium-Herstellung – aus aluminiumhaltigen Erzen (Bauxit) anfällt. Rotschlamm enthält 2–12 % Titan, 0,05–0,8 % Vanadium, 60 g/t Gallium und ca. 1,7 kg/t seltene Erden. Durch die Verarbeitung von Rotschlamm können jährlich bis zu 100000 Tonnen seltene Erden gewonnen werden.

Ein weiteres Beispiel sind Reserven von kritischen Metallen in den Abraumhalden und Aufbereitungsrückständen der Bergbau- und Verarbeitungsanlage Belogorsk im Osten Kasachstans. Mehr als 40 Jahre lang wurde Selenemetall-Pegmatiterze verarbeitet zur Herstellung von Tantal-Niob-, Zinn-, Spodumen-, Quarz- und Feldspatkonzentraten, die zur

metallurgischen Verarbeitung an Fabriken in Kasachstan geliefert wurden. Während der Betriebszeit (bis 1993) des Unternehmens wurden Reserven an Aufbereitungsrückständen Belogorsk in Höhe von 15 Mio. Tonnen abgelagert. Der Gehalt von kritischen Metallen (Tantal - 31,8 g/t, Beryllium-450g/t und Lithium-175 g/t) ermöglicht es heute, ihre Verarbeitung zu organisieren.

Das Kaspische Chemie- und Metallurgiewerk (Aktau) hat nach der Verarbeitung von Uran-Phosphor-Erzen ca. 110 000t Aufbereitungsrückstände abgelagert, die seltene Erden 4,5% betragen, davon HREE- 2,5 % (2662t), LREE -2 % (2100t). Außerdem, in mehr als 40 Bergeteichen abgelagerte Rückstände (Tailings) aus dem früheren Erzbergwerk und Aufbereitungsbetrieben Kasachstan enthalten wertvolle wirtschaftsstrategische Rohstoffe.

Hydromineralressourcen Zentralasiens stellen auch ein großes Potenzial für die Gewinnung kritischer Metalle dar. Die Sole der Salzseen der Aralseeregion enthält Lithium-162,05 mg/kg, Ölreservoirwasser von Karatschagan - 130 mg/kg. Oberflächensolen, Bodensalzsedimenten von Kara-Bogaz-Gol (Turkmenistan) stellen die größte Basis der Halurgie dar. Der Gehalt Lithium beträgt 0,06 g/l und liegt damit deutlich über der industriell geforderten Lithiumkonzentration von 1 mg/l. Lithium-haltige Sole aus Öl- und Gasreservoiren (Teplovskaya, Gremyachinsk, Tasym) in West-Kasachstan enthalten Lithium von 0,0065 g/l bis 0,087 g/l, Strontium von 0,35– bis 4,80 g/l. [4,5]

1.4 Unkonventionelle Lagerstätten im Sibirien

Unterirdische Solen gehören zu Hydromineralrohstoffen und sind einzigartige unkonventionelle Lagerstätten von kritischen Metallen des Sibiriens. Die Solen sind eine Art von Untergrundwässer. Sie sind einzigartig nicht nur wegen ihrer Sättigung, sondern auch wegen der Tatsache, dass sie die Evolution der Erde im weiteren Sinne begleitet haben [6].

Die Solen der Sibirischen Tafel sind aufgrund des hohen Gehalts an seltenen Alkali- und Erdalkalielementen (u.a. Lithium, Rubidium, Zäsim, Strontium, Brom, Kalium, Magnesium, Kalzium) besonders wertvoll. Die absolute Konzentration dieser Elemente ist dutzendmal höher als die untere Grenze konventioneller Lagerstätten.

Das ist auch wichtig, da auf diesem Territorium viele Vorkommen ausgebeutet und Kohlenwasserstoff-Lagerstätten (Kovyktinskoye, Yaraktinskoye, Znamenskoye usw.) geschürft werden. Das Gaskondensatfeld «Kovyktinskoye», das größte in Ostrussland mit förderbaren Gasreserven von 1,6 Billionen m³, enthält erhebliche Mengen an hochmineralisiertem Formationswasser (Sole), das als hydromineralischer Rohstoff für die anschließende Gewinnung von Lithium, Brom und Magnesium gewonnen werden kann. Li-Gehalt – 0,5 g/l, Mg – 28,3 g/l, Ca – 153,9 g/l. Der Brunnendurchfluss beträgt ca. 960 m³/d. Trotzdem bleibt die Rückgewinnung von kritischen Metallen aus den Hydromineralressourcen in Sibirien bis heute sehr niedrig. [7]

2 CASE STUDY

2.1 Charakteristik der hochkonzentrierten Grundwassersolen und Tagebaurestseen in Sibirien

Gruben- und Tagebauwässer sind sehr oft eine Mischung aus Grundwasser, Ablagerungen und Prozesswasser, deswegen sind Begleituntergrundwasser und Dränwasser zu unterscheiden. Das Volumen der Gruben- und Tagebaurestseen machen Hunderten Mio. Kubikmeter pro Jahr aus. Die Mehrheit von ihnen wird nicht verwertet. Der Gehalt an vielen Mikrokomponenten erreicht große Konzentrationen in diesem Gewässer. Es ist bekannt, dass die Strontiumkonzentration in Tagebauwässern der Gaskondensatlagerstätte «Kovykta» in Ost-Sibirien mehr als 300 mg/l ausmacht, in den Solen der durchschlagsröhre „Udatschnaya“ im Polarkreis – mehr als 1000 mg/l.

Von Interesse sind die Solen der artesischen „Tunguskiy“ und kryoartesischen „Olenekskiy“ Becken. Unter Permafrost liegt ein aus Ablagerungen des Ordoviziums bestehender

Grundwasserleiter mit der Ablagerungsdichte von 5 – 7 Meter und dem Piezometerniveau von 260 – 325 Meter. Hier kommen Chlorid-Natrium-Solen mit der Konzentration von 400 g/l vor. [7, 8]. Der Gehalt der Mikrokomponenten, einschließlich kritischen Metallen sind in Tabelle 1 vorgestellt.

Tab.1: Chemische Zusammensetzung der Solen aus dem Vorkommen der Durchschlagsröhre „Udatschnaya“ [7]

Elemente	Gehalt, mg/l minimales	maximales	Industriekondition, mg/l
K	210,00	37890,00	-
Na	10470,00	43033,00	-
Ca	591,00	80560,00	-
Mg	164,00	17290,00	1000,00
Li	7,00	346,00	10,00
Rb	1,22	17,13	3,00
Sr	36,00	2551,00	300,00
Zn	5,00	465,00	-
Cu	-	28,00	-
Mn	180,00	3500,00	-
B	202,00	408,00	200,00
Br	1,20	5320,00	150,00
pH	2,10	6,65	-
Dichte, g/cm ³	1,07	1,26	-

Sogar beim minimalen Abpumpen von 50 m³/h ermöglicht ihre Aufbereitung eine Rückgewinnung von Strontium von 130 t und 400 t pro Jahr verhältnismäßig umgerechnet.

Stattdessen werden die Gewässer in den Boden hineingepumpt oder auf die Oberfläche weitergeleitet. Die negative Wirkung der flüssigen Tagebauabfälle auf die Umwelt ist viel größer als die der festen Abfälle, die von der höheren Migrationsfähigkeit verursacht ist und infolgedessen größere Fläche beeinträchtigt werden. [7]. (Bild 1,2). Außerdem entgeht die Produktion aus der in Hydromineralressourcen enthaltenen kritischen Metallen der Wirtschaft. Deswegen sollten die Kapazitäten von unkonventionellen Lagerstätten schnell erweitert werden. Im Rahmen der durchgeführten Forschungsprojekten wurde die wirtschaftliche Zweckmäßigkeit der Verarbeitung von hochkonzentrierten natürlichen Grundwassersolen und Tagebaurestseen mit dem Zweck der selektiven Gewinnung der seltenen Metalle begründet.

Lithium, Rubidium, Strontium, Zäsim und andere Metalle werden aus den Chlorid-Natrium-Solen der eisenhaltigen Vorkommen und aus den Chlorid-Kalzium-Solen durch «Direct Lithium Extraction» mit Hilfe der Kationenaustauschsorption, Elutionschromatographie extrahiert. Man hat die Abhängigkeit des Extraktionsgrades der Metallionen (Sr, Li, Rb) von der Salzsäurekonzentration im Bereich von 0,1 bis 8 N HCl festgestellt und gezeigt, dass die gradientstufige Elution eine effektive Separation und quantitative Metallextraktion ermöglicht.



Abb. 1 - Durchschlagsröhre (Kimberlitschlotes) „Udatschnaja“ [9]



Abb. 2 - Solen der Durchschlagsröhre „Udatschnaja“ [9]

Mit Hilfe der HETP-Verfahren (eng. HETP, height equivalent to a theoretical plate) wurde die chromatographischen Trennung der Sr-, Li- und Rb-Ionen der Solen bei der Elution mit 2NHCl auf dem Kationenaustauscher KU-2x8 und Dawex-50x8 durchgeführt. Außerdem wurde eine Reihe von technologischen Schemen für die Extraktion des Strontiums, Lithiums und Rubidiums aus Tagebauwässern und hochkonzentrierte Grundwassersolen entwickelt. [8].

3 SCHLUSSFOLGERUNG

Aufgrund der geplanten grünen Energietransition wird der Bedarf an kritischen Mineralien in EU rasch steigen, da diese für diverse Technologien und Infrastrukturen wie z.B. Windturbinen und Stromnetze benötigt werden. Deswegen könnten in nächster Zukunft Zentralasien und Sibirien für die EU-Länder vielversprechende Regionen für bilaterale Rohstoffpartnerschaften sein. Die EU-Länder sollten das Engagement im Bereich der Entwicklungszusammenarbeit mit rohstofffördernden Staaten weiterführen:

- Unterstützung bei der Ausbildung von Fach- und Führungskräften für den Rohstoff- und Industriebereich
- Beratung zur Förderung von Investitionen und Innovationen sowie des Transfers von Spitzentechnologie zur Rohstoffverarbeitung
- Förderung zu Ressourcen- und Energieeffizienz sowie zur Zusammenarbeit im Forschungs- und Technologiebereich.

LITERATUR

1. Critical Raw Materials Act. URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj>
2. T.A. Mukashev, S.N. Alpysbaeva. Development trends of the world market of rare earth metals and prospects of Kazakhstan. Bulletin of the Kazakh University of Economics, Finance and International Trade, 2024 – No. 1 (54)
3. Staatsbericht über den Zustand und die Nutzung der Mineralressourcen der Russischen Föderation, 2022 - Moskau, 2023 - 640 S.
4. Rare metal and rare earth deposits of Kazakhstan. URL: <https://metalmininginfo.kz/archives/2256>
5. On approval of the Comprehensive Plan for the Development of the Rare and Rare Earth Metals Industry for 2024–2028. Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan dated December 28, 2023 No. 1221
6. Shvartsev S. Allgemeine Hydrogeologie. - M: Nedra, 423 S, 1996.
7. Ulanova O.V. Entwicklung der selektiven Extraktion von Alkali- und Erdalkalimetallen aus unterirdischen Solen. Autor. diss ... Kandidat technischen Wissenschaften. Irkutsk, 2001
8. Ulanova O. (2015). Hydromineral Ressourcen - eine Quelle für strategische seltene Metalle in Sibirien: AIMS - Aachen International Mining Symposia. Fifth International Symposium "Mineral Resources and Mine Development", May 27-28, 2015, Aachen, Germany
9. URL: <http://serega-kobah.livejournal.com/126566.html>

Anwendung von 3D Simulationstechnologien in der Recyclingbranche

Thomas Kaufmann¹, Patrick Gröller¹, Manfred Hall¹, Klemens Winkler² & Alexia Tischberger-Aldrian³

¹⁾ EXARON GmbH, Haselsdorf-Tobelbad, Österreich

²⁾ K1-MET GmbH, Area 3, Linz, Austria

³⁾ Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Leoben, Österreich

KURZFASSUNG: Aufgrund der großen Produkt- und Materialvielfalt und der verwendeten Elemente und Legierungen wird Metallrecycling zukünftig noch herausfordernder und aufwendiger. Es sind eine Vielzahl von Prozessschritten notwendig, um die maximale Wertschöpfung bestimmter Metalle (u.a. kritische Elemente) zu erzielen. Hinzu kommt, dass zumeist mehrere Stakeholder involviert sind. Um den Überblick bei sehr komplexen Wertschöpfungskreisläufen zu bewahren, können 3D-Simulationstechnologien mit entsprechender Visualisierung von Prozessen eine große Hilfe sein. Dies wird im Leitprojekt KIRAMET anhand eines mehrstufigen, fiktiven Recyclingprozesses demonstriert.

1 EINLEITUNG

In der Theorie lassen sich Metalle unbegrenzt recyceln, sie werden nicht „verbraucht, sondern gebraucht“. Die Realität ist jedoch um ein Vielfaches komplexer, denn mittlerweile werden Produkte sowohl in ihrer Zusammensetzung als auch in ihrer Produktgestaltung und hinsichtlich der vorhandenen Verbunde (Kunststoff-Metall aber auch Metall-Metall) immer vielfältiger und unübersichtlicher. Das Design von Produkten berücksichtigt die Recyclingfähigkeit dabei kaum bis überhaupt nicht. Während das anthropogene Metalllager kontinuierlich wächst, wird die Wertschöpfung der Metalle oft nicht maximal ausgeschöpft. (Aurubis 2021)

Die Gründe dafür sind vielfältig – ein Grund ist, dass nicht alle Legierungen in aktuellen Produkten wieder Verwendung finden, das zeigt folgendes Beispiel anhand des Hauptträgers Kupfer: Reines Kupfer findet vor allem im Bereich Elektrik Anwendung, während CuSnZn, CuSiMn, CuNiFe usw. im Transportwesen verwendet werden. Im Consumer-Bereich hingegen finden häufig CuNiZn oder CuZnPb Anwendung und im Bauwesen werden vorrangig CuSnNi, CuZnMn, CuAlNi usw. verwendet. Diese riesige Vielfalt beschert auch dem Kupferrecycling vielfältige Herausforderungen und nicht alle Legierungen können – limitiert durch Qualität und verfügbare Menge – ohne entsprechende Raffination direkt wieder Verwendung finden. (Nolte 2021)

Metallrecycling hat heute und auch in Zukunft die Aufgabe, Werkstoffkombinationen der Vergangenheit in zeitgemäße Werkstoffe und Produkte zu transformieren. Der Fokus liegt derzeit aber auf der Verwertung der großen Masse (hohe Recyclingquoten), wobei selbst das metallurgisch zum Teil bereits anspruchsvoll ist (Nolte 2021), das volle Potential wird aber nicht ausgeschöpft. In aktuellen Verfahrensrouten können nicht alle Elemente, die in einem bestimmten Hauptträgermaterial gebunden sind, auch wieder separiert über dessen Metallurgie in für Industrieprozesse direkt einsetzbarer Form ausgebracht und beispielsweise als Legierungselement wiederum verwendet werden. So wird im Rahmen des Hauptträgers Eisen die Ausbringung von Begleitelementen hauptsächlich durch Ausfällen in die Schlacke erreicht, die anschließend aufwändig verarbeitet werden müsste, um Legierungselemente oder Wertstoffe zurückzugewinnen (z.B. Forschungsprojekte iSlag oder Slagreus). Zusätzlich lassen sich verschiedene Elemente metallurgisch nur schwer aus der Schmelze entfernen und sollten in der Phase vor dem Einschmelzen als Feststoff abgeschieden werden (Daehn et al. 2019).

Weiters sind viele Elemente aus materialwissenschaftlicher Hinsicht oft unerwünscht (z.B. Cu, Cd, Sb) und viele weitere Elemente als Begleitelemente oder Legierungselemente nur in sehr engen Toleranzen hinsichtlich ihrer Konzentration erlaubt oder erwünscht.

Laut Dworak et al. (2023) werden insbesondere die Elemente Kupfer, Chrom, Molybdän, Nickel, Arsen und Zinn von Herstellern hochqualitativer Stähle als relevant angesehen. Chrom,

Molybdän und Nickel stellen klassische Legierungselemente dar und sind oft erwünscht, während Arsen und Zinn als Störelemente gelten. Kupfer ist zumeist unerwünscht, es gibt jedoch auch spezielle Stähle, in denen Kupfer als Legierungselement eingesetzt wird.

Im Regelfall werden Verunreinigungen bei der Stahlherstellung durch Zugabe von Primärrohstoffen „verdünnt“ – aber nur, wenn sie eine geringere Sauerstoffaffinität als Eisen haben. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Aluminium, Magnesium und Titan, wenn diese als Hauptträger fungieren – auch hier ist keine separate Gewinnung anderer Metalle möglich. Sind jedoch Kupfer, Blei, Zink oder Nickel die Trägermetalle, können viele weitere Metalle mitausgebracht werden. Jedoch ist jeder metallurgische Prozess letzten Endes durch thermodynamische Gesetzmäßigkeiten limitiert und eine Separation auf metallurgischer Ebene zu energieintensiv oder sogar unmöglich. (Schäfer 2021)

Die Rückgewinnung möglichst vieler Elemente und Legierungen wäre das Ziel einer modernen Kreislaufwirtschaft. Doch selbst Schrotte aus dem Post Industrial-Segment weisen oft nicht die erforderliche Reinheit auf, so müssen z.B. Beschichtungen (Sn, Zn, Ni, Cr, organisch usw.) entfernt werden. Noch herausfordernder ist die Situation bei Altschrotten. Eine rein mechanische Aufbereitung ist nicht ausreichend, zukünftig werden Sortierprozesse unter Zuhilfenahme von XRF (Röntgenfluoreszenz), XRT (Röntgentransmission), LIBS (Laserinduzierte Plasma-Spektroskopie) oder NAA (Neutronen-Aktivierungsanalyse) eingesetzt werden müssen, um die erforderlichen Spezifikationen zu erfüllen. (Nolte 2021)

Reuter & Kojo (2012) halten zudem einen produktorientierten Zugang anstelle eines rein materialbasierten Zugangs für essentiell, um die Rückgewinnung von Materialien und insbesondere Metallen zu steigern.

Die Metallkreislaufwirtschaft von Post-Consumer-Produkten umfasst in der Regel folgende Prozessschritte:

1. Sammlung: Die Sammlung stellt ganz massiv die Weichen für die weiteren Verwertungsmöglichkeiten. So wird in verschiedenen Studien gezeigt, dass wenn kleine Elektroaltgeräte in Europa nicht getrennt gesammelt, sondern im Haushaltsschrott mitgesammelt werden, eine separate Verwertung und Wertschöpfung de facto unmöglich gemacht wird. (Ryan-Fogarty et al. 2021) Ein Recycling von Edelmetallen aus z.B. Elektroaltgeräten ist jedoch ökonomisch sinnvoll, da im Rahmen der Kupfermetallurgie hohe Ausbeuten erzielt werden können, obwohl die Konzentration im EoL-Produkt selbst vergleichsweise gering ist. Würde das Kupfer jedoch in der Stahlfraktion verbleiben, so gehen sowohl Kupfer als auch alle weiteren Edelmetalle unwiederbringlich verloren. (Schäfer 2021)
2. ReUse: Ausbau und Wiederverwendung von einzelnen Komponenten oder Reparatur des End-of-Life- (EoL) Produktes zur Wiederverwendung. In diesem Fall fällt es erst zu einem späteren Zeitpunkt für das Recycling an.
3. Demontage der EoL-Produkte hinsichtlich wertvoller, in der nachfolgenden Aufbereitung störender oder gesetzlich vorgegebener Komponenten.
4. Mechanische Behandlung (u.a. Zerkleinerung) und Auftrennung in verschiedene Stoffströme: Ziel ist die Separierung nicht in einzelne Metalle, sondern in metallurgisch kompatible Metallfraktionen.
5. Chemische bzw. metallurgische Verwertung und Metallurgie von verschiedenen Stoffströmen zur Herstellung von reinen Metallen oder Metallsalzen. (Schäfer 2021, Hagelüken & Goldmann 2022)

Dazu ist jedoch ein Netzwerk von vielen, zum Teil hochspezialisierten Unternehmen im Bereich der Metallurgie, aber auch über den gesamten Wertschöpfungskreislauf hinweg notwendig. Kein Unternehmen ist allein in der Lage, alle Legierungen und Elemente in der nötigen Tiefe zurückzugewinnen. (Nolte 2021)

Es konnte bereits in der Vergangenheit anhand von verschiedenen Beispielen gezeigt werden, wie wichtig eine gute Vernetzung der metallurgischen Systeme und insbesondere auch die Abstimmung mit den vorhergehenden Prozessschritten ist, um die Recyclingquoten noch weiter zu erhöhen und v.a. Metalldissipation zu begrenzen. (Schäfer 2021)

2 3D-SIMULATIONSTECHNOLOGIEN ALS UNTERSTÜTZENDES TOOL IN DER RECYCLINGBRANCHE

Experten aus unterschiedlichsten Sektoren haben erst kürzlich die zentralen Technologiefelder für die nächsten Jahre erarbeitet und daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet. Im Ergebnispapier „Technologie & Innovation in der Industrie 4.0“ hat die Plattform Industrie 4.0 Österreich acht Schlüssel-Forschungsfelder definiert und konkrete Gestaltungsempfehlungen formuliert. Eines der identifizierten Felder ist die Virtualisierung: Durch Virtualisierung können Objekte oder Systeme im digitalen Raum über einen digitalen Zwilling modelliert oder simuliert werden. Die übergeordnete Vision ist eine lückenlose, modellbasierte Gestaltung, Vorhersage, Steuerung und Verfolgung von Produkteigenschaften. Dabei geht es vorrangig darum, zukünftig die Komplexität zu beherrschen und Modelle weiterzuentwickeln. Das Ergebnispapier ist damit eine Bestätigung, dass der Einsatz von Simulations- und XR (Extended Reality) Technologien für Unternehmen aller Branchen relevant ist. (Plattform Industrie 2024)

Simulations- und XR Technologien werden für die digitale Fabrikplanung sowie digitale Produktions- und Prozessoptimierung schon eingesetzt. In manchen Branchen, wie beispielsweise in der Automobil-, Elektronik- und Pharmaindustrie, kommen diese Tools bereits häufig zur Anwendung. Überall dort, wo komplexe Prozesse kontinuierlich zunehmen und in einer Abnahme der Übersichtlichkeit, Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit resultiert, können Simulations- und XR Technologien dabei helfen, Kosten zu senken, Ressourcen zu sparen und die Nachhaltigkeit zu steigern. Lieferverzögerungen, Ressourcenknappheit bzw. hohe Materialkosten, fehlendes Personal bzw. hohe Personalfliktuation, Reisebeschränkungen (durch Krankheiten oder Krisen) usw. – das alles sind Herausforderungen, die in den letzten Jahren stark in den Fokus gerückt sind. Vieles davon kann durch den gezielten Einsatz von Digitaltechnologien bewältigt oder zumindest entschärft werden – ganz nach dem Motto der Twin Transition (= Wandel hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft mit Unterstützung digitaler Lösungen). Durch den Einsatz von Simulations- und industrietauglichen XR Technologien können Unternehmen

1. schneller werden, da kritische Projektphasen verkürzt und Interpretationsspielräume reduziert werden;
2. effizienter werden, da Prozesse optimiert sowie Fehler frühzeitig erkannt und korrigiert werden;
3. agiler werden, da eine interaktive Zusammenarbeit maximale Flexibilität und User Experience ermöglicht.

Die Verlagerung der Realität in die virtuelle Welt hat wesentliche Vorteile, weil Handlungen nicht in der Praxis umgesetzt werden müssen. Diese Vorteile sind u.a.:

1. Senkung der Kosten: Vermeidung von Fehlern („fail virtual = fail fast, safe & cheap“), Reduktion von Inbetriebnahme- und Stillstandszeiten, Verkürzung von Entwicklungsphasen, Reduktion von Reisen usw.
2. Einsparung von Ressourcen: digitale Mockups statt einmalige Testaufbauten, zuerst simuieren und optimieren, erst danach realisieren, Erhöhung der Mitarbeiterverfügbarkeit, Digitale Dokumentation
3. Steigerung der Nachhaltigkeit: Wiederverwendbarkeit von Simulations- und XR Anwendungen in verschiedenen Unternehmensbereichen (F&E, Technik, Vertrieb, Service etc.), Steigerung der Wissensvermittlung und des Lernerfolgs;

EXARON ist ein Solution Provider, der sich auf die Modellierung und Simulation komplexer industrieller Prozesse und Systeme spezialisiert hat. Dabei werden immersive 3D Umgebungen genutzt, in denen Systemmodellierungs-, Simulations-, Datenvisualisierungs-, Kollaborations- und AI-Technologien kombiniert werden können. Das ermöglicht die Entwicklung kundenspezifischer Lösungen, die den Herausforderungen wachsender industrieller Komplexität gewachsen sind.

Im österreichischen Leitprojekt KIRAMET werden diese Simulations- und XR Technologien unterstützend verwendet, um einen komplexen, fiktiven Recyclingprozess (vgl. Abbildung 1;) mit

einer Vielzahl von Schritten, Materialflüssen und Stakeholdern (jeweils markiert durch die grau hinterlegten Bereiche in Abbildung 1) überschaubarer und nachvollziehbarer zu machen. Im Projekt KIRAMET wird das Ziel verfolgt, große Mengen an Altschrott in Form von qualitativ hochwertigen, definierten und national verwertbaren Metallfraktionen mit ökonomisch vertretbarem Aufwand bereitzustellen, und damit einen wesentlichen Beitrag zur Klimaneutralität und Rohstoffversorgung zu leisten. Simulationen und XR werden im Rahmen dieses Projekts genutzt, um nicht nur einzelne (neu konzipierte) Prozesswege zu visualisieren, sondern auch, um ein Big Picture des gesamten Wertschöpfungskreislaufes zu erhalten. Abbildung 2 zeigt Ausschnitte dieser Simulationen. Im Rahmen der Posterpräsentationen der Recy&DepoTech-Konferenz wird es möglich sein, die simulierten Prozesse mittels VR-Brille hautnah zu erleben.

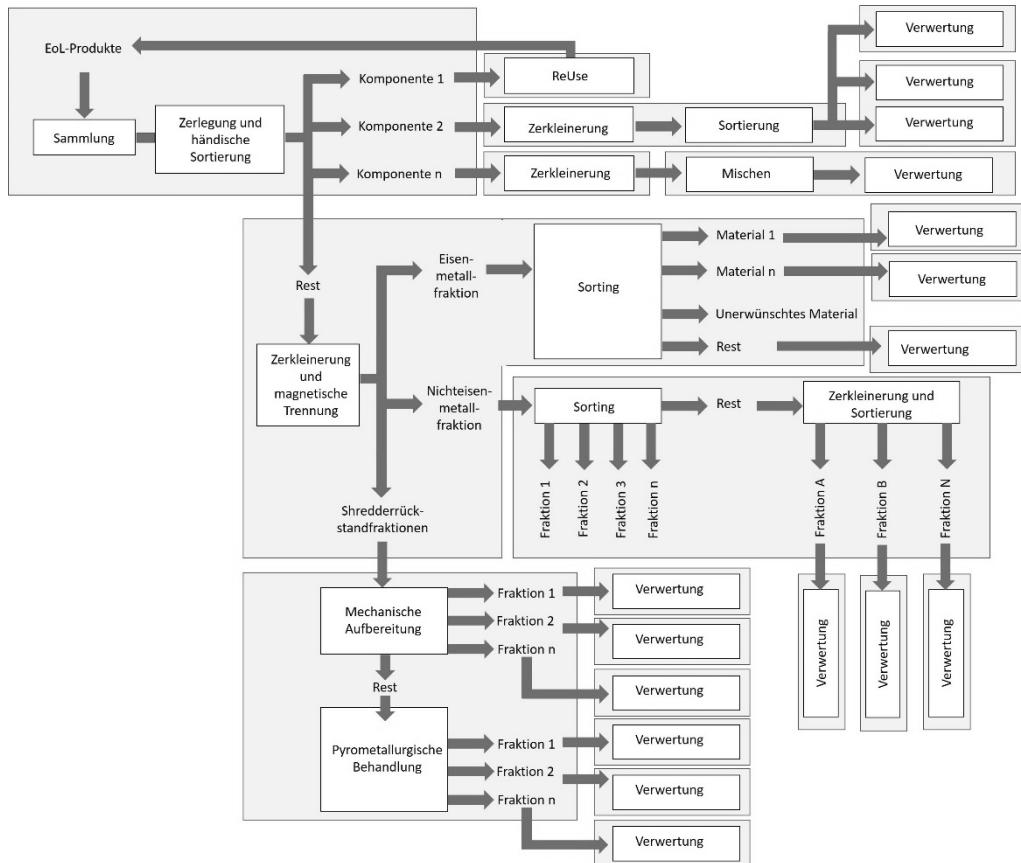


Abb. 1: Grob schematisch skizzierter, komplexer und fiktiver Metallrecyclingprozess in KIRAMET

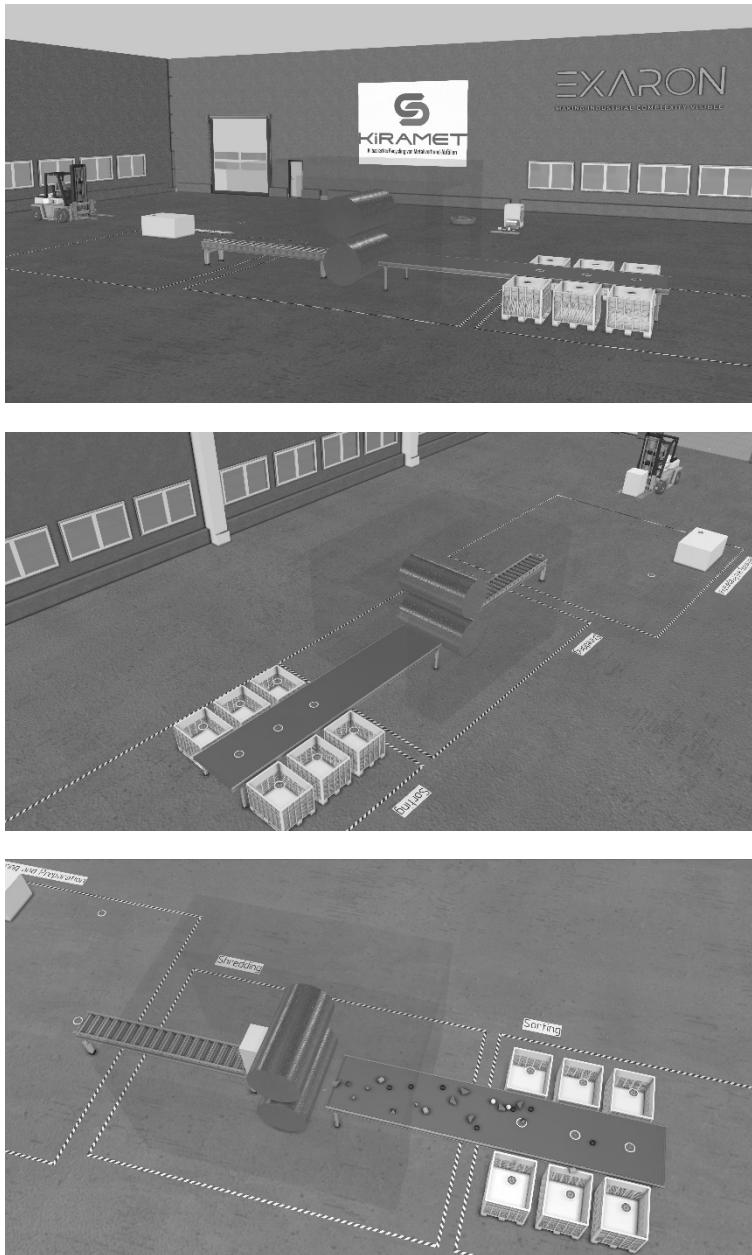


Abb. 2: Ausschnitte aus dem simulierten Prozess in KIRAMET (© EXARON)

3 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Metallrecycling von Post Consumer Metallabfällen ist komplex und umfasst zahlreiche Prozessschritte. In der Praxis würde fast jeder dieser Prozessschritte bei jeweils anderen Stakeholdern stattfinden. Das macht einen Informations- und Datenaustausch und ein zielgerichtetes, abgestimmtes Konzept zur maximalen Rückgewinnung von essentiellen Metallen oft schwierig. Eine

Visualisierung des Prozesses kann wesentlich dazu beitragen, die komplexe Realität besser zu erfassen und gemeinsam optimierte Abläufe zu generieren. Zudem lassen sich neue Abläufe ebenfalls simulieren – ohne dass sie real existieren. Die Simulationen, die im Rahmen des Projektes KIRAMET entstehen, sollen demonstrieren, dass der Einsatz dieser digitalen Lösungen einen wesentlichen Mehrwert auch für die Recyclingbranche liefern kann, um z.B. mit geringem Aufwand Prozesse zu überprüfen, zu validieren und letztendlich ressourcenschonend und nachhaltig in die Realität umzusetzen.

DANKSAGUNG

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Leitprojektes „KIRAMET“, das vom österreichischen Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie gefördert wird (FFG Nr. FO 999899661).

LITERATURVERZEICHNIS

- Aurubis (2021) *FACTSHEET - Hintergründe zum Metallrecycling*. Factsheet Recycling - Stand 07/2021.
- Daehn, K., Cabrera Serrenho, A., Allwood, J. (2019) *Finding the Most Efficient Way to Remove Residual Copper from Steel Scrap*. Metallurgical and Materials Transactions B Volume 50B, 1225.
- Dworak, S., Feilner, J., Beermann, M., Häuselmann, M., Schenk, J., Michelic, S., Cejka, J., Sakic, A., Mayer, J., Steininger, K. (2023) *Innovatives Stahlrecycling – Potenziale und Herausforderungen für innovatives und nachhaltiges Recycling*. Österr Wasser- und Abfallw 75, 97–107. <https://doi.org/10.1007/s00506-022-00903-3>.
- Hagelüken, C., Goldmann, D. (2022) *Recycling and circular economy—towards a closed loop for metals in emerging clean technologies*. Miner Econ 35, 539–562 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00319-1>.
- Nolte, A. (2021) *Herausforderungen an das Metallrecycling im All Metals Age*. REWIMET Symposium 2021 Ressourcenmanagement. 25. – 26.08.2021 Clausthal Zellerfeld. Downloadbar unter: https://www.rewimet.de/images/downloads/symposium2021_nolte.pdf (letzter Zugriff: 28.06.2024).
- PI (Plattform Industrie 4.0) (2024) *Wettbewerbsfähig durch Technologie und Innovation – neue Roadmap der Plattform Industrie 4.0 Österreich gibt den Takt vor*. Downloadbar unter: <https://plattformindustrie40.at/blog/2024/06/05/wettbewerbsfaehig-durch-technologie-und-innovation-neue-roadmap-der-plattform-industrie-4-0-oesterreich-gibt-den-takt-vor/>. Zuletzt aufgerufen am 09.07.2024.
- Reuter, M.A., Kojo, I.V. (2012) *Challenges of metals recycling*. Materia 2/2012.
- Ryan-Fogarty, Y., Coughlan, D., Fitzpatrick, C. (2021) *Quantifying WEEE arising in scrap metal collections – Method development and application in Ireland*. Journal of Industrial Ecology. 25:1021-1033. DOI: 10.1111/jiec.13101.
- Schäfer, P. (2021) *Recycling – ein Mittel zu welchem Zweck?* Springer-Verlag. Downloadbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-658-32924-2_2. Zuletzt aufgerufen am 09.07.2024.

KONTAKT

Manfred Hall
EXARON GmbH
manfred.hall@exaron.at
<https://exaron.at/>
<https://www.unileoben.ac.at/kiramet/home>

Anwendung von FOST zur Annotierung von Metallverbundabfällen

Melanie Neubauer¹, Gerald Koinig², Alexia Tischberger-Aldrian², Yves Radmann³,
Walter Martinelli³, Roland Pomberger² & Elmar Rückert¹

¹⁾ Montanuniversität Leoben, Chair of Cyber-Physical-Systems, Leoben, Österreich

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

³⁾ Scholz Austria GmbH, Wien, Österreich

KURZFASSUNG: In diesem Paper wird ein halbautomatischer Video-Annotation-Ansatz vorgestellt, der den Annotierungsaufwand im Bereich des maschinellen Sehens erheblich reduziert. Das entwickelte Tool, genannt „Fast Object Segmentation and Tracking Tool“ (FOST), wurde speziell für das KIRAMET-Projekt zur Segmentierung und Verfolgung von Metallverbundabfällen entwickelt. Es ermöglicht die Segmentierung und Klassifizierung von Objekten in Videos mit einem einzigen Klick, gefolgt von einer automatischen Annotation durch Interpolation und Verfolgung über nachfolgende Frames. Der manuelle Segmentierungsprozess wird durch den 1-Click-Algorithmus von FastSAM unterstützt, während die automatische Segmentierung durch Berechnung des optischen Flusses zwischen Frames erfolgt. Das verwendete Dataset besteht aus Videos von zerkleinertem Stahlschrott, wobei jedes Objekt anhand seiner Materialklasse kategorisiert wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass FOST präzise Segmentierungen mit geringen Berechnungszeiten erreicht, die je nach Anzahl und Größe der Objekte variieren. Durch gezieltes Nach-training des vortrainierten FastSAM-Modells mit eigenen Daten können die Ergebnisse weiter verbessert werden. Darüber hinaus kann FOST aufgrund seiner flexiblen Implementierung in vielen industriellen Projekten im Bereich des maschinellen Sehens Anwendung finden.

1 EINLEITUNG

Im Bereich des Deep Learning im maschinellen Sehen ist die Minimierung des Annotierungsaufwands der Daten von entscheidender Bedeutung. Um diesen Prozess zu optimieren, wird in diesem Paper ein halbautomatischer Video-Annotation-Ansatz vorgestellt, der den arbeitsintensiven Charakter der Bilddaten-Annotation aus Video-Frames erheblich reduziert. Die Idee besteht darin, jedes Objekt mit einem einzigen Klick zu segmentieren und zu klassifizieren, wodurch eine automatische Annotation durch Interpolation und Verfolgung über nachfolgende Frames ermöglicht wird. Das in dieser Arbeit verwendete Tool wurde eigens für das FFG Leitprojekt KIRAMET entwickelt, welches sich mit dem Recycling von Metallverbundabfällen beschäftigt. Das Tool nennt sich „Fast Object Segmentation and Tracking Tool“ (FOST) (Neubauer & Rückert, 2024).

2 METHODEN

Unser Software-Tool bietet eine Schnittstelle zur halbautomatischen Annotation von Videos. Im Backend wird eine Datenbank erstellt, die Einträge für jedes Objekt pro Frame speichert. Jeder Eintrag enthält die Klasse des Objekts und ein Polygon $[(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots]$, welches die entsprechenden Randpixel im Bild abgrenzt.

In Abb. 2 wird der gesamte Beschriftungsvorgang gezeigt. Der manuelle Segmentierungsprozess wird im linken oberen Kasten dargestellt, während der automatische Segmentierungsprozess im rechten Kasten abgebildet ist, wobei beide nahtlos mit der durch den linken unteren Kasten gekennzeichneten Datenbank verbunden sind. In den Bildern darunter werden die Ergebnisse der Videoannotierung visuell dargestellt. Der Vorgang der automatischen Segmentierung wird so lange wiederholt bis der Benutzer die Anwendung unterbricht.

In den nächsten beiden Unterkapiteln finden Sie eine detaillierte Beschreibung der manuellen sowie auch der automatischen Segmentierung.

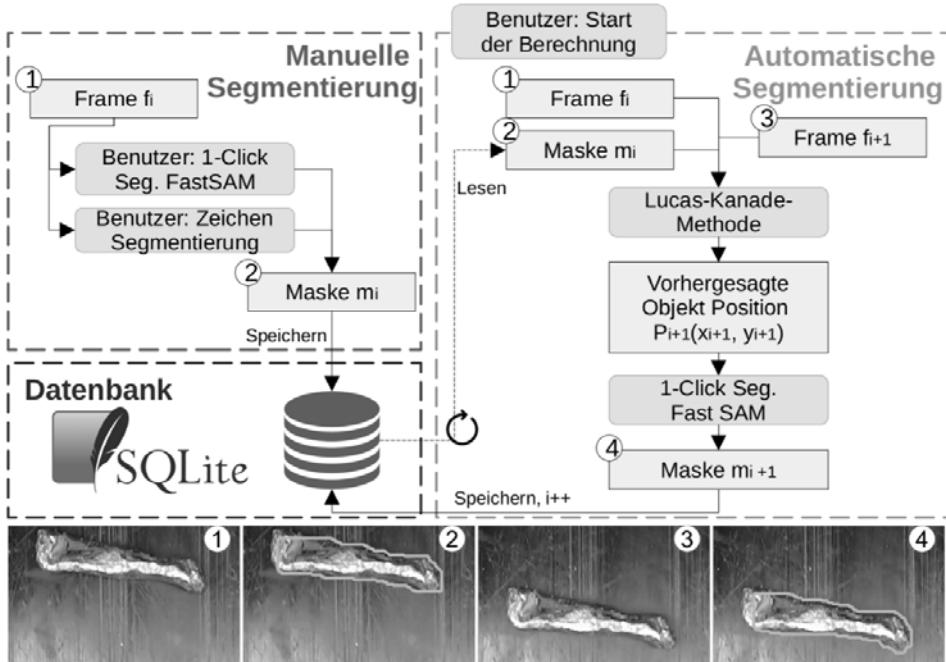


Abb. 1: Detaillierte Beschreibung des Segmentierungsprozesses in FOST

2.1 Manuelle Segmentierung

Die manuelle Segmentierung wird vom Benutzer initiiert und beginnt mit der manuellen Beschriftung des ersten Frames (Nr. 1 in Abb. 2). FOST ermöglicht die Objekterkennung hierbei entweder durch das Zeichnen der Objektgrenzen mit einem speziellen Zeichenwerkzeug andererseits die Auswahl des Objekts mit dem 1-Click-Algorithmus. In FOST werden dazu nur die Pixelkoordinaten $P(x, y)$ innerhalb eines Objekts in einem Bild als Eingabe verwendet. FastSAM erzeugt daraufhin die Maske des Objekts, welches sich am angegebenen Punkt befindet. Der verwendete 1-Click-Algorithmus ist durch eine vorhandene Implementierung vom Fast Segment Anything Model (FastSAM) (Zhao, et al., 2023) in FOST möglich.

Anschließend werden die Masken der Objekte des ausgewählten Frames in der Datenbank gespeichert.

2.2 Automatische Segmentierung

Die automatische Segmentierung der Masken wird durch einen speziellen Button in FOST initiiert, welcher die Kalkulation des folgenden Frames startet. Dabei wird der aktuelle Frame (Nr. 1 in Abb. 2), die Maske des aktuellen Frames (Nr. 2 in Abb. 2) und der folgende Frame (Nr. 3 in Abb. 2) verwendet, um die Maske für den nächsten (Nr. 4 in Abb. 2) zu berechnen. Hierbei wird zuerst der optische Fluss innerhalb der beiden Frames berechnet. Von diesem kann dann auf die zukünftige Position der einzelnen Objekte geschlossen werden.

3 DATEN

Das verwendete Stahlschrott-Datenset, welches zur Evaluierung der Ergebnisse verwendet wurde, besteht aus Videos, die zerkleinerten Stahlschrott auf einem Förderband zeigen. Jedes der geschredderten Objekte ist einzigartig, wobei sich auch Teile von Elektromotoren und Rotoren mit Kupferwicklungen darunter befinden. Der in den Videos verwendete Schrott wurde zuerst im Schredder zerkleinert und anschließend mittels Magnetabscheider vorsortiert.

Das Datenset bietet eine umfassende Darstellung dieses Schrottes und berücksichtigt die Komplexität, die mit unterschiedlichen Objektgrößen, verschiedenen Abständen zwischen den Objekten und hoher Material- sowie Formvielfalt verbunden ist. In Abb. 2 ist ein kleiner Auszug aus den ca. 5500 Objekten von unserem Datenset zu sehen. Die einzelnen Objekte in unserem Datenset werden, abhängig vom Material, in unterschiedliche Klassen unterteilt. Beispielsweise gibt es eine Klasse, welche nur reine Stahlschrottpartikel enthält, sowie eine Kupfer-Klasse, welche auch mit Kupfer kontaminierte Stahlschrottpartikel einschließt.

Es wurde bei der Aufnahme der Daten darauf geachtet den Fokus auf klare, scharfe Videos zu legen, um eine gute Qualität der Datenbank zu gewährleisten.

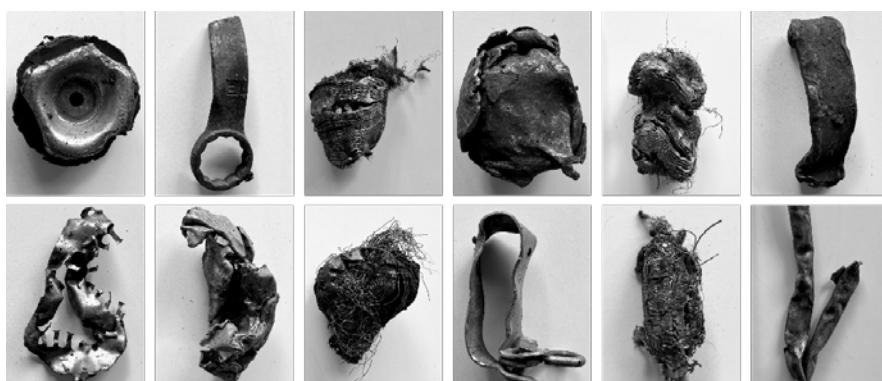


Abb. 2: Beispiele an Stahlschrottpartikeln aus dem verwendeten Datenset

4 ERGEBNISSE

Zur Evaluierung der Performance von FOST wurde sowohl eine visuelle Inspektion als auch die Berechnungszeit herangezogen. Wir haben die Segmentierungsgenauigkeit unseres Tools nicht mit den anderen den Ergebnissen anderer neuronaler Netze verglichen, da das vortrainierte Fast-SAM die Genauigkeit der Segmentierung vorgibt und diese bereits in (Zhao, et al., 2023) ausführlich analysiert wurde.

Bei der Untersuchung unseres Tools haben wir ebenso versucht Videodaten aus anderen Bereichen der Industrie zu analysieren, und haben festgestellt, dass FOST auch in weiteren industriellen Anwendungen gute Ergebnisse liefert. Auf diese wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Detaillierte Auswertungen können dem Originaldokument entnommen werden (Neubauer & Rückert, 2024).

4.1 Visuelle Inspektion

Die Ergebnisse der visuellen Inspektion zeigen, dass unser Tool in der Lage ist, Objekte in Videos mit einfachen Hintergründen sehr präzise zu annotieren. Wie in Abb. 3 dargestellt, zeigt FOST seine Fähigkeit, mehrere Objekte unterschiedlicher Klassen und Größen effektiv zu

segmentieren. Dazu werden diese in FOST farblich umrandet, wobei jede Farbe einer Klasse entspricht. Dies dient als Mittel zur erleichterten Unterscheidung von Objektklassen innerhalb der Anwendung. In dem Stahlschrott-Datenset differenzieren diese Farben zum Beispiel effektiv Partikel von unterschiedlichen Klassen wie der Stahl-Klasse oder der Kupfer-Klasse.

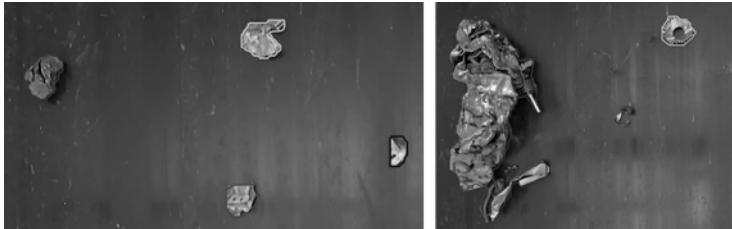


Abb. 3: Analyse der Performance von FOST durch visuelle Inspektion

FOST zeigt seine Stärke insbesondere bei der Segmentierung größerer Objekte in Videos mit einfachen Hintergründen (zum Beispiel Objekte auf einem Förderband). Herausforderungen treten bei der Annotation von Kabeln und kleineren Objekten auf, was zu einer Verringerung der Genauigkeit der Segmentierungen führen kann. Darüber hinaus ist die Leistung von der gegebenen Bildqualität abhängig. Mindere Auflösung kann die Performance signifikant einschränken.

4.2 Analyse der Berechnungszeit

Ebenfalls haben wir die benötigte Zeit analysiert, die zur Berechnung eines einzelnen Frames notwendig ist. Die für unsere Analysen verwendete Hardware war eine Nvidia GeForce RTX 4090 Grafikkarte. Wir haben festgestellt, dass die Anzahl an sichtbaren Objekten je Frame sich auf die Performance auswirkt (siehe Abb. 4). Die Zeit, die aufgewendet werden muss, um FastSAM sowie die Lucas-Kanade-Methode auszuführen erhöht sich mit der Anzahl der Objekte am Bild. Wohingegen jener Zeitaufwand zur Visualisierung für den Benutzer (Rest) nahezu gleichbleibt.

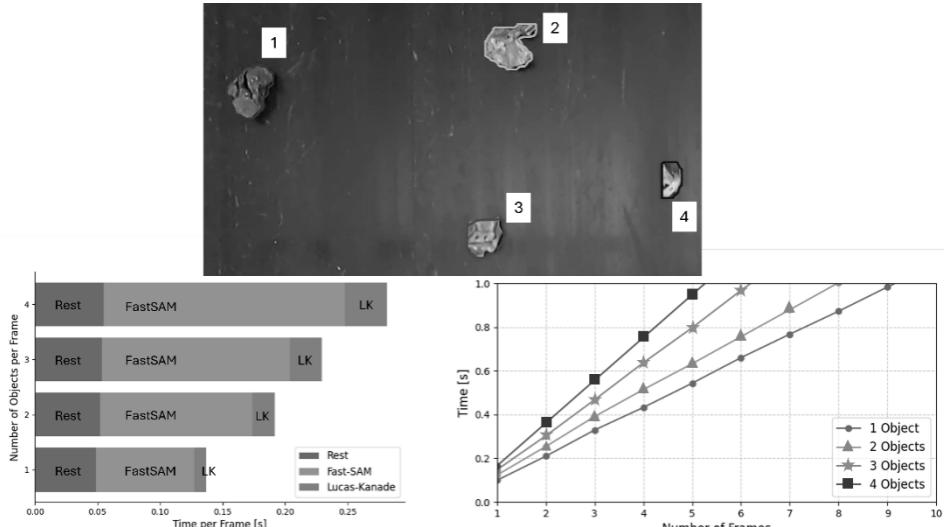


Abb. 4: Analyse der Berechnungszeit der einzelnen Iterationen von FOST

In unseren Tests erzielten wir aussagekräftige Ergebnisse, wobei die Segmentierungszeiten je nach Anzahl der im Frame segmentierten Objekte zwischen etwa 0,14 und 0,29 Sekunden pro Frame lagen. Darüber hinaus führten wir weitere Versuche mit unterschiedlichen Objektgrößen durch. Diese zeigten, dass die Größe der Objekte ebenfalls einen leichten Einfluss auf die Berechnungszeit hat. Je größer das Objekt im Bild ist, desto mehr Zeit wird für die Segmentierung benötigt. Dies ist auf die Anzahl der Pixel zurückzuführen, die das Objekt umranden. Der Aufwand zur Visualisierung größerer Polygone ist dabei etwas höher als jener für kleinere Polygone. Wie in Abb. 5 zu sehen ist, beträgt die Differenz der Segmentierungszeit zwischen den beiden Objekten im rechten Bild etwa 0,02 Sekunden pro Frame.

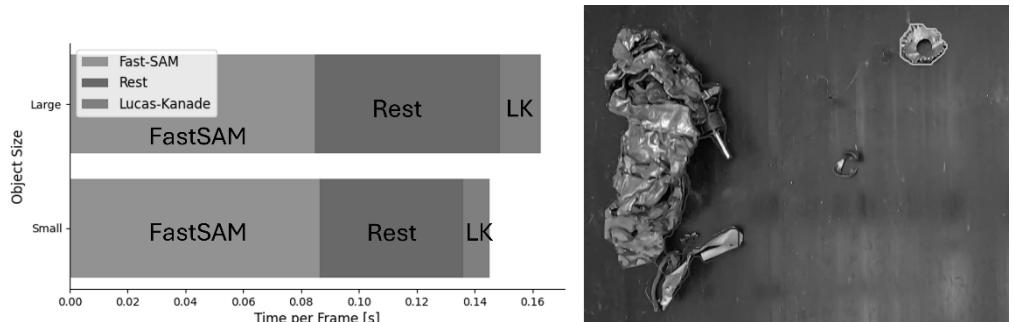


Abb. 5: Analyse der Berechnungszeit je Frame für Objekte unterschiedlicher Größe

Es ist zu beachten, dass die in dieser Arbeit angeführten Resultate mit einem von FastSAM zur Verfügung gestellten, vortrainierten Modell erreicht wurden. Dieses vortrainierte Modell bietet bereits eine solide Grundlage für die Segmentierung und Erkennung von Objekten in verschiedenen Szenarien. Allerdings zeigt unsere Erfahrung, dass die Ergebnisse durch ein gezieltes Nachtraining des Modells auf die spezifischen Objekte und Anwendungsfälle unserer Daten erheblich verbessert werden können.

Durch das erneute Training des Modells mit den eigenen Datensätzen kann das Modell lernen, die einzigartigen Merkmale und Variationen der Objekte in unserem speziellen Anwendungsbereich besser zu erkennen und zu verarbeiten. Dies führt zu einer signifikanten Steigerung der Genauigkeit und Effizienz der Segmentierung.

Darüber hinaus ermöglicht das Training auf eigenen Daten dem Modell, sich besser an die spezifischen Bedingungen und Herausforderungen der realen Umgebung anzupassen, in der es eingesetzt wird. Faktoren wie unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen, Variationen in der Objektgröße und -form sowie die Präsenz von visuellen Störungen können durch ein gezieltes Nachtraining berücksichtigt und kompensiert werden.

5 SCHLUSSFOLGERUNG UND DISKUSSION

Vor allem bei der Annotierung von Kabeln und kleineren Objekten können Herausforderungen entstehen, die zu einer ungenauerer Segmentierung führen können. Diese Schwierigkeiten sind darauf zurückzuführen, dass solche Objekte oft feine Details und komplexe Strukturen aufweisen, die eine präzise Erkennung und Abgrenzung erschweren. Zusätzlich kann die Performance von FOST durch unzureichende Bildqualität eingeschränkt sein. Unscharfe oder verrauschte Bilder beeinträchtigen die Fähigkeit des Tools, klare Grenzen zu identifizieren und exakte Masken zu generieren.

Nach sorgfältiger Überlegung und Evaluierung verschiedener Optionen entschieden wir uns für den Einsatz von FastSAM (Zhao, et al., 2023) in unserem Projekt. FastSAM erwies sich als

besonders vorteilhaft, da es deutlich kürzere Segmentierungszeiten für Bilder bietet. Dies ist besonders wichtig in industriellen Anwendungen, wo Effizienz und Geschwindigkeit entscheidend sind. Dies übertrifft die Leistung anderer Segmentierungsmodelle, wie das Segment Anything Model (SAM) (Kirillov, et al., 2023), die in solchen Szenarien weniger effizient sind.

Ein weiterer bedeutender Vorteil von FastSAM ist die Möglichkeit, das Modell mit den eigenen Daten erneut zu trainieren. Diese Funktion erlaubt es uns, die Präzision der Segmentierung erheblich zu verbessern, indem wir das Modell spezifisch auf die Charakteristika unserer Stahlobjekte abstimmen.

Unser zukünftiges Ziel ist es, eine große Anzahl verschiedener Stahlobjekte zu segmentieren und zu klassifizieren, um ein umfassendes und präzises Datenset für die intelligente Abfallerkennung zu erstellen. Dieses Datenset soll eine breite Palette an Objekttypen und -größen abdecken, um die Vielfalt der realen Abfallszenarien widerzuspiegeln. Wir planen, FastSAM durch zusätzliches Training der vortrainierten Modelle weiter zu verfeinern. Dabei möchten wir insbesondere die Auswirkungen von verschiedenen Objektgrößen, unterschiedlichen Abständen zwischen den Objekten und Überlappungen auf die Segmentierungsgenauigkeit untersuchen.

6 DANKSAGUNG

Das KIRAMET Projekt wird als Leitprojekt im Rahmen des Programms "Produktion der Zukunft" gefördert (FFG Nr.: FO999899661). Das Video- und Fotomaterial des Stahlschrotts wurde im Digital Waste Research Lab des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben aufgenommen. Die Scholz Austria GmbH fungierte als Lieferant der Schrotte und als Forschungskollaborateur in dieser Studie.

Dieses Dokument fasst die wesentlichen Ergebnisse des ursprünglichen Papers (Neubauer & Rückert, 2024) zusammen und bietet einen detaillierten Überblick über das entwickelte Tool, seine Anwendung und zukünftige Ziele im Rahmen des KIRAMET Projekts.

LITERATURVERZEICHNIS

- Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Roland, C., Gustafson, L., Xiao, T., Whitehead, S., Berg, A., Lo, W.-Y., Dollár, P., Girshick, R. (2023). *Segment Anything*. IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 3992-4003.
- Lucas, B. & Takeo , K. (1981). *An iterative image registration*. Proceedings of the, S. 674–679.
- Neubauer, M. & Rückert, E. (2024). *Semi-Autonomous Fast Object Segmentation and Tracking Tool for Industrial Applications*. IEEE International Conference on Ubiquitous Robots.
- Zhao, X., Ding, W., An, Y., Du, Y., Yu, T., Li, M., Tang, M., Wang, J. (2023). *Fast Segment Anything*. Von arXiv: <https://arxiv.org/abs/2306.12156> abgerufen.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Melanie Neubauer
melanie.neubauer@unileoben.ac.at
Chair of Cyber-Physical-Systems
Montanuniversität Leoben
cps.unileoben.ac.at
<https://www.unileoben.ac.at/kiramet/home>

Werferner Schiefer – Eine innovative, alternative mineralische Basisabdichtung zu Lehm bzw. Ton für den Deponiebau

Ewald Bückner¹ & Gerd Hofmann²

¹⁾ VA Erzberg GmbH, Sonderprojekte, Eisenerz, Österreich

²⁾ VA Erzberg GmbH, Zwischenlager Stahlwerksschlacken, Eisenerz, Österreich

KURZFASSUNG: Im Zuge der Errichtung eines Zwischenlagers für Stahlwerksschlacken am Steirischen Erzberg, das die Anforderungen einer Reststoffdeponie erfüllen musste, wurde eine innovative Alternative zu Lehm bzw. Ton als mineralische Basisabdichtung entwickelt. Dazu wurde gemeinsam mit den Ingenieurbüros IGBK GmbH (nunmehr IKK Group GmbH) und GDP-ZT GmbH, sowie dem Institut für Bodenmechanik, Grundbau und numerische Geotechnik der Technische Universität Graz ein Weg gefunden, wie aus dem im Tagbau der VA Erzberg GmbH vor Ort vorkommenden Werferner Schiefer eine der Deponieverordnung entsprechende mineralische Basisabdichtung hergestellt werden kann. Dieses innovative Basisabdichtungsmaterial hat eine Handvoll Vorteile gegenüber dem Einsatz von Lehm oder Ton im Deponiebau. Vor allem bei Böschungssystemen die steiler als 1:2 ($-26,5^\circ$) angelegt werden, ist der wesentlich einfacheren Einbau hervorzuheben.

1 WERFERNER SCHIEFER ALS MINERALISCHE BASISABDICHTUNG

Im Jahr 2020 erfolgte der Startschuss zur Errichtung eines Zwischenlagers für Stahlwerksschlacken, welches die Anforderungen einer Reststoffdeponie einhalten musste. Im Laufe der Planung wurde erkannt, dass es aufgrund der hohen Dichte der einzulagernden Stahlwerksschlacken zu einem möglichen Kriechverhalten in der mineralischen Dichtschicht und damit zum Gleiten des Deponiekörpers kommen könnte. Dieses Kriechen ist dadurch begründet, dass sich die Schichtsilikate im Ton bzw. Lehm „normal“ zur Belastung ausrichten und dadurch eine Art Gleitschicht ausbilden. Durch das in der Deponieverordnung vorgeschriebene Gefälle von mindestens 2% (Sickerwasserleitungen) könnte es dann in weiterer Folge zu einem Abgleiten des auflastenden Deponiekörpers kommen. Um das Projekt erfolgreich weiterführen zu können, musste eine Alternative zu Lehm und Ton gefunden werden.

Aufgrund der vorhandenen Basisinformationen über den Werferner Schiefer wurden weiterführende Untersuchungen durch die TU Graz durchgeführt, welche sich als vielversprechend herausstellten.



Abb. 1: Gewinnung des Werferner Schiefer im Tagbau der VA Erzberg GmbH

2 ENTWICKLUNG DES PRODUKTES

Um die Anforderungen an die im Anhang 3 der DVO 2008 vorgeschriebenen Werte zu erreichen, wurde in enger Zusammenarbeit mit den Ingenieurbüros GDP-ZT GmbH, IGBK GmbH (nunmehr IKK Group GmbH), der TU Graz und dem Fachbetrieb TERRA-MIX Bodenstabilisierung GmbH ein Verfahren erarbeitet, um mittels Vergütung den Werferner Schiefer entsprechend aufzubereiten.

2.1 Vergütung des Werferner Schiefer zur alternativen mineralischen Basisabdichtung

Der rohe Werferner Schiefer, wie er aus dem Tagbau des Steirischen Erzberg mittels Sprengung hereingewonnen wird (siehe Abb.1), muss mit einem speziellen hochwertigen Bentonit vergütet und entsprechend auf das gewünschte Größtkorn nachzerkleinert werden. Hierzu hat die Firma TERRA-MIX Bodenstabilisierung GmbH eine ihrer Bodenstabilisierungsfräse der Marke Wirtgen technisch derart verändert, um die gewünschten Zielwerte durch das Fräsen zu erreichen, wie in Abb.2 ersichtlich.

Der Herstellungsprozess umfasst unter anderem folgende Schritte:

- Herstellen einer ebenen, vorverdichteten Schüttung aus rohem Werferner Schiefer,
- Aufstreuen einer nach Rezeptur genau definierten Menge an Bentonit mittels radargesteuerten Streuwagen,
- Einfräsen und gleichzeitiges Einbringen von Wasser um den optimalen Wassergehalt (w_{opt}) einzustellen,
- Abtragen und seitliches lagern des fertig vergüteten Materials bis zum Abtransport.



Abb. 2: Einfräsen von Bentonit sowie Zerkleinerung des Werferner Schiefers auf das geforderte Größtkorn

2.2 Kennwerte der alternativen mineralischen Basisabdichtung

Die Untersuchungen am vergüteten Werferner Schiefer wurden von der TU Graz, Institut für Bodenmechanik, Grundbau und numerische Geotechnik, durchgeführt. Als Grundlage diente die DVO 2008 (BGBI. II Nr. 39/2008) sowie die ÖNORM S 2074-2:2023-07.

Aufgrund des hohen Stützkornanteil im zerkleinerten Werferner Schiefer kann der hohe Reibungswinkel ϕ' von $28,9^\circ$ sowie die Kohäsion c' von $27,7 \text{ kN/m}^2$ hervorgehoben werden.

Die Durchlässigkeit $k_f < 1,3 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ übertrifft die Anforderungen aus der Deponieverordnung. Tab.1 beinhaltet weitere Kennwerte aus den Untersuchungen.

Tab. 1: Auszug aus den Ergebnissen der untersuchten Kennwerte

Bodenart	ÖN EN 14688-1			cl' si sa Gr	
Korndichte	ÖN EN 17892-3	ρ_s	g/cm^3	2,76	
Dichte des feuchten Bodens	ÖN EN 17892-2 oder ÖN B 4414-2	ρ	g/cm^3	2,39 ¹⁾	2,39 ²⁾
Dichte des trockenen Bodens		ρ_d	g/cm^3	2,19 (99,5 % $\rho_{d,Pr}$)	
Porenanteil		n	%	21	
Porenzahl		e	1	0,26	
Wassergehalt	ÖN EN 17892-1	w	%	9,0 ¹⁾	9,1 ²⁾
Wassergehalt wie angeliefert	ÖN EN 17892-1	w_n	%	9,0	
Sättigungsgrad		S_r	1, %	95 ¹⁾	97 ²⁾
Fließgrenze	ÖN EN 17892-12	w_L	%	47	
Ausrollgrenze		w_P	%	32,5	
Bindsamkeitszahl		I_P	%	14,5	
Konsistenzzahl		I_c	1	2,6	
Schrumpfgrenze	ÖN B 4411	w_{SL}	%	24	
Einachsiale Druckfestigkeit	ÖN EN 17892-7	q_u	N/cm^2		
Reibungswinkel	ÖN EN 17892-10	ϕ'	°	28,9	
Kohäsion		c'	kN/m^2	27,7	
Restscherwinkel		Φ_r	°	-	
Optimaler Wassergehalt	ÖNORM B 4418 bzw. ÖN EN 13286-2	w_{opt}	M-%	8,3	
Procordichte		$\rho_{d,Pr}$	g/cm^3	2,20	
Wirksame Korngröße	ÖN EN 17892-4	D_{10}	mm	0,004	
Ungleichkörnigkeitszahl		C_u	1	1123	
Durchlässigkeit in der triaxialen Durchlässigkeitszelle	ÖN EN 17892-11	k_{10}	m/s	$1,3 \cdot 10^{-10}$	
Durchlässigkeit mittels Standrohr	RVS 11.06.27 ÖN B 4422-2	k_{10}	m/s		
Gehalt an organ. Anteilen	ÖN B 4424	$c_{org,0,00}$	%	0,8	
Wasseraufnahme nach Enslin	RVS 11.06.26	Q_E	Gew-%	118	

¹⁾ Daten der Probe beim Einbau in die triaxiale Durchlässigkeitszelle

²⁾ Daten der Probe beim Ausbau aus der triaxialen Durchlässigkeitszelle

3 BEISPIEL HERSTELLUNG EINES ZWISCHENLAGERS FÜR STAHLWERKSSCHLACKEN AM STEIRISCHEN ERZBERG

Aufgrund des großen Stützkornanteils und der homogenen Kornverteilung, stellt der Einbau mittels Kettenbagger, Schubraupe und Walze selbst bei einer Böschungsneigung von 2:3 (~ 33°) kein Problem dar, wie in Abb.3 ersichtlich. Die Kettenbagger und Schubraupe wurden mittels GPS-System gesteuert, um die erforderliche Einbaustärke von 25 cm je Lage einzuhalten. Die notwendige Verdichtung des Materials wurde durch eine „normale“ Straßenbauwalze, welche an einem Windensystem angehängt wurde, durchgeführt. Gesamt wurden 2 x 25 cm künstliche geologische Barriere sowie 3 x 25 cm mineralische Basisabdichtung hergestellt.



Abb. 3: 3-lagiger Einbau des vergüteten Werferner Schiefer bei ~33° Böschungsneigung

4 ZUSAMMENFASSUNG

Das neue alternative mineralische Basisabdichtungsmaterial stellt eine innovative Entwicklung und gewissermaßen neuen Stand der Technik dar. Einerseits ist durch den großen Anteil an Stützkorn die Scherfestigkeit wesentlich höher als bei üblicherweise eingesetztem Lehm oder Ton, was vor allem die Böschungsstabilitäten verbessert. Andererseits ermöglicht das Material das unkomplizierte Herstellen von Dichtschichtlagen im Deponiebau, da dieses im Wesentlichen wie handelsübliches Grädermaterial eingebaut werden kann. Ein großer Vorteil liegt in der geographisch zentralen Lage des Rohstoffvorkommens in Österreich, sowie die großen Kapazitäten der Produktionsstätte in Eisenerz.

KONTAKT

Ewald Bückner, MBA
ewald.bueckner@vaerzberg.at
+43 (0) 664 61 24 894
Baurohstoffe / Sonderprojekte
VA Erzberg GmbH
www.vaeerzberg.at

Improvement of Polymer Segmentation by X-ray Phase Contrast Computed Tomography

Jonathan Glinz¹, Sarah Heupl¹, Johann Kastner¹ & Sascha Senck¹

¹⁾ University of Applied Sciences Upper Austria, Research Group Computed Tomography, Wels, Austria

ABSTRACT: The escalating global plastic waste generation necessitates efficient recycling methods for polymers. A major challenge in this context is the separation of individual materials from a mixture of polymers to obtain a high-quality recycled product. This paper presents an experimental study comparing X-ray phase contrast imaging (XPCI) computed tomography with standard attenuation-based X-ray computed tomography for the characterization of four polymer materials (PMMA, POM, PTFE, PP). XPCI, which leverages the refraction of X-rays by a specimen, offers high robustness against beam hardening effects and high sensitivity for low density and low atomic number materials, such as polymers. The experiments, conducted on a CT system with an integrated Talbot-Lau grating interferometer for phase extraction, demonstrate that XPCI can provide contrast-to-noise ratios (CNRs) more than twice as high in the polymer materials compared to conventional attenuation contrast imaging. Specifically, the CNR between PMMA and POM could be significantly increased from 2.6 to 3.6, possibly allowing an easier segmentation. The findings presented in this work suggest that XPCI is a promising method for the characterization of polymer materials in recycling processes.

1 INTRODUCTION

The escalating demand for polymer materials worldwide is leading to an unprecedented increase in global plastic waste generation. It is estimated that the annual plastic waste generation will surge from 260 million tons in 2016 to an alarming 460 million tons by 2030 (Hundertmark et al. 2018). This rapid growth in plastic waste is exacerbating the already pressing issue of environmental pollution. As a result, the recycling or reuse of polymers in circulation has become a critical imperative to prevent the increasing release of pollutants into the environment and to reduce the associated environmental impact (Schyns & Shaver 2021).

Polymer recycling typically involves the complex process of separating individual materials from a mixture of polymers. This separation is often achieved using sensor-based sorting methods that rely on visual identification features such as color, shape, brightness, and fluorescence. These features can be analyzed using a range of techniques, including optoelectronic, spectroscopic, electromagnetic, and X-ray methods (Martens & Goldmann 2016). However, most of these methods analyze only the surface of a material, which can lead to false identification, particularly in the case of coated materials.

X-ray inspection is one method that provides a three-dimensional representation of a waste stream which can also significantly increase the probability of detection of contaminants like metal parts or other non-polymer materials, that negatively impact the quality of the recycled polymer. Conventional X-ray methods utilize the differences in the attenuation of X-rays, which can provide high contrast between metallic materials and polymers. However, these methods usually offer only low contrast between different types of polymers, making the reliable separation of individual polymer materials challenging.

In this context, X-ray phase contrast imaging (XPCI) emerges as a promising alternative. Unlike conventional X-ray methods, XPCI does not rely on the attenuation of X-rays but on their refraction caused by a specimen. Given its relative high robustness against beam hardening effects (Glinz et al. 2022) and high sensitivity for low density and low atomic number materials (Glinz et

al. 2021, Mayo & Endrizzi 2018), XPCI could potentially revolutionize the characterization of polymer materials in recycling processes.

In this paper, we present an experimental study comparing XPCI computed tomography with standard attenuation-based X-ray computed tomography for the characterization of four polymer materials: PMMA, POM, PTFE, and PP. Our aim is to assess the potential of XPCI as a more reliable method for the separation of individual polymer materials.

2 MATERIALS AND METHODS

A phantom specimen including four polymers (PMMA, POM, PTFE, PP) and H₂O as a reference material has been assembled from primary raw material. A photograph as well as a schematic cross-section through the phantom is shown in Fig. 1.

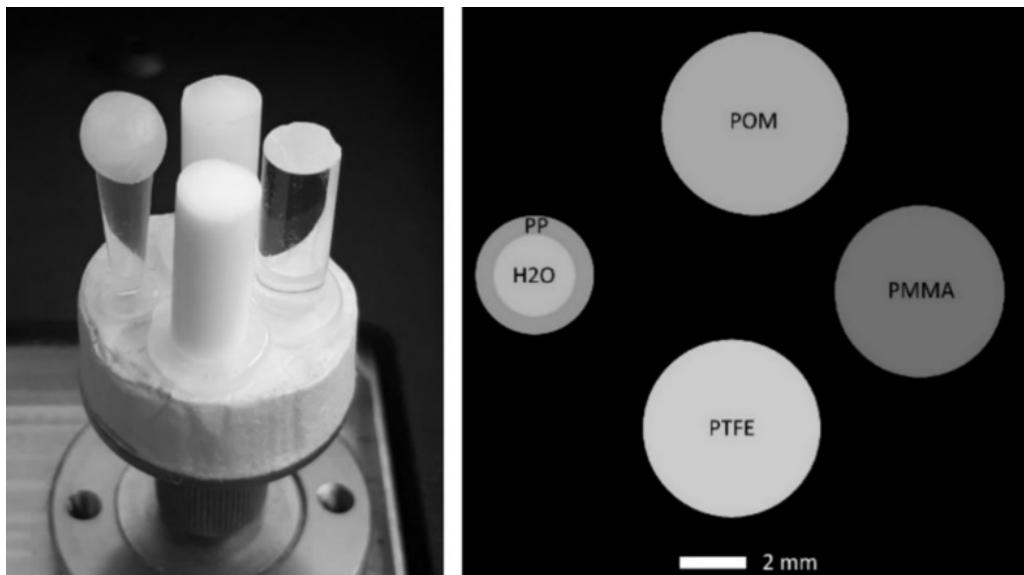


Fig. 1: Photograph of the material phantom (left) and schematic cross-section with materials indicated (right)

XPCI measurements were performed on a SkyScan 1294 desktop system (Bruker microCT N.V., Belgium) which includes a Talbot-Lau Grating Interferometer for the extraction of X-ray phase contrast information (Pfeiffer et al. 2006). The interferometer is formed by three gratings (two absorption and one phase grating), with periods of 4.8 μm each, positioned in a symmetric setup. For the extraction of phase contrast, a phase-stepping procedure (Momose et al. 2003) has to be performed by a stepwise lateral movement of one of the gratings over one period for each projection image recorded. The phase contrast (PC) modality thereby is recorded simultaneously and perfectly aligned with attenuation contrast (AC) data.

In this way, a computed tomography scan consisting of 1,300 projection images over 360° rotation of the specimen was recorded at 40 kV acceleration voltage, 1,200 μA tube current and 0.5 mm aluminum pre-filter applied. At 500 ms integration time for each projection image and an averaging over 4 images, a voxel resolution of 22.8 μm was achieved during a total scan time of 4.5 hours. The projection image data subsequently was reconstructed by a filtered back projection algorithm using the software X-AID (MITOS GmbH, Germany). Subsequently, the polymer materials were segmented by global thresholding of the volume data.

For a quantitative comparison of the contrast between the polymers, the contrast-to-noise ratio (CNR) for each polymer material was calculated according to Eq.1:

$$CNR = \frac{|\mu_m - \mu_b|}{\sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_b^2}} \quad (1)$$

where μ_m and μ_b are the mean intensity and σ_m and σ_b their standard deviations measured in the polymer materials and background (air) respectively. For completeness, the CNR for water was evaluated as well. Furthermore, because of the rather low contrast and for better comparability the CNR between POM and PMMA as well as PP and PMMA was evaluated.

3 RESULTS AND DISCUSSION

From the histogram data shown in Fig. 2 it is obvious that the contrast between PTFE and other polymers is rather high. However, the discrimination between PP, PMMA, and POM poses more difficulties, especially if artifacts, e.g., caused by beam hardening, are present in the image data. Artifacts like those are also the reason why the PTFE is spread out over a rather wide range of grey values in the AC compared to the PC, as they are causing variances in an otherwise homogeneous material/specimen. Additionally, the contrast between polymers and the background (air) is significantly higher in the PC which potentially allows an easier detection and segmentation of defects like cracks or porosity in a polymer component.

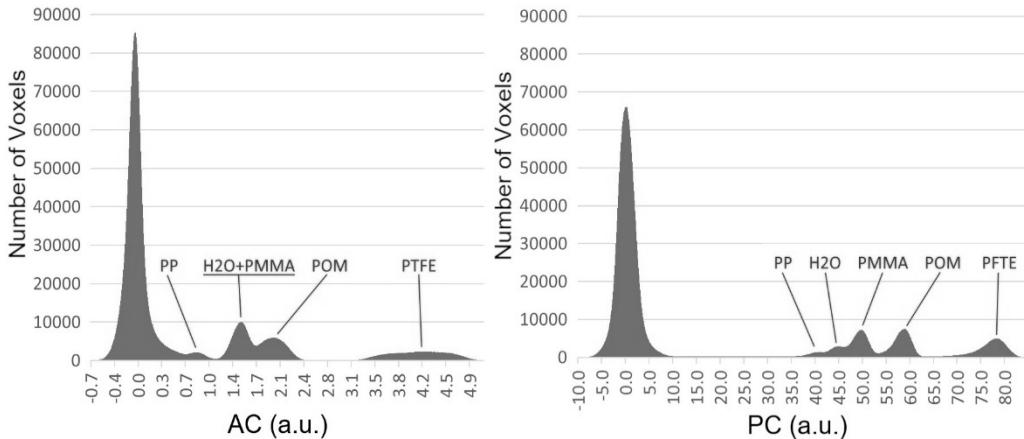


Fig. 2: Histograms of standard attenuation contrast (left) and phase contrast CT data (right). Due to the increased contrast of the XPCI measurement, it is possible to distinguish the H₂O and PMMA peaks as well as there is increased contrast between POM and PMMA

Evaluation of the image data revealed, that XPCI can provide contrast-to-noise ratios more than twice as high in the polymer materials compared to conventional AC imaging (see Fig. 3). Consequently, by use of phase contrast imaging, the CNR between PMMA and POM could be significantly increased from 2.6 to 3.6, allowing for an easier separation of the two materials. For the discrimination of PMMA and PP on the other hand, phase contrast imaging could increase the CNR only marginally from 4.1 to 4.3.

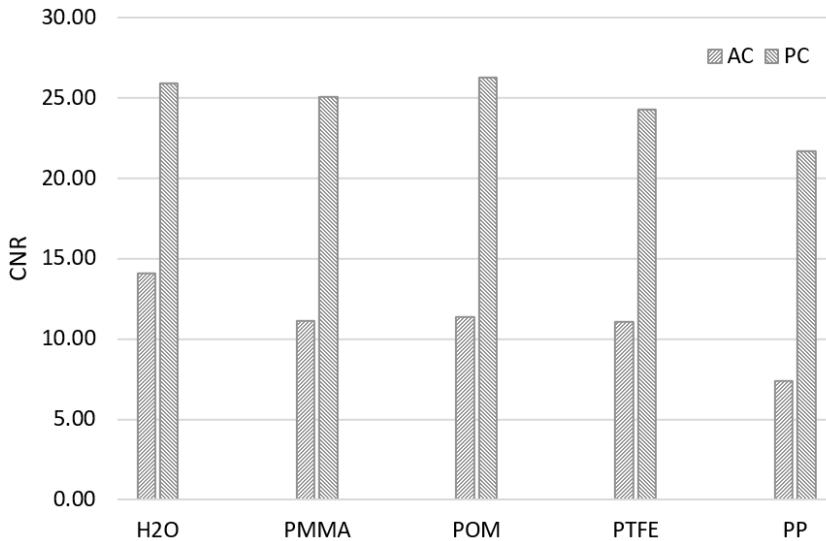


Fig. 3: CNR values between materials and background (air) for AC and PC imaging

However, as could be seen from the segmentation in Fig. 4 c) and d), the segmentation of POM significantly improved.

The resulting slice images of the attenuation contrast and phase contrast computed tomography scans are shown in Fig. 4 including the color-coded segmentation of the different materials. In AC a differentiation between H₂O and PMMA is impossible because of the virtually nonexistent contrast. Additionally, low contrast between POM and PMMA partially leads to a wrong segmentation of POM as PMMA. The PC data in comparison enables differentiation between PMMA and H₂O as well as improved segmentation between POM and PMMA. In PC, Erroneous segmentation appears mostly in border regions because of partial volume effects (Kastner & Heinzl 2019). However, this is a commonly encountered phenomenon during the inspection of XCT data and also present in AC.

Furthermore, beam hardening effects cause an artificial increase in grey values in the AC visible most prominent in and between the POM and PTFE samples because those are the materials with highest X-ray attenuation. This leads to an inhomogeneous grey value distribution within those materials, e.g., noticeable by a widening of the PTFE peak in the AC histogram shown in Fig. 2. Additionally, those beam hardening effects cause the central region of the image background (air) in Fig. 4 a) and c) to reach a similar grey value as the PP. Consequently, this central region of air was wrongly segmented as PP as well. The phase contrast modality on the other hand is comparably robust to beam hardening effects. However, ring artifacts are more pronounced in PC as can be seen in Fig. 4 b), which is why additional artifact correction might be necessary to improve image quality.

Another advantage of phase contrast imaging is that, when calibrated to a known material, e.g., H₂O, the measured signal is proportional to the electron density of the materials. This means in a subsequent step the effective atomic number of the materials can be evaluated from the data as recently demonstrated by (Birnbacher et al. 2018). Furthermore, since computed tomography and especially Talbot-Lau grating interferometry are rather time-consuming techniques, the extraction of information from only two-dimensional radiographic images could significantly improve efficiency of the presented methods. However, this will be subject to future work.

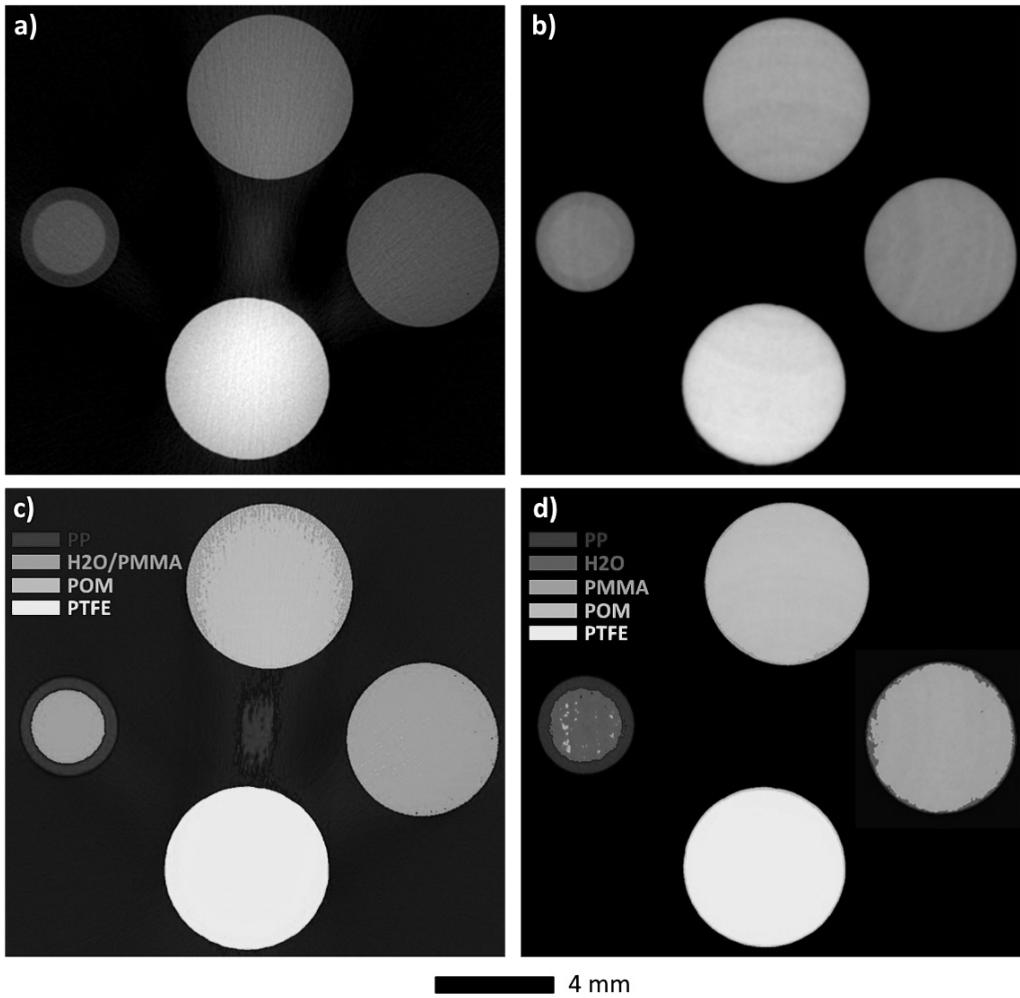


Fig. 4: Exemplary CT slice images of AC and PC are shown in a) and b) respectively. Corresponding segmentations of materials are shown in c) and d). A differentiation of H₂O and PMMA is not possible in AC as well as beam hardening effects causing streak artifacts between PTFE and POM are visible

4 ACKNOWLEDGEMENTS

This work was financed by the project “HyperMAT”, funded by the European Just Transition Fund and the Upper Austrian Government.

REFERENCES

- Birnbacher, L., Willner, M., Marschner, M., Pfeiffer, D., Pfeiffer, F., & Herzen, J. (2018). Accurate effective atomic number determination with polychromatic grating-based phase-contrast computed tomography. *Optics Express*, 26(12), 15153–15166. <https://doi.org/10.1364/oe.26.015153>
- Glinz, J., Šleicht, J., Kytyř, D., Ayalur-Karunakaran, S., Zabler, S., Kastner, J., & Senck, S. (2021). Phase-contrast and dark-field imaging for the inspection of resin-rich areas and fiber orientation in non-crimp vacuum infusion carbon-fiber-reinforced polymers. *Journal of Materials Science*, 56(16), 9712–9727. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05907-0>

- Glinz, J., Zabler, S., Kastner, J., & Senck, S. (2022). Metal Artifacts in Attenuation and Phase Contrast X-Ray Microcomputed Tomography: A Comparative Study. *Experimental Mechanics*, 62(5), 837–847. <https://doi.org/10.1007/s11340-022-00835-9>
- Hundertmark, T., Mayer, M., McNally, C., Simons, T., & Witte, C. (2018, December). How plastics waste recycling could transform the chemical industry. *McKinsey & Company*.
- Kastner, J., & Heinzl, C. (2019). X-ray tomography. In *Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation* (pp. 1095–1166). Springer, Cham.
- Martens, H., & Goldmann, D. (2016). Manuelle und mechanische Verfahrenstechniken zur Aufbereitung von Abfällen und zur Schadstoffentfernung. In *Recyclingtechnik* (pp. 27–68). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-02786-5_3
- Mayo, S., & Endrizzi, M. (2018). X-Ray Phase Contrast Methods. In I. Nathan & N. Meyendorf (Eds.), *Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation* (pp. 1–42). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30050-4_54-1
- Momose, A., Kawamoto, S., Koyama, I., Hamaishi, Y., Takai, K., & Suzuki, Y. (2003). Demonstration of x-ray Talbot interferometry. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters*, 42(7 B). <https://doi.org/10.1143/JJAP.42.L866>
- Pfeiffer, F., Weitkamp, T., Bunk, O., & David, C. (2006). Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources. *Nature Physics*, 2(4), 258–261. <https://doi.org/10.1038/nphys265>
- Schyns, Z. O. G., & Shaver, M. P. (2021). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communications*, 42(3). <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>

CONTACT

Dr. Jonathan Glinz
jonathan.glinz@fh-wels.at
+43 50804-44407
Research Group Computed Tomography
University of Applied Sciences Upper Austria
www.3dct.at

Measuring the Flow Properties of Secondary Plastics

Ivan Kibet^{1,2} & Juergen Wieser¹

¹⁾ Hochschule Darmstadt, Institute of Plastics Engineering (ikd), Darmstadt, Germany

²⁾ Hochschule Darmstadt, Doctoral Centre for Sustainability Sciences (pznw), Darmstadt, Germany

ABSTRACT: Recycling of plastics, particularly in high-value applications, is essential for sustainable resource management and achieving climate targets. A critical challenge lies in developing robust processing methods that ensure consistent feeding of secondary raw materials into recycling machinery. After separation, sorting and cleaning, secondary plastics exist as irregularly shaped particles such as ground material, flakes or fibre agglomerates. Their complex flow characteristics defy conventional theoretical assessments and design calculations, necessitating reliance on empirical trial-and-error approaches. This often leads to inefficient equipment design or configuration, frequent operational interruptions and protracted development times. This study builds on practical insights gained through expert knowledge based on previous project applications to systematically investigate the flow and conveying behaviour of ground secondary plastics material.

1 INTRODUCTION

To improve the quality and uptake-rate of secondary plastics in the market, some technological challenges along the value chain must first be addressed. Similar to the processing of virgin plastic materials, the co-rotating twin-screw extruder is the standard compounding equipment for secondary plastics as well. However, the plastics recycling process also involves additional prior operations such as, separation, sorting, cleaning and comminution (grinding, shredding etc.). However, during comminution, secondary plastics acquire a heterogenous particle shape- and size distribution as is the case with regrinds, flakes and fibre agglomerates. This makes secondary plastics very difficult to convey because they defy conventional theoretical considerations of bulk plastic materials flow behaviour and associated design calculations. Apart from the well documented challenge of impurities arising from inaccurate separation, the "unpredictable" flow behaviour of secondary plastics also affects the process efficiency and product quality negatively (Kohlgrüber et al. 2021, Niessner 2022, Carson & Petro 2005; Markarian 2004).

2 STATUS QUO

While there are a few characterisation methods available for secondary plastics, most are focussed on quantifying the amount of impurities within a recycled material. In designing process equipment such as hoppers and silos conventional methods such as the measurement of: bulk density, tapped density, angle of repose, critical orifice diameter, particle size distribution and various characteristic values from shear cell tests are used (Aulton & Taylor 2013, Schulze 2021). All design considerations are based on free-flowing quasi-spherical particles which is far from the reality of secondary plastic particle size- and shape distributions. It is common for comminuted secondary plastic materials to be subjected to an extra processing step, where they are melted and regrinded into pellets of a narrow shape- and size distribution. To avoid the extra processing step, trial -and -error methods have to be relied upon, due to a lack of theoretical physical-mathematical models that accurately describe the flow behaviour of such materials. While trial-and-error methods have worked out well in the past, the demand for higher recycling efficiency is rising. Furthermore, this leads to an unsustainable over-reliance on already scarce highly experienced personnel.

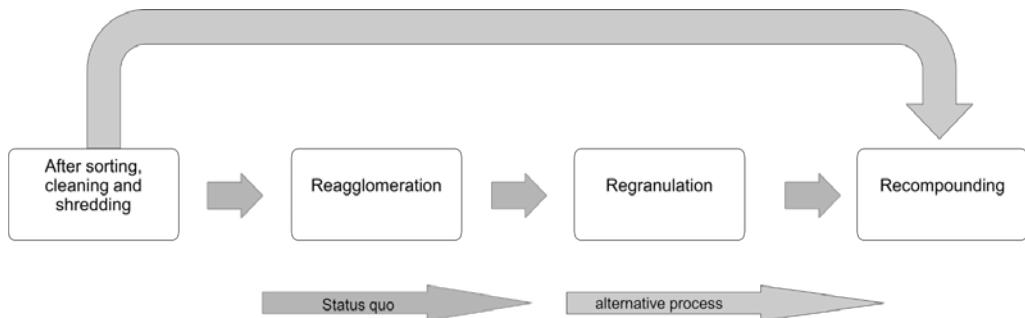


Fig. 1: Status quo process steps of secondary plastics

3 MATERIALS AND METHODS

3.1 Materials

Four different materials samples have been investigated in this study, including a Polylactic acid (PLA) virgin material, a Polyoxymethylene (POM) virgin material as well as their respective reground materials. Their particle morphologies and size distribution have been characterised as summarized in table 1.

Tab. 1: Particle morphologies and size distributions

Property	POM sec	POM virgin	PLA sec	PLA virgin
D50 Particle Size (μm)	5980	3975	7530	4009
Particle shape	irregular	lenticular	irregular	lenticular

3.2 Experiments

Dynamic flow characteristics of the materials were measured using an FT4 universal powder tester from Freeman Technology. The FT4 measures the flow resistance of a bulk material while it is in motion. A precision blade rotates and moves downwards through the bulk material to create an accurate flow pattern. This causes thousands of particles to interact or flow relative to each other. In addition to the dynamic methods, it offers additional measurement options. These include a shear cell to measure the shear strength of powders and a wall friction kit to quantify the behaviour of the powder on the wall of the process material. Further accessories are available to measure bulk material properties such as density, compressibility and air permeability. Further details of the FT4 methodologies can be found in other literatures (Freeman & Fu 2008).

All samples were preconditioned before each measurement. However, due to a recurring torque and force overload issue, the standard test was modified to cater for the larger particles of the materials investigated. The lower height was increased to 6mm. Furthermore, the 48mm blade was used in combination with the 62mm split vessel.

4 RESULTS AND DISCUSSIONS

The basic flowability energy for the POM secondary material is with $1640,3 \pm 4,36$ mJ higher than the POM virgin material at $412,7 \pm 4,80$ mJ. This is largely due to mechanical interlocking arising from the irregular shape of the constitutive bulk solid particles. The same phenomenon is observed with the PLA material whereby the secondary material has a higher Basic Flowability Energy (BFE) value with a similar difference to the virgin material of 1296.7 mJ. A similar trend is observed with the specific energy values. Higher values are observed for the secondary materials

indicating that more energy is required to set the materials into motion. Data on the flow rate index indicates that all (virgin and secondary) materials exhibited a pseudoplastic flow behaviour (<1). The same observation applies to the stability index values.

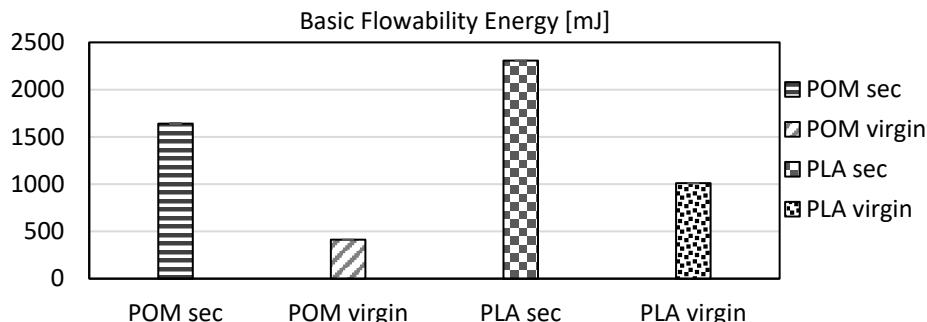


Fig. 2: Basic flowability energy in mJ

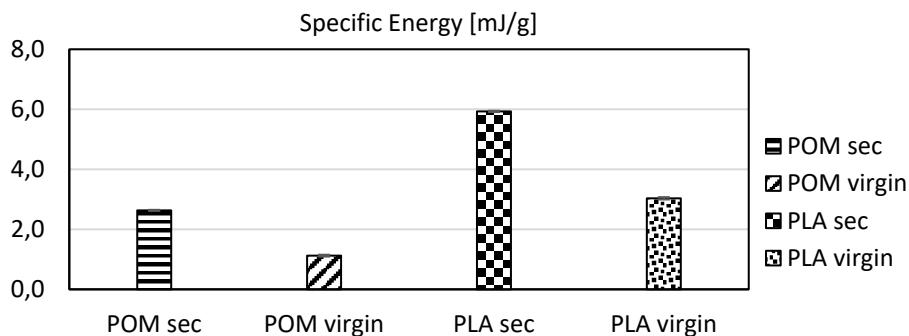


Fig. 3: Specific energy in mJ/g

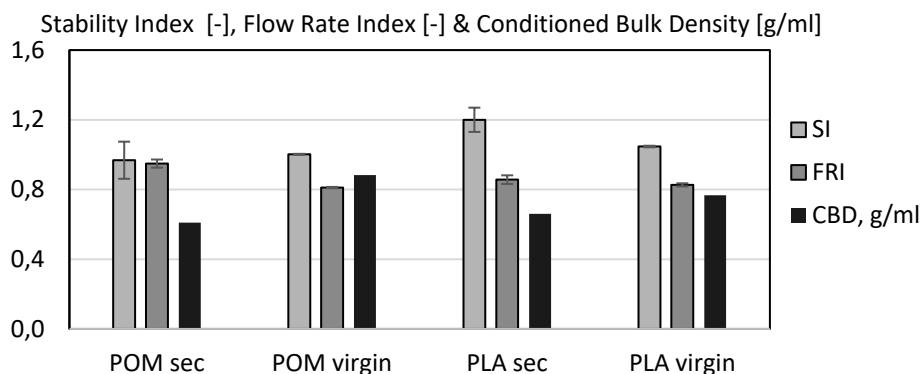


Fig. 4: Stability Index, Flow Rate Index and Conditioned Bulk Density

5 OUTLOOK

With the feasibility of measuring the flow properties of secondary plastics confirmed, the next step of correlating the data collected to process conditions will follow. As a next step, the same materials will be subjected to dosing experiments to assess the achievable accuracies and constancies based on the NAMUR NA 40 Worksheet of 2006 on the dosing accuracy of continuous scales.

REFERENCES

- Aulton, Michael E.; Taylor, Kevin (2013): Aulton's pharmaceutics. The design and manufacture of medicines. 4th edition / edited by Michael E. Aulton and Kevin M.G. Taylor. Edinburgh: Churchill Livingstone/Elsevier.
- Carson, John. W.; Petro, Greg (2005): How to design efficient and reliable feeders for bulk solids. Jenike & Johanson Inc., Flow of Solids Newsletters. Online verfügbar unter <https://www.web-tech.com.au/wp-content/uploads/Design-efficient-feeders.pdf>, zuletzt geprüft am 01.12.2022.
- Freeman, R.; Fu, Xiaowei (2008): Characterisation of powder bulk, dynamic flow and shear properties in relation to die filling. In: *Powder Metallurgy* 51 (3), S. 196–201. DOI: 10.1179/174329008X324115
- Kohlgrüber, Klemens; Bierdel, Michael; Rust, Harald (2021): Plastics Compounding and Polymer Processing. Fundamentals, Machines, Equipment, Application Technology. Cincinnati, Ohio: Hanser Publications (Hanser eLibrary). Online verfügbar unter <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9781569908389>.
- Markarian, Jennifer (2004): Dosing and blending - getting the right mix. In: *Plastics, Additives and Compounding* 6 (6), S. 26–31. DOI: 10.1016/S1464-391X(04)00302-2.
- Niessner, Norbert (Hg.) (2022): Recycling of plastics. Hanser Publications. Munich: Hanser Publishers.
- Schulze, Dietmar (2021): Powders and Bulk Solids. Cham: Springer International Publishing.

CONTACT

Ivan Kibet, M.Sc.
Ivan.kibet@h-da.de
+49 6151 533 60169
Institute of Plastics Engineering (ikd)
Hochschule Darmstadt University of Applied Sciences/ EUT+
www.fbmk.h-da.de

Untersuchungen zur strukturellen Verwertung von geschredderten Windradflügeln in Bulk Moulding Compounds

Bianca Purgleitner¹, Karin Krenn¹ & Christoph Burgstaller^{1,2}

¹⁾ Transfercenter für Kunststofftechnik GmbH, Composites, Wels, Österreich

²⁾ Fachhochschule Oberösterreich GmbH, Research Center Wels, Wels, Österreich

KURZFASSUNG: Das Recycling von Windradflügeln und glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) im Generellen wird aufgrund steigender Abfallströme und fehlender Entsorgungsstrategien ein immer größer werdendes Problem. In dieser Arbeit wird das mechanische Recycling von GFK aus ausgedienten Windkraftanlagen untersucht. Dafür wurden geschredderte Windradflügel in unterschiedliche Fraktionen gesiebt, mit verschiedenen Epoxidharzsystemen zu Platten verpresst und daraus Probekörpern hergestellt. An diesen wurden Zug- und Biegeeigenschaften, sowie Faservolumsgehalt (FVG) und Bruchbild untersucht. Neben dem Einfluss der Partikelgröße und dem Harzsystem wurde die Richtungsabhängigkeit der entnommenen Probekörper und die Verbundqualität evaluiert.

Es zeigte sich, dass Verbunde mit kleineren Partikelgrößen die höchsten Werte bei der Zugfestigkeit erreichen. Die Entnahmerichtung der Probekörper hat keinen signifikanten Einfluss auf die Zug- und Biegeeigenschaften. Weitere Untersuchungen zur Optimierung der Festigkeitswerte werden durchgeführt.

1 EINLEITUNG

Rotorblätter von Windenergieanlagen sind zum Großteil aus glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK) Komponenten gefertigt (Beauson, Laurent, Rudolph, & Pagh Jensen, 2022). Viele davon erreichen bereits ihr Lebensende. Zusätzlich werden immer mehr Windkraftanlagen gebaut, um die Vorgaben der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2009/28/EG) zu erfüllen. Bis heute gibt es für die enormen GFK-Abfallströme keine adäquate Recyclingmethode im Sinne der Kreislaufwirtschaft, was eine Entsorgungsproblematik darstellt, da ausgediente Windradflügel bisher noch verbrannt oder auf Deponien gelagert werden (Lichtenegger, Rentzelas, Trivyza, & Siegl, 2020).

Von aktuell bekannten Recyclingmethoden (Liu, Meng, & Barlow, 2022) ist das mechanische Recycling nach wie vor das einzige wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Verfahren (Paulsen & Enevoldsen, 2021). Ziel dieser Arbeit ist es, die mechanischen Kennwerte unterschiedlicher Harzsysteme in Kombination verschiedenen Partikelgrößen geschredderter Windradflügel zu ermitteln und daraus die Einflussfaktoren zu identifizieren.

2 MATERIAL & METHODEN

Die geschredderten Windradflügel als Ausgangsmaterial wurden zur Vereinheitlichung in drei Siebfraktionen getrennt (Abb. 1) und der jeweilige Aschegehalt mittels Makro-TGA bestimmt (ISO 3451, Leco TGA 701). Zur Ermittlung der grundsätzlichen Eignung für eine neue Anwendung, wurden diese Fraktionen mit jeweils drei unterschiedlichen Harzen (Tab. 1) in einer Heizpresse (100 bar, Wickert) zu 100x100x4 mm Platten verpresst und daraus 8 Stück 100x10 mm Probekörper mit einer Kreissäge Diadisc 4200 (Mutronic) zugeschnitten. In Anlehnung an die jeweilige Norm wurden davon 4 Stück für Zugprüfung (nach ISO 527-4, 20kN Universalprüfmaschine Zwick/Roell) und 4 Stück für Biegeversuche (ISO 14125, 10kN Universalprüfmaschine Zwick/Roell) verwendet. Die Proben für die Zugprüfung wurden im Einspannbereich mit Glasfaseraufleimern versehen.

	Ausgangsmaterial	< 355 mm	355 mm – 1,4 mm	1,4 - 2,8 mm
Aussehen				
Aschegehalt	54,72 %	69,84 %	60,02 %	51,39 %
	$s = 0,85 \%$	$s = 0,1 \%$	$s = 2,16 \%$	$s = 2,16 \%$

Abb. 1: Fotos und Partikelgrößen der verwendeten Fraktionen der geschredderten Windradflügel mit dem ermittelten Aschegehalt.

Tab. 1: Eigenschaften der verwendeten Harzsysteme

Bezeichnung		Dichte bei 25°C [g/cm³]	Viskosität bei 25°C [mPas]	Mischungsverhältnis nach Gewicht
Harz 1	Harz	1,14	610	100
	Härter	0,95	< 10	30
Harz 2	Harz	1,15-1,17	10.000 – 12.000	100
	Härter	0,92 – 0,94	200 – 400	32
Harz 3	Harz	1,16-1,18	5.800 – 8.200	100
	Härter	0,92 – 0,94	200 – 400	32

Für die Überprüfung der Richtungsabhängigkeit und den Vergleich mit normgerechten Probekörpern wurden Platten mit 250x350x4 mm hergestellt und daraus je 10 Stück 100x10 mm Probekörper (5 für Zug- und 5 für Biegeprüfung) in längs, quer und schräger (45°) Richtung und einmal 6 Stück in normkonformer Größe (250x25 mm) zugeschnitten.

An den gebrochenen Probekörpern der Zugprüfung wurde zum einen der Faservolumsgehalt (FVG) mittels Makro-TGA (EN 2564, Leco TGA 701) bestimmt, zum anderen wurden Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM, Tescan Vega) an einer Bruchfläche gemacht.

3 ERGEBNISSE

Beim Einfluss der Partikelgröße auf die mechanischen Eigenschaften zeigte sich bei allen verwendeten Harzsystemen eine Abnahme der Zugfestigkeit mit steigender Partikelgröße (Abb. 2). Dies lässt darauf schließen, dass die Partikel im Verbund nicht ausgerichtet, sondern zufällig verteilt sind und größere GFK Reste, die quer zur Zugrichtung liegen, eine größere Schwachstelle bilden. Dieser Effekt ist bei der Feinfraktion geringer, was auch an den glatteren Bruchflächen zu sehen ist. Der E-Modul bleibt beim ersten und zweiten Harzsystem mit unterschiedlichen Partikelgrößen annähernd gleich und zeigt beim dritten Harzsystem keinen linearen Zusammenhang. Bei der Fraktion <0,355 mm wurde der höchste Aschegehalt gemessen, was auf einen hohen Glasfaseranteil in diesem Verstärkungsmaterial schließen lässt. Auch der an den Probekörpern gemessene FVG war bei diesem Material am höchsten. Generell korrelieren die Werte des FVG gut mit den ermittelten Festigkeitswerten.

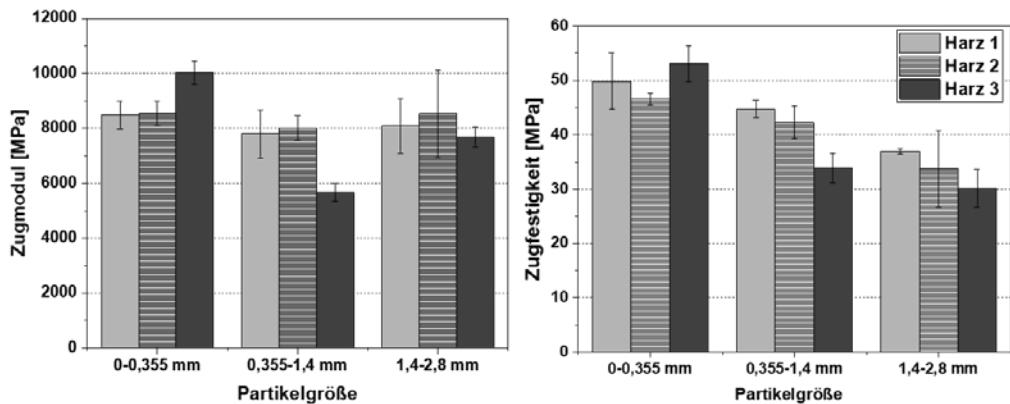


Abb. 2: Zugmodul (links) und Zugfestigkeit (rechts) der gefertigten BMC Platten in Abhängigkeit von der Fraktionsgröße des geschredderten Windradflügel Materials

Die Ermittlung der Richtungsabhängigkeit ergab ein annähernd isotropes Verhalten der Kennwerte über eine 250x350 mm große BMC Platte. Das Material mit den feineren Korngrößen zeigte auch hier eine bessere Performance im Zug- und Biegeversuch.

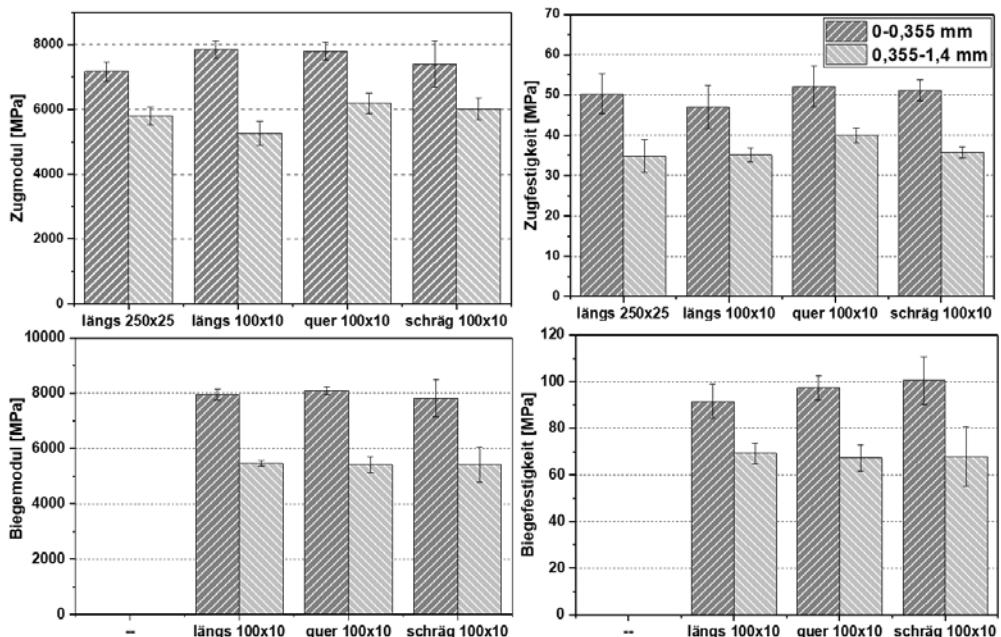


Abb. 3: Zug- (oben) und Biegekennwerte (unten) in Abhängigkeit von der Probengröße und Entnahmerichtung

In den REM-Aufnahmen der Bruchfläche der Zugproben zeigte sich eine mäßig gute Benetzung der Fasern mit den neuen Harzsystemen (Abb. 4). Diese soll in weiteren Untersuchungen verbessert werden, um so die die Festigkeitskennwerte zu erhöhen und ein breiteres Anwendungsspektrum zu erschließen.

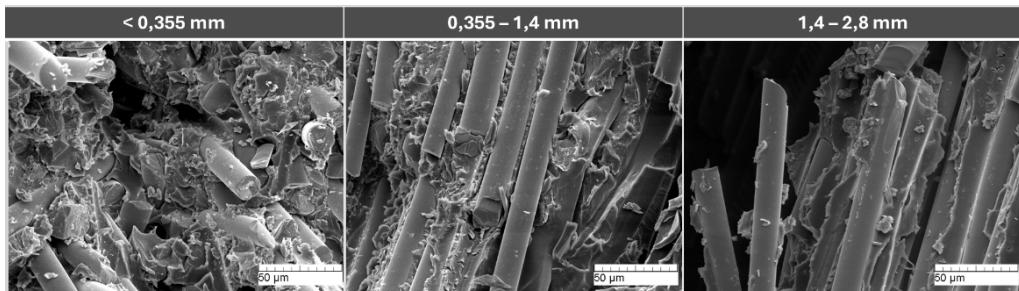


Abb. 4: REM Aufnahmen in 1000facher Vergrößerung an Bruchflächen von BMC Zugprüförper mit unterschiedlichen Fraktionsgrößen

4 ZUSAMMENFASSUNG

Das Recyclingmaterial aus geschredderten Windradflügeln lässt sich gut verarbeiten. Eine Fraktionierung in verschiedene Siebstufen ist sinnvoll, um Chargenschwankungen zu verringern und die Reproduzierbarkeit der mechanischen Eigenschaften zu gewährleisten. Kleinere Partikeln im Verbund liefern bessere Festigkeitswerte. Partikelgrößen bis 1,4 mm zeigen ein isotropes Materialverhalten. Die Anbindung des Harzsystems an die Fasern aus den geschredderten Windradflügeln soll für die weitere Anwendung noch verbessert werden, um so die Festigkeitskennwerte weiter zu steigern.

LITERATURVERZEICHNIS

- Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D., & Pagh Jensen, J. (2022). The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Lichtenegger, G., Rentizelas, A. A., Triviza, N., & Siegl, S. (2020). Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050. *Waste Management*.
- Liu, P., Meng, F., & Barlow, C. (2022). Wind turbine blade end-of-life options: An economic comparison. *Resources, Conservation & Recycling*.
- Paulsen, E., & Enevoldsen, P. (2021). A Multidisciplinary Review of Recycling Methods for End-of-Life Wind Turbine Blades. *Energies*.

Entwicklung eines Verwertungsprojekts im Einklang mit der UNFC: Screening-Studie

Soraya Heuss-Aßbichler¹, Iman Dorri¹, Juan Antonio Munizaga-Plaza¹ & Ludwig Herman²

¹⁾ Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU), Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Geologie, München, Deutschland

²⁾ Proman Consulting, Auerthal, Österreich

KURZFASSUNG: Der Versorgungsbedarf an kritischen Rohstoffen macht es dringend erforderlich, die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen aus verschiedenen Abfallströmen zu fördern. Die richtige Entscheidung für förderwürdige Projekte ist ausschlaggebend für der Sicherung der Versorgung von Betrieben in der EU mit kritischen Rohstoffen, die auf Basis der nachhaltigen Bewirtschaftung natürlicher und sekundärer Ressourcen gewonnen werden. Die United Nations Framework Classification of Resources (UNFC) ist ein allgemeines Instrument, das die Klassifizierung von anthropogenen Ressourcenrückgewinnungsprojekten in ähnlicher Weise wie die Prinzipien der Primärrohstoffe ermöglicht. Anhand von drei Grundprinzipien kann eine gesamtheitliche Bewertung und Einstufung des Vorhabens erfolgen. Ein wichtiger Schritt stellt die Vorentscheidung, ob eine Projektidee das Potential hat, um später kommerziell erfolgreich zu sein. Im Rahmen der Screening Studie können die allgemeinen Vorgaben für die Umsetzung des Vorhabens erfasst werden. In fünf Schritten werden alle Informationen bezüglich der Projektidee gesammelt und bewertet. Im letzten Schritt wird mit der Klassifikation des Projekts die Förderwürdigkeit des Vorhabens genannt; dies kann so als Grundlage für die weitere Entscheidung durch Projektbeteiligten dienen.

1 EINLEITUNG

Die Gewinnung von Sekundärrohstoffen, insbesondere von kritischen Rohstoffen aus anthropogenen Ressourcen wurde bisher stark vernachlässigt. Der am 3. Mai 2024 in Kraft getretene EU Critical Raw Materials Act hat einen starken Akzent in Richtung Versorgungssicherheit, Unabhängigkeit vom Import und Nachhaltigkeit gesetzt. Hierbei wird die United Nations Classification of Resources (UNFC) explizit genannt, die die Mitgliedstaaten verpflichtet, die Mengen an kritischen Rohstoffen aus primären und sekundären Quellen zu berichten. UNFC ist ein Klassifikationssystem für alle Arten von Ressourcen. Im Vordergrund steht stets die Produktionsmenge (Quantität und Qualität). Hiermit können alle Arten von Projekten gesamtheitlich nach ihrer ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Tragfähigkeit (E-Kategorien), ihrer technischen Durchführbarkeit (F-Kategorien) und ihrem relativen Grad an geologischem Vertrauen eingestuft (Abb. 1). Je niedriger die Punktzahl, desto näher ist das Projekt an der betrieblichen und wirtschaftlichen Durchführbarkeit; ein Projekt, dass verspricht erfolgreich sein zu können erhält die Einstufung E3F3G5 und wenn es in Betrieb geht, wird es mit E1F1G1 bewertet. Auf diese Weise kann mit dem EFG Code die wirtschaftliche Tragfähigkeit eines Projekts kommuniziert werden. Sowohl wirtschaftliche und behördliche Entscheidungsträger, als auch Investoren und politische Fachleute erhalten genau die Informationen, die sie für komplexe politische Entscheidungen benötigen.

Dies führt zu einer Innovation in Erschließung neuer Rohstoffquellen und neuer Märkte, sowie zur Entwicklung neuer Technologien. Im Rahmen des HE-Projekts „Future Availability of Secondary Raw Materials in Europe“ (FutuRaM) arbeiten wir an einer strukturierten Vorgehensweise, um eine einheitliche Vorgehensweise zur Bewertung und Klassifikation von Rückgewinnungsprojekten aus anthropogenen Ressourcen zu entwickeln. Ziel ist es, mit Hilfe einer ganzheitlichen Betrachtung die relevanten Faktoren zur Bewertung der UNFC Kriterien zu untersuchen, um dann das Ergebnis klassifizieren zu können.

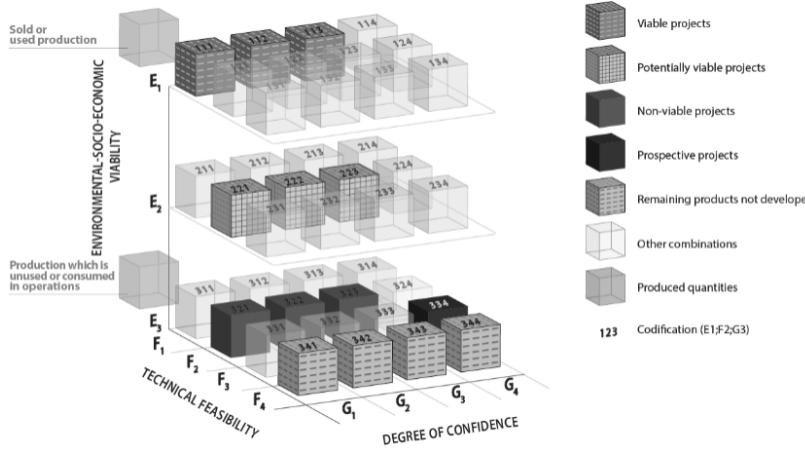


Abb. 1: Dreidimensionale Darstellung der UNFC (UNECE, 2020)

Die Entwicklung eines Vorhabens durchläuft hierbei drei wichtige Phasen. Der Übergang zwischen den Entwicklungsphasen kann mit Hilfe von einer UNFC Klasse mit einem EFG Code benannt werden. Wie in Abb. 2 zu sehen ist, endet die Screening Studie mit dem Ergebnis, ob das Vorhaben das Potential hat, als „prospektives Vorhaben“ eingestuft zu werden; dies entspricht dem UNFC Code E3F3G4. In der folgenden Orientierungsstudie nimmt der Untersuchungsumfang zu, und am Ende steht die Entscheidung, ob das Projekt als nicht tragfähig eingestuft wird oder als potentiell erfolgversprechendes Vorhaben weiterentwickelt werden soll. Dies wird z.B. mit den Klassen E3F2G3 (non-viable project) bzw. E2F2G2 (potentially viable project) ausgedrückt. In der anschließenden Machbarkeitsstudie finden die Detailuntersuchungen einschließlich Planungs- und Genehmigungsverfahren statt. Erfüllt das Projekt während der Entwicklung die Erwartungen nicht, kann es jederzeit als nicht lebensfähig (non-viable) abgebrochen werden. Ein tragfähiges Vorhaben (viable project), das über alle Genehmigungen verfügt, kann explizit durch die Einbeziehung der Unterklasse E1F1.3G1 ausgedrückt werden. Zusätzliche Unterklassen tragen dazu bei, den detaillierten Entwicklungstand des Vorhabens zu vermitteln.

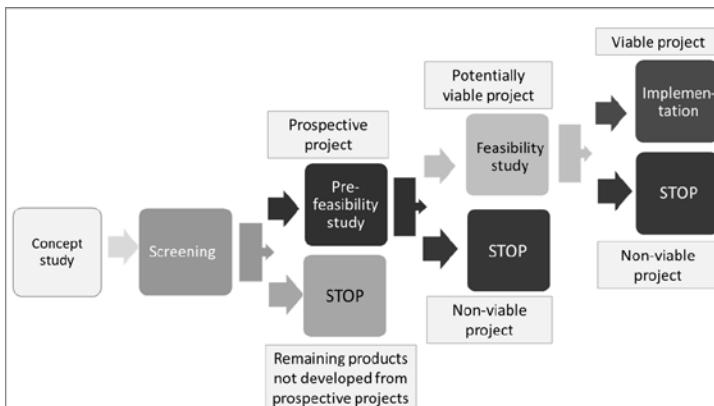


Abb. 2: Die Entwicklungsphasen einer Projektidee bis zu ihrer Umsetzung. Am Ende jeder Phase steht die Entscheidung, das Vorhaben weiterzuentwickeln oder aufzugeben

Um den Anwendern die Bewertung und Klassifikation von Vorhaben zu erleichtern, wird in FutuRaM an einer strukturierten Vorgehensweise gearbeitet. Hierfür wird ein webbasiertes Tool

entwickelt, um die Anwender in einem siebenstufigen, strukturierten Verfahren durch das Programm zu geleiten. Jeder Phasenabschnitt wird mit einer neuen EFG-Klasse angezeigt und die Ergebnisse in einem Bericht mit einem klar strukturierten Format zusammengestellt. Einen entscheidenden Schritt stellt hierbei der Übergang einer Projektidee (Konzeptionsphase) zu einem prospektiven Projekt (E3F3G4) dar. In diesem Beitrag wird eine Vorgehensweise vorgeschlagen, wie im Rahmen einer Screening Studie anhand von verschiedenen Kriterien zu ermitteln, ob Projektidee das Potential hat in der Zukunft ein wirtschaftliches Projekt zu sein (prospektive project). Drei Beispiele werden kurz vorgestellt.

2 SCREENING STUDIE

Es gibt verschiedene Gründe, die eine Projektidee initiieren. Forschungsergebnis können Auslöser sind, oder es entsteht aus der Notwendigkeit, ein Problem zu lösen. Oft bleiben jedoch innovative Ideen unberücksichtigt, weil ihr Potenzial nicht erkannt wurde. Welche der vielfältigen Projektideen erfüllt die gen Voraussetzungen, um durch (weitere) Investitionen gefördert zu werden? Es gibt eine Vielzahl von Konzepten, wie Projekte bewertet werden können, doch fehlt es häufig die Standardisierung für eine Vergleichbarkeit. Gerade bei größeren Projekten, die mit hohen Investitionen gekoppelt sind, können fehlendes Risikomanagement, fehlende Transparenz, mangelnde Qualitätssicherung sowie mangelhafte Kommunikation ebenso wie unvollständige Dokumentation zum Scheitern des Projekts führen. Eine strukturierte Vorgehensweise kann Partnern aus der Forschung und/oder der Industrie helfen darüber zu entscheiden.

Für die Durchführung der Screening Studie schlagen wir fünf Schritte vor (Abb. 3); die Vorgehensweise basiert auf der Vorgehensweise von (Suppes & Heuss-Aßbichler 2021). Der Wechsel zwischen den 3 mittleren Schritten ist iterativ zu verstehen; Ziel ist es - im Sinne von „quick and dirty“ - mit wenig Aufwand einen Überblick über das Potenzial der Projektidee zu gewinnen.

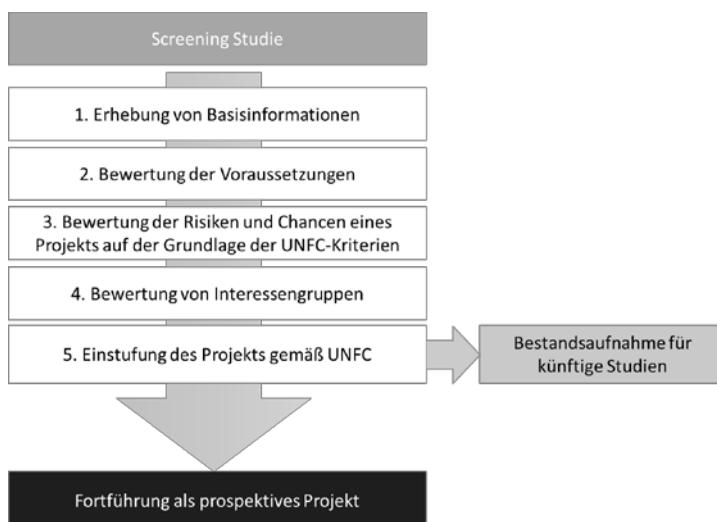


Abb. 3: Fünf Schritte der Screening-Studie, um die Potentiale und Risiken der Projektidee zu erfassen. Die Schritte sind iterativ – Ziel ist es, mit wenig Aufwand aus den geeigneten Ideen prospektive Vorhaben zu filtern (klassifiziert als E3F3G4) und zu fördern

Schritt 1 dient dazu, die Basisinformationen des Vorhabens zu erheben. Mit dem vorläufigen Titel des Vorhabens wird die Fragestellung benannt. Zudem werden die Ressource und zu erzielende Produkte einschließlich deren Zusammensetzung charakterisiert. Ebenso wird erfasst, wer

das Projekt durchführt, wer die Partner sind, und ob bereits ein Standort für die Umsetzung vorgesehen ist.

Schritt 2 umfasst eine Hintergrundanalyse; um daraus die Motivation für die Entwicklung eines Vorhabens zu formulieren. Verschiedene Aspekte sind zu beachten, wie z.B. wie wird aktuell das Problem gelöst; wie wird aktuell der Abfall (die Ressource) behandelt; für welche Produkte besteht ein Markt?

Sechs Fragen helfen, die Relevanz der Projektidee zu erkunden:

- Enthält der Abfall (die Ressource) kritische oder gar strategische Materialien und wenn ja, welche? Gibt es hierfür Förderprogramme?
- Enthält der Abfall (die Ressource) hohe Konzentrationen an wirtschaftlich wertvollen Materialien und wenn ja, welche?
- Bringt die Verarbeitung von Abfällen (Sekundärressourcen) wirtschaftliche Vorteile, z. B. durch Senkung der Produktionskosten, oder Vermeidung von kostenintensiver Verbringung / Deponierung von Abfallmengen?
- Verursacht eine fehlende Verwertung von Abfällen Umweltrisiken?
- Verursacht eine fehlende Verwertung von Abfällen ein hohes Maß an sozialen Risiken?
- Sind das Recycling und die Behandlung des Abfalls gesetzlich vorgeschrieben, bzw. ist es in naher Zukunft zu erwarten, dass die Verwertung verpflichtend wird?

Werden eine oder mehrere Fragen mit ja beantwortet, hat das Vorhaben bereits ein hohes Potential als prospektive Projekt eingestuft zu werden.

In **Schritt 3** steht das Projekt selbst im Fokus und es geht darum, das geplante Vorhaben und seine potenziellen und tatsächlichen Auswirkungen zu beschreiben. Abb. 4 zeigt drei zentrale Aspekte, die mit dem Projekt im Zentrum verknüpft sind. Zunächst wird die Eignung des Abfalls als Rohstoff und die technische Umsetzbarkeit des Verfahrens betrachtet. Dies impliziert die Frage, ob dieses Vorhaben eine technische Innovation darstellt. Am anderen Ende stehen die Produkte, die hergestellt werden sollen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob für die Produkte ein Markt existiert. Die mit der Beantwortung der Fragen verbundenen Angaben fließen in die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit des Vorhabens ein, einschließlich der Bewertung des Investitionsvolumens für die Entwicklung des Vorhabens. Der dritte Aspekt betrifft die Frage nach den ökologischen und sozialen Konsequenzen des Vorhabens.

All diese Aspekte können mit dem gesamtheitlichen Ansatz der UNFC strukturiert werden:

- **G-Kriterium:** welche Abfall-Mengen sollen (zunächst) verarbeitet und welche Produktmengen können hergestellt werden? Welche Qualität hat das Produkt, existiert dafür einen Markt?
- **F-Kriterium:** Was soll technisch umgesetzt werden? Wie kann das als System von der Umgebung abgegrenzt werden? Was ist das Besondere an dieser (neuen) Technologie? Welche Alternativen gibt es; sind vergleichbare Technologien auf dem Markt. Wie werden vergleichbare Produkte hergestellt? Worin besteht die technische Innovation?
- **E-Kriterium:** Hier sind insgesamt vier Aspekte zu berücksichtigen.
 - Wirtschaftlichkeit: Gibt es bereits eine Annahme über die Kosten und mögliche Gewinne? Werden bestimmte Kosten vermieden?
 - Soziale Aspekte: Welchen Vorteil bringt das Vorhaben der Gesellschaft?
 - Umwelt-Aspekte: Welche ökologischen Verbesserungen bringt das Vorhaben? Welche Emissionen sind zu erwarten?
 - Recht: Wie sind die rechtlichen Rahmenbedingungen? Welche rechtlichen Vorgaben stehen dem Projekt potenziell entgegen?

Neben den positiven Effekten müssen auch die negativen Auswirkungen bzw. Risiken, die mit der Entwicklung des Projekts verbunden sind, berücksichtigt werden.

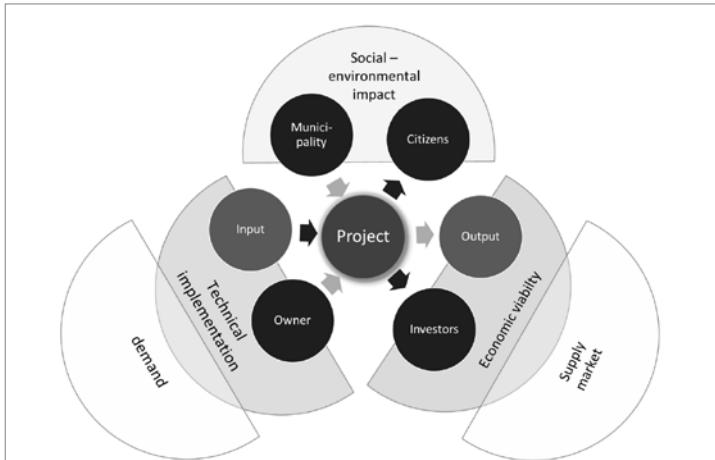


Abb. 4: Schematische Darstellung einer gesamtheitlichen Betrachtung eines Vorhabens. Input und Output steht für die Zufuhr von Abfall und Herstellung der Produkte. Sie wird unter den Aspekten - technische Umsetzung – Wirtschaftlichkeit – soziale und ökologische Auswirkungen betrachtet

In **Schritt 4** werden die unmittelbar und mittelbar betroffenen Stakeholder evaluiert. Abb. 4 zeigt, dass verschiedene Interessen im Vordergrund stehen können. Wer profitiert von der Entwicklung des Projekts und könnte Nachteile erfahren?

In **Schritt 5** schließlich erfolgt die Zusammenführung der Ergebnisse und basierend darauf die Klassifikation des Vorhabens durchgeführt: Die EFG Klasse E3F3G4 (prospektive project) zeigt an, dass es unter der derzeitigen Sachlage die Voraussetzungen erfüllt bzw. gute Potentiale aufweist, um in einer Orientierenden Studie (prefeasibility study) gefördert zu werden.

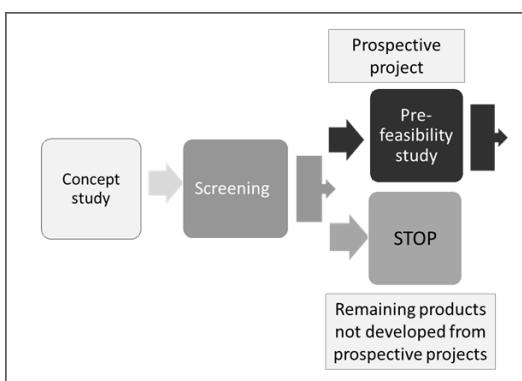


Abb. 5: Ausschnitt aus Abb. 2 mit der Darstellung der Entwicklungsphasen von einer konzeptionellen Studie bis zum Screening und der anschließenden Klassifikation

3 BEISPIELE FÜR SCREENING STUDIEN

In der UNFC werden verschiedene Motive betrachtet, ein Vorhaben zu entwickeln. Hier sind drei Optionen genannt.

Innovation und Fortschritt in der Technologie. Sie können durch neue Ideen in der angewandten Forschung initiiert werden. Das kann beispielsweise ein neues Verfahren zur selektiven

Lösung und Extraktion von Zielelementen sein, es kann auch ein neues Konzept zur Zerlegung von Materialien und Aufkonzentration von Fraktionen sein. Ein Beispiel hierfür stellt die Fällung von Metallen aus Industrieabwässern in Form von Oxiden oder als Metall dar. Dieser Fragestellung gehen (Anagnostopoulos & Heuss-Aßbichler 2024) nach.

Wirtschaftliche Ziele sind ebenfalls eine Motivation für neue Vorhaben. Es kann die Erschließung einer neuen Rohstoffquelle (*Urban Mining*) oder von neuen Märkten sein, oder die Steigerung der Effizienz in der Produktion oder die Verbesserung der Produkteigenschaften. Ein Beispiel für eine Screening Studie ist, die in einem Bergeteich gelagerten mineralischen Rückstände evaluiert (Suppes & Heuss-Aßbichler 2021).

Lösung eines Problems. Im folgenden Beispiel macht die gesetzlichen Vorgaben die Entwicklung eines Vorhabens zwingend erforderlich. Mit Inkrafttreten der Verordnung zur Klärschlammverwertung (AbfKlärV) 2017 in Deutschland ist die **Phosphorrückgewinnung** rechtsverbindlich und soll bis 2029 flächendeckend umgesetzt werden. Dadurch stehen die Kommunen vor der Herausforderung die beste Option für den jeweiligen Standort zu finden. Im Vergleich zu den oben genannten Optionen steht nun die Auswahl der geeigneten Technologie für die Phosphorrückgewinnung an. Doch zunächst gibt die Vorgaben für die Wahl der Technologie zu ermitteln. Wie Abb. 4 zeigt, müssen bei der Wahl der geeigneten Technologie an einem Standort unterschiedliche Aspekte in Betracht gezogen werden.

Bei diesem Beispiel ist durch die Vorgabe klar, dass es sich um ein prospektives Vorhaben handelt und eine orientierende Studie folgen soll. Die Darstellung der verschiedenen Technologien nach den Prinzipien der UNFC bietet allen Beteiligten die notwendigen Informationen, um sich eine Übersicht zu schaffen. Die EFG Klasse gibt den aktuellen Entwicklungstand der Technologie wieder. Die Aufschlüsselung der Technologien bezüglich der UNFC Kriterien vermittelt eine konsistente Erfassung der Informationen und bietet so Transparenz und die erforderliche Vergleichbarkeit. Die einheitliche Struktur hilft allen Beteiligten die Vor- und Nachteile der jeweiligen Technologie an dem vorgesehenen Standort zu beurteilen und damit eine faktenbasierte Entscheidung zu treffen.

Am Ende der orientierenden Untersuchung stehen nur noch wenige Technologien in der engeren Auswahl. In der Machbarkeitsstudie werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Technologien den Gegebenheiten vor Ort gegenübergestellt, um die beste Option für den Standort zu finden.

4 SCHLUSSFOLGERUNG

Screening stellt eine wesentliche Entwicklungsphase dar, um die Voraussetzung für eine Studie zu erfassen. Die Einführung einer Klassifikation von Vorhaben basierend auf UNFC bietet viele Vorteile für alle beteiligten Interessensgruppen. Die in FutuRaM ausgearbeitete Vorgehensweise bietet eine strukturierte und kohärente Vorlage für die Umsetzung eines Vorhabens auf der Grundlage einer gesamtheitlichen Betrachtung basierend auf den Prinzipien der UNFC.

5 DANKSAGUNG

Dieser Beitrag ist Teil der Forschungsarbeiten im Rahmen des HE-Projekts FutuRaM.

LITERATURVERZEICHNIS

- Anagnostopoulos, I. & Heuss-Aßbichler, S. (2024) *Abwasserbehandlung und Ressourcenrückgewinnung von Metallen aus Industrieabwässern*.
- Suppes, R. & Heuss-Aßbichler, S. (2021) *How to identify potentials and barriers of raw materials recovery from tailings? Part I: A UNFC-compliant screening approach for site selection*. Resources, 10(3), 26.

Polymer Differentiation with Computed Tomography: Opportunities and Limitations

Sarah Heupl¹, Jonathan Glinz¹, Dietmar Salaberger² & Johann Kastner¹

¹⁾ University of Applied Sciences Upper Austria, Research Group Computed Tomography, Wels, Austria

²⁾ Borealis Polyolefine GmbH, Linz, Austria

ABSTRACT: In the context of polymer recycling, differentiation and analysis of various polymer types are crucial for effective material separation and reuse. This study explores the effectiveness of computed tomography (CT) in distinguishing between different types of polymers based on their density and elemental composition, facilitating more efficient recycling processes. A specimen consisting of six stacked polymer sheets, each approximately 500 µm thick, was prepared for analysis. The polymers included polypropylene (PP), polyethylene (PE), polystyrene (PS), polyamide (PA), polyetheretherketone (PEEK) and polyethylene terephthalate (PET). Two different CT devices were employed: the GE Nanotom 180NF and the RX Solutions Easytom 160, each with specific parameters and varying voltage settings. Additionally, simulations using the in-house software SimCT were conducted to complement the experimental data, focusing on both polychromatic and monochromatic X-rays. The grey values obtained from scans as well as simulations were analyzed to determine the distinguishability of the polymers based on their attenuation properties. It is shown that a grey-value based differentiation is possible if the polymers show significant differences concerning density and / or elemental composition. Furthermore, contrast enhancement by reduction of voltage, energy and noise leads to higher contrast between different polymer classes.

1 INTRODUCTION

The escalating global demand for polymer materials is driving an unprecedented increase in plastic waste generation. Estimates suggest that annual plastic waste will rise from 260 million tons in 2016 to a staggering 460 million tons by 2030 (Hundertmark et al. 2018). This surge in plastic waste exacerbates the already critical issue of environmental pollution. Consequently, recycling or reusing polymers has become imperative to mitigate the release of pollutants and reduce environmental impact (Schyns & Shaver 2021). Recycling polymers typically involves the complex task of separating individual materials from mixed polymer waste, since mixed plastics are still a big challenge for the recycling process (Ignatyev et al. 2014). This separation often relies on sensor-based sorting methods that use visual identification features such as color, shape, brightness, and fluorescence. Techniques for analyzing these features include optoelectronic, spectroscopic, electromagnetic, and X-ray methods (Martens & Goldmann 2016, Araujo-Andrade et al. 2021). However, many of these methods only examine the surface of the materials, which can lead to false identification, especially with coated materials. X-ray inspection offers a method that provides a three-dimensional representation of waste streams, significantly enhancing the detection of contaminants like metal parts or other non-polymer materials that negatively affect the quality of recycled polymers. This study explores the effectiveness of computed tomography (CT) in distinguishing between different types of polymers based on their density and elemental composition, facilitating more efficient recycling processes. Therefore, a specimen consisting of six different polymers, namely polypropylene (PP), polyethylene (PE), polystyrene (PS), polyamide (PA), polyetheretherketone (PEEK) and polyethylene terephthalate (PET) was evaluated by simulation and CT measurements.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Sample Preparation

A specimen consisting of six different stacked polymer types in order of their nominal density was prepared by Borealis Polyolefine GmbH (Fig. 1).

Thickness	Arrangement	Structure	Element Composition	Density
500 µm	Polypropylen		86 % C 14% H	0.90 g/cm ³
500 µm	Polyethylen		86 % C 14% H	0.923 g/cm ³
500 µm	Polystyrol		92% C 8% H	1.03 g/cm ³
500 µm	Polyamid		64% C 12% N 14% O 10% H	1.15 g/cm ³
500 µm	Polyetheretherketon		79% C 17% O 4% H	1.32 g/cm ³
400 µm	Polyethylenterephthalat		63% C 33% O 4% H	1.38 g/cm ³

Fig. 1: Specimen consisting of PP-PE-PS-PA-PEEK-PET stacked in order of nominal density

The single sheets have a thickness of approximately 500 µm in case of polypropylene (PP), polyethylene (PE), polystyrol (PS), polyamide (PA) and polyethylenterephthalat (PET). For polyetheretherketone (PEEK) the thickness is approximately 400 µm.

2.2 Computed Tomography

The reference body was analyzed with two different CT devices:

- GE Nanotom 180NF desktop device equipped with a GE Phoenix 180-kV-nanofocus tube and a 2,300 x 2,300 pixel Hamamatsu detector,
 - RX Solutions Easytom 160 equipped with a 160 kV Hamamatsu nanofocus tube and a 1,920 x 1,536 pixel 16 bit Varian flat panel detector.

The following parameters were used: (I) a binning of 1 x 1, an integration time of 500 ms, averaging of 5 and 1,500 projections giving a total scan duration of 90 minutes; (II) a binning of 2 x 2, an integration time of 500 ms, averaging of 6 and 1,504 projections giving a total scan duration of 78 minutes. In both cases a voxel size of (10 μm)³ was reached. For (I) the voltage was varied from 50 to 80 kV in 10 kV steps, giving four different measurements. For (II) the voltage was varied from 40 to 80 kV in 20 kV steps, giving three measurements. In total seven measurements were performed. Volume data was reconstructed with the software phoenix datos|x2 (phoenix|X-ray, GE Sensing & Inspection Technologies GmbH) for (I) and xact64 reconstruction software (RX Solutions) for (II). Subsequent image processing steps and data evaluation were performed in VGStudio Max 3.4 (Volume Graphics GmbH).

2.3 *Simulation*

Simulations were performed with the in-house developed software SimCT (Reiter et al. 2016). Therefore, a virtual specimen corresponding to Fig. 1 was created, including information on elemental composition and density of the different polymers. Two different parameter studies were conducted: (I) simulation with polychromatic X-rays and (II) simulation with monochromatic X-rays. The following parameters were used: a binning of 1x1, an integration time of 500 ms,

averaging of 1 and 1,600 projections in case of (I) and 1 projection in case of (II). In both cases a voxel size of $(10 \mu\text{m})^3$ was reached. For (I) the voltage was varied from 20 to 80 kV in 10 kV steps. Additionally, simulations at 100 kV and 160 kV were performed, giving nine different simulations. For (II) the energy was varied from 10 to 100 keV in 10 keV steps, giving ten simulations. In total nineteen simulations were performed.

2.4 Grey Value Analysis

The grey values of single cylinders were evaluated with the software VGStudio Max 3.4 (Volume Graphics GmbH). Therefore, a cylindrical region of interest (ROI) was placed in each polymer cylinder. The size of the ROIs for each polymer was $3,000 \times 3,000 \times 250 \mu\text{m}$. Furthermore, the position of the ROI in the polymer cylinders was the same for each measurement and simulation. A grey value analysis was performed, giving the minimum, maximum and average grey value of the ROI. For comparison of the different voltages and energies, the average grey values of all six polymers were normalized by dividing with the average grey value of PET.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Simulation with polychromatic X-rays

Normalized grey values of the different polymer classes for all voltages are shown in Figure 2.

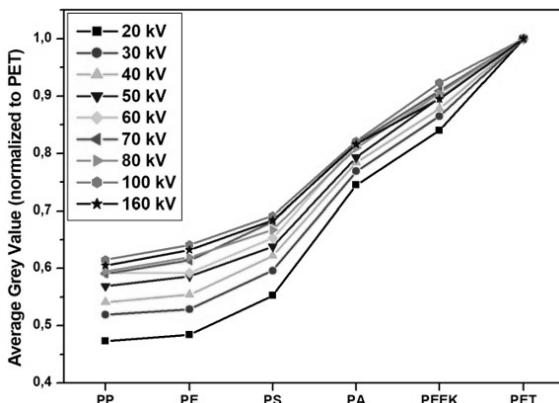


Fig. 2: Normalized grey values of the different polymers for simulation with polychromatic X-rays

Generally, the average grey values are increasing with increasing density. This is due to an increased attenuation of the X-rays with increasing polymer density (Kastner & Heinzl 2019). Further, Fig. 2 shows that the average grey values are becoming more similar for 70 kV or higher. For the higher-dense polymers (f.e.: PET) the grey value decrease with higher voltages is greater compared to lower-dense polymers (f.e.: PP) when looking at Tab. 1.

Tab. 1: Comparison of average grey values of four different simulations (20 kV; 40 kV; 80 kV; 160 kV)

polymer	average 20 kV	average 40 kV	average 80 kV	average 160 kV
PP	0.089 ± 0.002	0.040 ± 0.001	0.025 ± 0.002	0.023 ± 0.002
PE	0.091 ± 0.002	0.041 ± 0.001	0.026 ± 0.002	0.024 ± 0.002
PS	0.104 ± 0.002	0.046 ± 0.002	0.028 ± 0.002	0.026 ± 0.002
PA	0.140 ± 0.004	0.058 ± 0.002	0.034 ± 0.002	0.031 ± 0.002
PEEK	0.158 ± 0.004	0.065 ± 0.002	0.038 ± 0.002	0.034 ± 0.002
PET	0.188 ± 0.006	0.074 ± 0.002	0.042 ± 0.002	0.038 ± 0.002

It can be observed that grey value differences are great enough for differentiation of polymer classes except for PP, PE in all cases; and PS when voltages above 80 kV are applied. This is due to their very similar densities, as well as their equal elemental composition. Generally, the steepest slope is present for the lowest voltage, giving the greatest grey value difference – or in other words contrast – between the different polymer classes. With increasing voltage, the contrast is decreased, making polymer identification more challenging. Corresponding to this parameter study the lowest possible voltage would be recommended for polymer differentiation. Therefore, only the lower voltages were considered for the CT measurements.

3.2 Computed Tomography Measurements

Normalized grey values of the different polymer classes for the different voltages and CT devices are shown in Fig. 3.

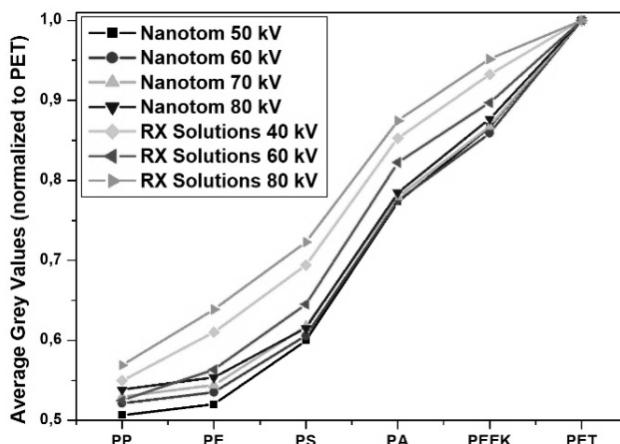


Fig. 3: Normalized grey values of the different polymers for computed tomography measurements

As predicted by simulation, the steepest slope from PP to PET is present for the measurements with the lowest voltage. Further, with increasing voltage the overall slope, and therefore contrast, is decreased. In general, the overall contrast is a bit greater for the GE Nanotom 180 NF device, but the contrast between the low-absorbing polymers PP and PE is greater in case of the RX Solutions Easytom 160. Moreover, when comparing the results from the GE Nanotom 180 NF to the RX Solutions Easytom 160, the lowering of voltage has a greater impact on the contrast in case of the RX Solutions Easytom 160. Unfortunately, no significant grey value difference can be observed between PP and PE as already observed by simulation when looking at the individual grey values in Tab. 2.

Tab. 2: Comparison of average grey values of the CT measurements at the Nanotom (50 – 80 kV)

polymer	average 50 kV	average 60 kV	average 70 kV	average 80 kV
PP	0.039 ± 0.003	0.038 ± 0.003	0.036 ± 0.003	0.035 ± 0.003
PE	0.040 ± 0.003	0.039 ± 0.003	0.037 ± 0.003	0.036 ± 0.003
PS	0.046 ± 0.003	0.044 ± 0.003	0.042 ± 0.003	0.040 ± 0.003
PA	0.059 ± 0.004	0.056 ± 0.003	0.053 ± 0.004	0.051 ± 0.004
PEEK	0.066 ± 0.004	0.062 ± 0.003	0.059 ± 0.004	0.057 ± 0.004
PET	0.076 ± 0.004	0.072 ± 0.003	0.068 ± 0.004	0.065 ± 0.004

In fact, with increasing the voltage from 50 to 60 kV PS cannot be differentiated from PP and PE either. Although, maxima vary slightly differentiation is impossible due to present noise.

Therefore, another parameter study was conducted using monochromatic X-rays to see if by deletion of noise differentiation of those polymer classes could be more doable.

3.3 Simulation with monochromatic X-rays

Normalized grey values of the different polymer classes for all energies are shown in Fig. 4.

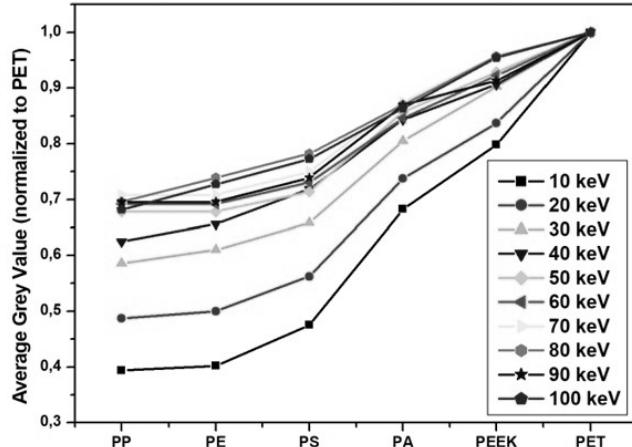


Fig. 4: Normalized grey values of the different polymers for simulation with monochromatic X-rays

As observed for the polychromatic simulation and the CT measurements, the greatest contrast between polymer classes is present for the lowest energy. By increasing the energy, contrast is decreasing significantly until 50 keV. Above, grey values of individual polymers are not decreasing any further, leading to similar average grey values for all simulations with 50 keV or higher. Average grey values of the simulation until 40 keV are summarized in Tab. 3.

Tab. 3: Comparison of average grey values of four different simulations (10 keV – 40 keV)

polymer	average 10 keV	average 20 keV	average 30 keV	average 40 keV
PP	0.189	0.039	0.024	0.020
PE	0.193	0.040	0.025	0.021
PS	0.228	0.045	0.027	0.023
PA	0.328	0.059	0.033	0.027
PEEK	0.383	0.067	0.037	0.029
PET	0.480	0.080	0.041	0.032

Unfortunately, the grey value difference between PP and PE is still small and therefore differentiation between those two is not considered as doable. But generally, contrast between polymer classes seems to increase when taking a closer look at the normalized grey values. Whereas for the CT measurements and the simulation with polychromatic X-rays a range of 0.5 – 1 can be observed, the range becomes greater with 0.4 – 1 by the absence of noise. This leads to the assumption that by the reduction of noise, polymer differentiation could become a more doable task. Among other methods, the usage of dual energy CT or a photon-counting detector for CT could be a future possibility for polymer class identification by CT (Ballabriga et al. 2020).

4 CONCLUSION

Although, the high throughput rates of commercial recycling plants cannot be realized with CT, this paper demonstrates the potential of using computed tomography (CT) to differentiate

between various polymer classes based on their density and elemental composition. The analysis of six different polymers using two CT devices, along with detailed simulations, provided a valuable insight into the capabilities and limitations of CT for polymer differentiation. The findings revealed that lower voltage settings offer better contrast between different polymers. However, the differentiation between polymers with very similar densities and elemental composition, such as polypropylene (PP), polyethylene (PE) and polystyrene (PS), remains challenging. Further, it has to be mentioned, that the shape affects X-ray attenuation by influencing the path length the X-rays travel through the material. Regular shapes, like the cylinders used in this study, provide more predictable and clearer images due to consistent attenuation, while irregular shapes result in complex attenuation patterns that can complicate image interpretation and reconstruction, making differentiation more difficult. A more sophisticated X-ray method, which is already used for the separation of metals, is dual energy. With this method, materials can be separated by exploiting the non-linearity of the attenuation coefficients of the different elements. Since elemental composition is quite similar for a lot of polymers, differentiation remains challenging. The use of monochromatic X-rays in simulations showed promise for improving contrast by absence of noise, suggesting that further improvement of CT technology could enhance polymer classification. For example, the usage of photon-counting detectors could be beneficial by excluding electronic noise and the possibility to scan within small energy ranges.

5 ACKNOWLEDGEMENTS

This work was financed by the project “HyperMAT”, funded by the European Just Transition Fund and the Upper Austrian Government.

REFERENCES

- Araujo-Andrade, C., Bognicourt, E., Philippot, L., et al. (2021) Review on the photonic techniques suitable for automatic monitoring of the composition of multi-material wastes in view of their posterior recycling. *Waste Management & Research*. 2021;39(5):631-651. doi:10.1177/0734242X21997908
- Ballabriga, R., Alozy, J., Bandi, F., Campbell, M., Egidos, N., Fernández-Tenllado, A., José, M., Heijne, E., Kremastiotis, I., Llopard, X., Madsen, B., Pennicard, D., Sriskaran, V., Tlustos, L. (2020). Photon Counting Detectors for X-Ray Imaging With Emphasis on CT. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*. PP. 1-1. 10.1109/TRPMS.2020.3002949.
- Hundertmark, T., Mayer, M., McNally, C., Simons, T., & Witte, C. (2018). How plastics waste recycling could transform the chemical industry. *McKinsey & Company*.
- Ignatyev, I.A., Thielemans, W., Vander Beke, B. (2014). Recycling of Polymers: A Review. *ChemSusChem*, 7: 1579-1593. <https://doi.org/10.1002/cssc.201300898>
- Kastner, J., & Heinzl, C. (2019). X-ray tomography. In *Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation* (pp. 1095–1166). Springer, Cham.
- Martens, H., & Goldmann, D. (2016). Manuelle und mechanische Verfahrenstechniken zur Aufbereitung von Abfällen und zur Schadstoffentfernung. In *Recyclingtechnik* (pp. 27–68). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-02786-5_3
- Reiter, M., Erler, M., Kuhn, C., et al. (2016) SimCT: a simulation tool for X-ray imaging. In: 6th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT 2016); 2016; Wels, Austria.
- Schyns, Z. O. G., & Shaver, M. P. (2021). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Re-view. *Macromolecular Rapid Communications*, 42(3). <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>

CONTACT

DI Sarah Heupl
sarah.heupl@fh-wels.at
+43 50507-44412
Research Group Computed Tomography
University of Applied Sciences Upper Austria
www.3dct.at

NETZWERKEN MIT 270 PARTNERN

Der Cleantech-Cluster der oberösterreichischen Standortagentur Business Upper Austria ist die Plattform der Umwelttechnik- und Energietechnologie-Unternehmen in Oberösterreich. Wir bringen Lösungsanbieter und Lösungsanwender in der Umwelt- und Energietechnologie zusammen. In branchenübergreifenden nationalen und internationalen Wertschöpfungsnetzwerken entwickeln wir gemeinsam innovative Lösungen, um die Ressourceneffizienz zu steigern, Emissionen zu reduzieren und eine saubere Umwelt zu fördern.

Unsere Themenschwerpunkte

- Kreislaufwirtschaft
- Defossilisierung
- Nachhaltigkeitsmanagement
- Reinhaltung von Boden, Luft und Wasser

Unsere Leistungen

- Unterstützung und Begleitung von Cluster-Kooperationsprojekten von der Idee bis zur Umsetzung
- Vernetzung von Unternehmen, Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen sowie Ausbildungsstätten
- Know-how-Transfer durch Qualifizierung
- Neutraler Boden für kooperative Zusammenarbeit bei freiem Wettbewerb
- Steigerung der Reichweite und Sichtbarkeit am Markt

www.cleantech-cluster.at

Sichern Sie sich mit uns den Informationsvorsprung, auf den es ankommt.



DAS MAGAZIN FÜR DIE BRANCHE.



Trends, Analysen, Meinungen und Fakten zur Kreislaufwirtschaft!

Seit über 75 Jahren berichten wir unabhängig und aktuell über die wirtschaftlichen, politischen und technischen Entwicklungen in der Recycling- und Entsorgungswirtschaft. Mittlerweile auch mit einer App, die neben der digitalen Ausgabe des Magazins auch tagesaktuelle kostenlose Nachrichten beinhaltet.

Überzeugen Sie sich selbst und testen Sie das RECYCLING magazin!



QR Code scannen und in der App registrieren. Freischaltcode 000095 im Menü links oben eingeben. AUSGABE LESEN.

GREEN TECH VALLEY



Hier wachsen
grüne
Innovationen!

#1 Technologie-Hotspot
für Klimaschutz & Kreislaufwirtschaft



International Solid Waste Association (ISWA-Austria)

ISWA Austria stellt als nationale Plattform der ISWA in Österreich für Ihre Mitglieder eine Schnittstelle zur weltweiten Abfallwirtschaft dar und schafft die



Möglichkeit zur Kooperation und internationalen Präsentation sowie zum Know-how-Transfer von und nach Österreich.

www.iswa.at

English Abstracts

Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband



Das österreichische **Kompetenzzentrum** für **Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft**



www.oewav.at

Folgen Sie uns
auf LinkedIn



zukunft
SEIT 1909
denken



Lothringerstraße 12
1030 Wien
Tel.: +43(0)1 532 62 83
Mail: office@vefb.at

www.vefb.at

Setzen Sie ein Zeichen!

EFB-Zertifizierung: Nachhaltigkeit
auf einem neuen Level -
Mehr als „nur“ ISO 14001



Das Zertifikat Entsorgungsfachbetrieb:

- der anerkannte Branchenstandard der Abfall- und Ressourcenwirtschaft
- optimiert Betriebsabläufe
- sorgt für transparente Betriebsorganisation
- branchenspezifische Erweiterung zu ISO 9001 bzw. ISO 14001

Was garantiert eine EFB Zertifizierung?

- Überprüfung der Rechtskonformität (Legal Compliance)
- Leichte, unkomplizierte Umsetzung im Betrieb durch eine Prüfliste
- Ausreichender Versicherungsschutz sowie Risikoabschätzungen
- Zuverlässigkeit und Fachkunde der verantwortlichen Personen
- Plausibilitätsüberprüfung von Abfallbilanzen und Mengenströmen
- Vorteile bei Ausschreibungen und Behördenüberprüfungen
- Verwaltungsvereinfachungen für zertifizierte Betriebe



The LIB Recycling Challenge – Pathways Achieving Efficiency Rates

Cornelia Rutkowski¹, Bettina Rurecht², Astrid Arnberger³, Thomas Nigl¹, Robert Hermann⁴ & Roland Pomberger¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

²⁾ K1-MET GmbH, Area Metallurgical Process Efficiency and Circularity, Leoben, Austria

³⁾ Saubermacher Dienstleistungs AG, Research and Development, Feldkirchen bei Graz, Austria

⁴⁾ TÜV SÜD Landesgesellschaft Österreich GmbH, Green Energy & Sustainability, Bruck/Mur, Austria

The new European Battery Regulation introduces both advantages and challenges for the recycling of lithium-ion batteries. Accordingly, it mandates that a minimum of 70 % of the average weight of lithium batteries must be recycled by the end of 2030. Specific recovery targets are set at 95 % for cobalt, copper and lead, 80 % for lithium and 95 % for nickel. Additionally, a stricter requirement for comprehensive data collection and verification from recycling companies is obligated. First step in achieving these obligations is a general assessment of the end-of-life lithium-ion batteries that are subject to recycling. This includes detailed overview of different battery designs, a general knowledge of the composition of exterior components as well as a characterisation on module and since current LIB recycling processes lack a characterisation on element level, a suitable method is required that provides repeatable and reliable results. This work presents preliminary findings of the pre-treatment and briefly discusses upcoming challenges regarding the European Battery Regulation.

Investigations on the utilisation of carbon fiber-containing waste in cement plants (EVCAZ)

Isabel Kaphahn¹ & Kirsten Stark¹

¹⁾ Thermal Processes and Emission Control in Waste Management and Recycling (Teaching and Research Unit), RWTH Aachen, Aachen, Germany

Currently, there is no thermal treatment or disposal option for end-of-life waste containing carbon fibers. Due to their characteristic properties, carbon fibers are not completely thermally decomposable in conventional waste incinerators, but the high temperatures and long retention time in the cement rotary kiln process seem to be promising for this task. The aim of the project EVCAZ is the development of a utilization path for non-recyclable CF-containing waste in cement plants by conducting long-term test campaigns at different cement plants in Germany. These tests include the dosing of carbon fiber reinforced plastic (CFRP)-containing waste fractions and the subsequent post-testing to record long-term effects. The tests are supported by comprehensive gas analysis, dust, and solids sampling. Hereby the conversion of the CF, possible accumulation effects and emissions of respirable WHO fibers are examined. The main burner was selected as the feeding point of the waste fraction consisting of carbon fiber reinforced plastics, because there the highest temperatures of up to 2,000 °C are present in the flame. The alternative feeding point in the calciner poses the risk of fibers being carried away untreated with the exhaust gas flow. Feeding in the main burner requires the CFRP-containing waste to be shredded to a size < 30 mm, which is very time-consuming due to the material properties of CF. To minimize the risk of releasing fibers, especially harmful WHO fibers, during delivery and feeding in the cement plant, a closed system is to be installed. The characteristics of the shredded CFRP with very low density and the tendency to blocking behavior pose a challenge when conveying the material. The aim of the project is to present a comprehensive technology assessment that will serve as a basis for decisions on the future thermal treatment of carbon fiber containing waste. The project is being funded for two and a half years by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action via the research association VDZ Technology gGmbH as part of the IGF programme under project no. 23009 N.

Examination of the introduction of a mandatory deposit for lithium-containing batteries and accumulators (LIB)

Ralf Brüning¹ & Florian Witt¹

¹⁾ Dr. Brüning Engineering UG, Brake, Germany

Stakeholders and plant-operators in the circular economy and recycling industry are reporting fires in waste sorting and treatment plants. They're suspected and confirmed as being caused by lithium-containing batteries (LIB). In conjunction with the increasing amount of lithium-containing (high-energy) batteries placed on the market, the issue of correct feeding for disposal or proper collection is increasingly coming into focus and is the trigger for a controversial debate on a mandatory deposit for LIB. The expert report is intended to evaluate the introduction of a mandatory deposit on LIBs. It will be examined whether a mandatory deposit on LIBs, which is mentioned in many discussions, is a suitable instrument to ensure the (early) separate collection of LIBs to a greater extent, to reduce or prevent fire incidents along the collection and waste treatment chain and can contribute to increasing the collection quantities of waste batteries and accumulators. Finally, within the framework of the results analysis, recommendations for action, measures and alternatives for the further development of the collection of LIBs are named and explained. The basic purpose that should be pursued by a LIB deposit system is as follows: first - reduce fire incidents during collection and transport as well as in waste sorting and treatment facilities, second - increase the collection of LIBs in particular used batteries and accumulators and third - increase the collection of WEEE in which LIBs may be incorporated. In addition, the above mentioned distinction between different types of batteries, which are linked to different product identities and handling in the practical collection as well as disposal, must be adequately considered when considering the general suitability of deposit systems for LIBs. In this respect, it must be assessed whether a deposit system for all types of LIBs or a deposit system only for specific types of LIBs taking into account their type of construction. In consideration of the fact that especially misdirected LIBs can be responsible for damage incidents, the household waste collection systems/streams, including residual municipal waste and packaging waste, were examined to obtain an estimate of the volume of (lithium-containing) batteries in various household waste streams in Germany. Further research was carried out against the background of the volume considerations, which forms a foundation for presenting the possibilities, potentials, and effectiveness of the introduction of a deposit system for LIBs. In the winter of 2020 and spring of 2021, surveys were conducted with waste management facilities and public waste management authorities. The topics surveyed covered damage incidents, their causes, as well as safety measures that are taken to prevent these incidents. The public waste management authorities were also surveyed on the collection situation of LIBs and WEEE containing LIBs. In the study it's also assed which quantities of LIBs would be subjected to this deposit and would have to be handled by a system. A need for steering has been identified for all product groups in the device battery sector. Provided that the deposit item can be distinctly identified as such by clear labelling on the battery and the device for product groups, positive results can be expected. In the case of devices with built-in batteries, the legal regulations for electrical and electronic devices (ElektroG) would also have to be taken into account and adapted when developing a deposit system. However, the necessity of explicit labelling and clear responsibilities lead to additional time and effort. The introduction of a deposit system for the product groups "lithium-containing non-installed device batteries (loose)" and "devices with installed lithium-containing device batteries" would have by far the greatest steering effect and thus also a reduction in the risk of fire in non-compliant waste streams. At the same time, there would be other (synergy) effects: For example, besides the collection of waste batteries, there is also the potential to increase the collection of (battery-containing) WEEE.

Percentage of used textiles in residual waste intended for separate collection

Lisa Tatschl¹, Hana Stipanovic² & Alexia Tischberger-Aldrian²

¹⁾ AWV Judenburg, Waste consulting, Judenburg, Austria

²⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

The circular economy is a central theme of the European Union on the way to achieving ambitious climate goals. The textile sector is also becoming more and more important. A sophisticated collection is essential for sustainable waste management. There is already an existing system for wearable textiles for used textiles in Austria, but this is currently being reconsidered. A large proportion of common household textiles are currently collected as residual waste and the potential is virtually lost as this proportion is not reused nor available for recycling.

The aim of this work was to record and quantify the proportion of wearable and non-wearable old textiles in residual waste. For this purpose, waste analyses were carried out in several regions in Styria (Austria) with different waste management criteria, such as a central or decentralized collection of used clothing. Four regions were chosen, which differed in terms of socio-economic factors and geographical factors (rural, intermediate and urban areas). Part of the investigation was to pick out all old textiles from defined samples of residual waste and then sort them into different fractions using hand sorting. This resulted in six categories, which were divided into old clothes, shoes and accessories as well as other textiles and each category was additionally sorted into a wearable and a non-wearable fraction.

Based on the data from the analyses, the potential for wearable textiles in residual waste was calculated and the various factors were discussed. The results of this work showed that on average 5.1 kilograms of old textiles per capita and year could be collected from residual waste and more than half of them were still wearable and therefore suitable for reuse. Differences between the individual areas could be deduced, for example, that the amount of discarded wearable textiles was lower in rural regions than in urban or intermediate areas.

Mobility Modular Load Carriers: Development of modular reusable load carriers for the train construction industry

Daniel Orth¹, Kevin Kaltenbrunner¹, Christian Pladerer¹ & Georg Vinzenz²

¹⁾ Österreichisches Ökologie-Institut, Vienna, Austria

²⁾ Siemens Mobility Austria GmbH, Vienna, Austria

As part of the project, Siemens Mobility Austria GmbH is developing modular reusable load carriers (MMLC) to make the logistics for complex rail vehicle projects more sustainable. The innovative load carriers are flexible, can be dismantled and reduced in volume, which means they can be used for various components across different projects. This enables a significant reduction in disposable packaging and the associated waste. The project includes the design, prototype procurement, extensive test phases and an ecological evaluation using life cycle analyses and CO₂ balances. The Austrian Institute of Ecology provided support with the ecological evaluation of the processes and comparative CO₂ balances of the disposable and reusable load carrier systems. The expected ecological benefits include considerable savings in packaging waste and increased resource efficiency. The adaptation of the load carrier systems in order to reduce greenhouse gas emissions to a relevant extent is a long-term goal. With this project, Siemens Mobility Austria is setting an example for responsible and future-oriented production, which also offers long-term economic benefits through reduced packaging and transportation costs.

A web-based tool to apply the UNFC for the assessment and classification of anthropogenic resource recovery projects as a basis for decision-making

Bhagya Jayasinghe¹, Iman Dorri¹, Alireza Sobouti¹, Juan Antonio Munizaga-Plaza¹ & Soraya Heuss-Aßbichler¹

¹⁾ University of Munich (LMU), Department for Earth and Environmental Sciences, Munich, Germany

The global shift towards sustainable energy systems demands a reliable supply of critical raw materials essential for technologies like batteries, wind turbines, and solar panels. As a result, there is an increasing focus on recovering secondary raw materials from various waste streams, aligning with global sustainability goals and circular economy principles. The United Nations Framework Classification of Resources (UNFC) offers a comprehensive framework for classifying projects by considering the level of confidence in the recovered quantities from anthropogenic resources, technical feasibility, and environmental and socio-economic viability.

This paper introduces a novel web-based tool developed within the Horizon Europe project FuTuRaM, which is designed to apply the UNFC systematically to anthropogenic resource recovery projects. The tool is structured around a seven-stage procedure that ensures a consistent and transparent evaluation process. These stages include initial information collection, project definition, controlling factors identification, data gathering and project evaluation, categorization of the controlling factors, UNFC classification, and comprehensive reporting. By incorporating these stages, the tool provides a holistic assessment, taking into account socio-economic, environmental, legal, and technical aspects including infrastructure alongside the quality and quantity of input and output materials. The development of the web-based tool involved creating a robust architecture comprising a front-end for user interaction, a back-end built on the Django framework, and a MySQL database for data management. This design ensures efficient data processing and user-friendly interactions, enabling comprehensive project evaluations. The tool supports the maintenance of transparency and completeness in the presentation of results. It takes into account the fact that the different recipients of the reports require different levels of detail in the classification results. Recommendations for further measures were developed. This forms the basis for trust-based communication and fact-based decision-making. A case study on the Bollrich Tailing Storage Facility, which contains significant quantities of critical raw materials like Cobalt, Gallium, and Indium, demonstrates the tool's practical application. The project was assessed using the seven-stage procedure, resulting in a medium confidence level (G2) for recoverable material quantities and low ratings for technical feasibility (F3.2) and environmental and socio-economic viability (E3.3). This case study highlights the tool's capability to guide users through a structured evaluation, ensuring compliance with the UNFC framework and providing valuable insights into project strengths, weaknesses, opportunities, and potential risks.

In conclusion, the development of this web-based tool represents a significant advancement in the classification and evaluation of anthropogenic resource recovery projects. By providing a standardized, efficient, and user-friendly platform, the tool supports the systematic assessment and classification of projects, promoting sustainable resource management and supply. Future enhancements will focus on expanding the tool's applicability to a broader range of waste types and incorporating user feedback to maintain its relevance and effectiveness in the industry, ultimately supporting better decision-making and fostering the sustainable supply of critical raw materials.

Assessment of plastic recyclates regarding DNA-reactive mutagenicity with *in vitro* Bioassays

Elisabeth Pinter¹, Elisa Mayrhofer¹, Jessica Schlossnikl², Veronica Osorio Piniella¹ & Vasiliki-Maria Archodoulaki²

¹⁾ OFI – Austrian Research Institute for Chemistry and Technology, Vienna, Austria

²⁾ TU Wien, Institute of Materials Science and Technology, Vienna, Austria

Both consumers, brand owners and European Union initiatives such as the Green Deal, demand the use of recycled plastics in food packaging. The draft of the Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) already demands mandatory recycled content for sensitive applications, such as food contact, by 2030. This includes recyclates from PET as well as from other plastics such as polyolefins or polystyrene. Currently, however, only PET recyclates from mechanical recycling under certain conditions and closed-loop systems are permitted for food packaging from the post-consumer stream (PCR). In order to be able to use other polymers for sensitive applications, recyclates must be examined in depth. DNA-reactive, mutagenic substances, which have more than 100 times lower threshold limits than other substance classes in the EFSA's assessment of recycling processes, are particularly important here, as they are considered critical to health. In the safety assessment of recycling materials and processes, it must therefore be demonstrated that these substances can be excluded as contaminants or are sufficiently removed by the processes.

Since DNA-reactive mutagenic substances have very diverse properties, chemical analysis was combined with *in vitro* bioassays in several research projects to analyse a variety of recyclates. The results confirmed that food grade recycled PET approved for food contact can be classified as safe. However, some polyolefin and polystyrene recyclates were found to be systematically contaminated with DNA-reactive, mutagenic substances. In particular, degradation products produced during recycling of decorative elements, such as labels or printing inks, have been identified as an important risk factor for these critical contaminations. The generated results can help to differentiate between safe and potentially critical recycled plastics and which contaminants need to be removed in the future.

Circular Economy Approaches for polymer out of home advertising posters

Paul Steiner, Nicole Lasslop, Fabian Weller, Maximilian Auer, Jannick Schmidt & Jörg Woidasky

Pforzheim University, School of Engineering, Sustainable Product Development Group, Pforzheim, Germany

Polymer and also paper or cardboard posters are relevant media for outdoor advertising. They are e. g. used in election campaigns regularly. The publication provides circular economy approaches for such posters in general, but more specifically for polypropylene (PP) posters. Experimental investigations of used corrugated posters made from PP include combinations of shredding, washing, decoating, extrusion, and injection molding. The effects of these steps on the polypropylene material recycling were quantified by determining the rheological, chemical and mechanical properties. The results suggest only minor thermo-oxidative changes during recycling, as only minor effects on the tensile strength of the recycled PP were observed. However, there are remarkable differences in the elongation at break, so that the use of washing processes for the reprocessing of used corrugated posters from outdoor applications is recommended to improve the circular product properties. Election posters seem generally well suited for recycling, even if the eco-design potential of these outdoor advertising media has not yet been fully exploited.

The Role of Temporary Material Hub and Final Sinks in Circular Economy

Romana Kopecká, Marlies Hrad & Marion Huber-Humer

BOKU University, Department of Water, Atmosphere and Environment, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

Landfilling remains a widely used practice worldwide, despite being the least preferable option according to the EU's waste hierarchy and it is going to be strongly restricted in future. The waste sector must be prepared to manage waste diverted from landfills and to accommodate non-hazardous and potentially valuable waste materials that are currently being either energetically recovered or landfilled. These materials must be reintroduced into the anthropogenic or natural cycles to ensure adequate material recovery. Conversely, the waste sector also needs to find new ways for the safe disposal of non-recyclable and potentially harmful materials, which are still found in our daily products as well as in sector-specific applications (e.g., in the medical or energy sector). These materials must be removed from anthropogenic cycles and require safe disposal to maintain clean material cycles. Future-oriented concepts, such as temporary material hubs and final sinks, are proposed to ensure that waste materials do not pose a danger to human health and the environment in the long term, while also optimizing the reasonable use of circulating resources.

Digital product passport as a quality certificate and for the traceability of products and materials

Michael Krisper¹

¹⁾ Pro2Future GmbH, Area Cognitive Products, Graz, Austria

The implementation of sustainability throughout the entire supply and value chain requires the verification of the origin, CO₂ emissions, energy consumption and material use of products and goods. The challenge is that each economic domain has distinct requirements. The shelf life of food is relatively short, whereas buildings have a lifespan of 50 years or more. Steel is a continuously produced, whereas electronics are sold in discrete units. The harvesting, distillation, storage, and bottling of grain and whisky are conducted in sacks, barrels, tanks, and bottles. Waste is delivered and transported in containers, tubs and sacks, but is subject to continuous processing. Furthermore, the data formats and technologies employed become obsolete, proprietary, or incompatible over time. Additionally, there are instances when data must be read rapidly and offline, whereas in other cases, it is crucial to guarantee the authenticity and liveness of the data.

To address these challenges, we propose the implementation of a dual online/offline passport for digital products with interoperable blockchain protocols and convertible and traceable container and unit logic to represent continuous as well as discrete product and material flows.

Mehrweg-Bouteille - Concept and implementation of a reusable system for the 0.75 litre wine bottle in Austria

Victoria Menedetter¹ & Christian Pladerer¹

¹⁾ Austrian Institute of Ecology, Vienna, Austria

Whether milk, lemonade or beer - the returnable bottle is currently experiencing a revival. In comparison, there are hardly any reusable bottles for wine. This is even though wine would be pre-destined for a reusable system due to the high market share of domestic wines in Austria. In 2022, the market share of domestic wines in food retail was 67.5%, in the catering sector even 90.5 %. A recent study shows, that around 48% of CO₂ emissions in wine production are caused by single-use wine bottles. The ecological impact could be significantly reduced by using a reusable bottle. In addition, reusable systems have been proven to help conserve resources and avoid waste and can also bring economic benefits if used correctly.

In the "Mehrweg-Bouteille" project, a team of experienced players from the wine, logistics, sustainability and packaging industries have joined forces to develop a reusable (ger.: "Mehrweg") system for the 'Bouteille' (0.75 litre bottle) for wine and establish it on the Austrian market. In the concept phase, the team has been working on solutions to challenges such as logistics, cleaning and consumer habits since July 2023 and will then implement them in the pilot phase in 2025. The "Mehrweg-Bouteille" is intended to achieve positive ecological effects (waste avoidance, resource conservation, CO₂ reduction) and encourage the wine industry to switch to sustainable reusable solutions. The reusable system developed in this project should be accessible to the entire Austrian market, so that - following the example of the beer bottle - all Austrian winegrowers have the opportunity to join a standardised reusable system and thus contribute to a circular wine industry.

Post-war waste management in the Ukraine

Olena Hanoshenko ^{1,2} & Marion Huber-Humer ¹

¹⁾ BOKU-University of Natural Resources and Life Sciences, WAU, Institute of Waste Management and Circularity, Vienna, Austria

²⁾ National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Department of Applied Ecology and Environmental Management, Poltava, Ukraine

The full-scale invasion of the territory of Ukraine by the Russian Federation is accompanied by the destruction, pollution, and destruction of environmental components, the socio-economic sphere, and infrastructure facilities. In this regard, there is a constant generation of construction/demolition waste, the quantitative and qualitative composition of which is currently difficult to assess. The characteristics and composition of destruction waste generated as a result of military actions differ from ordinary construction waste. It may contain the remains of various objects, things, equipment, etc. that were in the buildings at the time of destruction. Moreover, when explosive devices are detonated, they contain pollutants, which makes it difficult to identify and sort such waste. Step-by-step instructions for handling demolition waste have already been developed for Ukrainian communities affected by the military actions. In most of these areas, special sites have been set up to store "sorted" waste. However, there is an urgent need to assess the generation, sorting effectiveness and composition of such waste. Moreover, due to the change in the daily lifestyle and consumption behavior it is expected that also the municipal solid waste (MSW) generation and composition has changed. And finally, a lot of infrastructure in the waste management sector has been destroyed, which means that big amounts of unsorted and untreated waste currently end up in landfills, most of which are uncontrolled.

Thus, the purpose of the study is to assess or measure the generation and composition of post-war demolition/construction waste as well as MSW during and after the war as a basis for further planning and decision-making. In the frame of a 2-year MSC4Ukraine fellowship in Austria, a scientifically based concept for modern and future-targeted (post-war) Ukrainian waste management and landfill aftercare systems will be developed. Research questions are mainly targeted at (1) How to scientifically assess/measure MSW generation and composition in post-war/post-disaster regions; (2) What are suitable waste management concepts (including modern collection and recycling technologies as well as organizational/business models) to transfer and implement in the case study region Poltava (Ukraine); (3) Which landfill technologies, emission reduction methods and reliable monitoring and aftercare concepts for landfills are available and can be further developed/adapted so that they can be applied under the conditions at Ukrainian landfills.

Major expected outcomes are the development of an implementation guideline for applying modern waste management and landfilling concepts in the case study region Poltava in Ukraine after the war. The methodological approach and first results from this study will be presented as a poster.

Contamination on press felts used in the paper industry

Alexia Tischberger-Aldrian¹, Karin Schinner¹, Nicole Weber¹, Ivica Duretek², Klaus Haiden³, Birthe Denneler⁴ & Jan Freudenberg⁴

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

²⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Polymer Processing, Leoben, Austria

³⁾ Andritz Fabrics and Rolls GmbH, Gloggnitz, Austria

⁴⁾ Andritz Fabrics and Rolls GmbH, Reutlingen, Germany

Press felts are used as clothing textiles for paper machines in the paper industry and accumulate every 30-100 days as waste, which is currently thermally recycled. The press felts are in direct contact with the paper in the paper machine and absorb numerous substances used in the paper manufacturing process during the utilization phase. This article presents the results of investigations of press felts from production lines for different papers (packaging, hygiene and graphic papers).

A total of six different press felts were available, one of which was new (P_N), the rest had been used in different paper machines to manufacture various products. The production lines included graphic paper (P_G), tissue (tissue paper (P_T) and three different packaging lines (packaging paper, cardboard) (P_{P1} , P_{P2} , P_{P3}). The new and the used press felts were characterized analytically.

Basically, the contamination of the press felts depends on the paper production line in which they were run. On the one hand, the type of substances present and the quantity for the different papers differ. P_{P2} and P_{P3} tend to be the most heavily contaminated; these were used in the production of cardboard and packaging paper, where traditionally "lower quality" waste paper is also used as a raw material, thereby increasing the input of heavy metals in particular. High levels of calcium, aluminum, magnesium and silicon solids can be traced back to the use of frequently used fillers such as calcium carbonate, kaolin, bentonite and talc. Sulphur and calcium could theoretically also come from fillers such as gypsum. Titanium is primarily due to titanium dioxide. Barium is classically introduced via barium sulphate ('Blanc fix').

The presence of magnesium sulphate (auxiliary agent) or aluminum sulphate (retention agent) is also possible in P_{P1} or P_G and P_{P1} . If waste paper is used, anionic surfactants are often used as flotation agents (see P_{P3}). In the case of press felts, those in which waste paper was used as a raw material have a higher heavy metal content. The identification of the available dyes yielded the following results: An acid dye and a developed disperse dye could be detected in P_G . An acid dye was also detected in P_{P1} and a reactive dye in P_T . There is also a high probability that a metal complex dye is present in P_{P1} and P_T .

It is not possible to clearly identify the chemical substances present on the press felts on the basis of the tests carried out and the results obtained. In conjunction with corresponding information from the literature, the presence of some substances can probably be inferred (calcium carbonate, barium sulphate, etc.). Due to the large number of substances used in the paper manufacturing process and because the type and quantity of the substances used are generally not disclosed by the companies, it is not always possible to trace the origin of the elements and compounds introduced into the press felts. However, this article gives an impression of the elements and compounds to be expected, which are particularly important for an assessment under waste legislation and the recycling process.

Do they break? PFAS degradation by non-thermal plasma

Jan Back¹, Rania Bakry², Johanna Freilinger², Maria Fürhacker³, Sebastian Handl³, Claudia Hledik³, Simon Jabornig⁴, Marc Koch¹, Jana Marx^{1,2}, Madeleine Larch¹, Thomas Obholzer⁵, Maximilian Pupp^{1,5}, Marco Rupprich⁵ & Martin Spruck¹

¹⁾ MCI – The Entrepreneurial School, Department of Environmental, Process & Energy Engineering, Innsbruck, Austria

²⁾ University of Innsbruck, Institute of Analytical Chemistry and Radiochemistry, Innsbruck, Austria

³⁾ University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Institute of Sanitary Engineering and Water Pollution Control, Vienna, Austria

⁴⁾ SFC Umwelttechnik GmbH, Salzburg, Austria

⁵⁾ Ixonexx GmbH, Innsbruck, Austria

Per- and polyfluorinated alkyl compounds (PFAS) are persistent organic chemicals that result in significant negative human health and environmental effect. Therefore, limits have been listed in the proposals of the revision of the EU groundwater directive and the EU environmental standards directive. In order to meet these limits, the release of PFAS will have to be controlled at their point sources, i.e. contaminated sites and wastewater treatment plants. Previously, micropollutants and other contaminants have successfully been removed from different water matrices by advanced oxidation processes such as non-thermal plasma (NTP). However, the degradation of PFAS is particularly challenging due to the extremely stable C-F bond. In this contribution, degradation tests of the substance perfluorooctanoic acid (PFOA) with NTP were carried out as part of the KPC project PFAS-Trap and a reduction of up to 94 % was measured in 1440 min. A process concept is presented. The role of the discharge with the plasma-carrying air could not be resolved definitively and requires further investigation.

Closure and recultivation of landfills with low hazard potential in the state of Brandenburg

Ulrich Stock¹ & Roman Dinslage²

¹⁾ fmr. The Ministry of Agriculture, Environment and Climate Protection, Potsdam, Germany

²⁾ intecus GmbH, Potsdam, Germany

There are more than 5,000 closed landfills in Brandenburg. Most of them stopped dumping waste in 1991/1992 as a result of the reorganization of waste management immediately after the political change. There was a need to develop concepts for remediating and recultivating these landfills. The risk potential of these landfills is mostly low. The Brandenburg State Environmental Agency developed a guideline according to which the landfills were to be assigned to 4 categories according to predefined criteria, depending on the specific location situation. Different requirements for the security measures were derived for each category. If a risk assessment is available, the categorization can also be carried out based on the risk assessment.

The presentation describes the legal framework for waste disposal, explains the categorization procedure and names the security measures to be carried out for each category. The location situation, assignment to a category and the security measures carried out are described using 3 individual examples.

Odor optimization of PCR Recyclates

Peter Clemenz¹, Martin Sturm¹ & Maria Schäfer¹

¹⁾ Zittau/Gorlitz University of Applied Sciences, ZIRKON, Zittau, Germany

In the last 20 years, the amount of post-consumer plastic packaging waste in Germany has been doubled. With the Green Deal, the EU is demanding that 55% of this packaging waste be recycled by 2030. In addition, the EU is planning a recycled content of 30% for contact-sensitive packaging, especially food packaging, from 2030 with new regulations for packaging (PPWR). The quality of the regranulate required for this does not exist and can currently only be achieved by chemical recycling. The regranulates from mechanical recycling of post-consumer plastic packaging are not pure, have an unpleasant smell and are often more expensive than high-quality virgin material. As part of this project, various approaches to improve the smell of PCR recyclate are being tested on a laboratory scale. The feed material used is real regranulate from the processing of post-consumer plastic packaging. A comparison is made between thermal treatment, Soxhlet extraction and the addition of additives. Evaluation of the samples is based on sensory tests and GC-MS analyses.

The best results were achieved by thermal post-treatment of the regranulate. Through thermal desorption of odor-active substances, the smell of the material improved from "very disturbing" to "perceptible, but not yet disturbing". Treatment with solvents and the addition of additives did not achieve better results despite greater effort.

The Role of the Circular Economy in Industry 5.0

Susanne Roßkogler¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing and Waste Management, Leoben, Austria

Around two and a half years ago, the EU proclaimed the 5th Industrial Revolution.

It is obvious that it differs from the previous revolutions, especially the first three industrial revolutions, in that it is not a retrospective view of disruptive technologies that significantly influenced social life, but rather a proclaimed revolution in which the starting parameters are to be defined.

Its significance, implementation and technologies are still largely unexplored and are only slowly finding their way into science and application.

The question of why the EU took this step is clear: the importance of industry for our continent is undisputed and so is the risk of being left behind by large industrialized countries such as China and the USA. With Industry 5.0, the EU is taking steps to counteract this in a new way.

The industry of the future should be people-centered, i.e. for the benefit of the employees in the companies and respect the limits of the planet.

The concept of the circular economy, on the other hand, is largely theoretically mature with the circular economy plan, and implementation is already taking place at a high level in some companies, but also on a laboratory scale. But do the EU's sustainability-focused ambitions also address the circular economy and its technologies, and if so, to what extent?

But does this automatically mean implementing a fully circular economy in this context?

That is the task of this article to analyze any possible connection here. To this end, a literature review was carried out to clarify the questions of understanding the new industrial revolution and the effect on our circular economy goals.

New composites made from biopolymers and regional natural fibers - a promising material for the future?

Anett Kupka, Marc Krech & Maria Schäfer¹

¹⁾ Hochschule Zittau/Görlitz, ZIRKON, Zittau, Germany

The development of new materials, especially in the plastics sector, is widespread (Beus et al. 2019). The substitution of glass and carbon fibers with natural fibers on the one hand and the substitution of petroleum-based polymers with bio-based and degradable raw materials on the other are two topics in this research area to which the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz is devoting itself as part of the LaNDER³ project. "Living and producing at the industrial level of the 21st century with what nature provides - natural fibers, (bio)polymers, circular economy and renewable energies - this is where we see our future." (University of Applied Sciences Zittau/Görlitz 2024). As part of this research network, questions were asked about recyclability and, in particular, sortability, which the research group at ZIRKON is working on and the results of which are presented as examples on the poster.

Viable recycling approaches to electrolyser stacks

Richard Yaw Nti¹, Thomas Nigl¹, Hannah Aster², Lukas Zeilerbauer² & Marianne Kapp³

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Department of Environmental and Energy Process Engineering, Leoben, Austria

²⁾ Energieinstitut an der Johannes-Kepler-Universität Linz, Linz, Austria

³⁾ HyCentA Research GmbH, Graz, Austria

To ensure the sustainable use of the world's limited resources, it is essential to integrate principles of circularity into every new technology or product development. The ReCycle project deals with the Reduction of environmental impact and related recycling capabilities (of hydrogen technologies) and aims to apply these circularity principles to technologies within the hydrogen value chain.

The project will analyze the state-of-the-art recycling chain for the proton exchange membrane (PEM) electrolysis system and its components, such as the porous transport layer (PTL) and bipolar plates (BPP). It will identify the best technical and economic recycling chains and calculate the recycling rate. By examining the recycling chain, the project will pinpoint weaknesses and challenges while considering environmental, economic, and sustainability factors. This analysis will lead to the development of improved or new processes, resulting in an enhanced overall recycling chain.

Second-life strategies for the PTL and BPP will be evaluated, including potential reuse in less demanding applications. The feasibility of regeneration and re-functionalization will be assessed, along with technical and economic viability. A testing procedure for second-life applications will also be developed.

Various recycling and second-life strategies (circular scenarios) will undergo evaluation using a newly developed sustainability assessment tool based on the 17 SDGs. This tool will also be applied to two scenarios of hydrogen production, transport, and storage to demonstrate its versatility. Eco-design requirements and recommendations will be derived from the recycling and second-life strategies.

Plastic transformation in the composting process

Josef Adam¹, Jessica Brantner¹, Martin Wellacher², Cornelia Riegler² & Franz Poschacher³

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

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

³⁾ Poschacher Kompost e.U., Kraubath an der Mur, Austria

The discharge of plastics into nature is a topic which is gaining more importance constantly. One path of discharge of microplastic into the environment is composting. As part of the project "Plastic Free Compost" which is funded by the FFG, the plastic transformation in the course of the composting process was examined. In this context, the decomposition, fragmentation and multiplication behavior were analyzed. Furthermore, changes in the material properties at different stages of the composting process were studied using tensile tests. The goal was to gain a deeper understanding of the chemical and mechanical transformation of plastics caused by composting.

As a research method for the mentioned questions, organic household waste was doped with different plastic products. On the one hand, orange bags made of Low-Density Polyethylene (LDPE) filled with a few hands full of organic waste were used. On the other hand, violet flowerpots consisting of Polypropylene (PP) came into use. Ten weeks long, the doped material was composted and treated with a turner. Every week, samples were taken from the heaps. The decomposition was followed by sieving, sorting and the mentioned tensile tests. Through these examinations, it was possible to gain new insights into the transformation of plastics in the course of the composting process. It became apparent that plastics in organic household waste pose a problem that necessarily needs to be dealt with.

Influence of treatment during the use phase on various properties of textiles

Celine Grabner¹, Thomas Fink¹, Hana Stipanovic¹ & Alexia Tischberger-Aldrian¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

What happened to the textiles during the use phase is important for both reuse and recycling. While the condition of the garment is more important for reuse (e.g. stains, tears, wear, colors washed out), the entry of certain substances (e.g. lubricating oils) can be relevant for recycling. This article deals with the question of whether various "traces" of the use phase (e.g. washing/drying, various types of soiling, UV radiation) can be detected spectrally.

For this article, commercially available, new T-shirts in the low-price segment made of three different types of fiber were purchased. These T-shirts were subjected to various treatments (washing and drying; UV radiation, staining with oil, coffee, ballpoint pen, tomato sauce, red wine). The spectroscopic examinations were carried out both on the new textiles and on all treated textiles.

The experimental test series showed that it is partly possible to distinguish "used" (aged) textiles from new ones using spectroscopic methods. For the most part, the spectral intensity differences observed are limited to a few wavelength ranges and it still has to be verified by means of further reference samples (textile pieces before and after treatment) whether the observations are also confirmed for other textile pieces. It would also be interesting to see whether the differences in intensity are more pronounced with longer-lasting or repeated treatment (e.g. washing and drying 100 times). Subsequently, it should be determined whether a systematic differentiation between new and aged garments is possible in practice for at least some questions.

Rigid packaging waste from polyolefins in separate collection in Austria for 2021

Elisabeth Jahn, Viktoria Gabriel, Manuel Pfitzner, Katrin Detter & Martin Novak
University of Applied Sciences Vienna, Section Packaging and Resource Management, Vienna, Austria

To tackle the problem of plastic packaging waste, the European Union launched the Circular Economy Action Plan as a turning point for the plastics industry: by 2030, 55% of plastic packaging must be recycled. The collection and sorting of plastic waste are the first step towards a circular economy for plastic packaging. It should be noted that, at the present time, polypropylene (PP), high-density-polyethylene (HDPE) and polystyrene (PS) are not suitable for recycling to high quality recyclates.

An analysis of the waste stream of the yellow bag and the yellow bin was carried out in 2021, with the objective of acquiring knowledge regarding the potential for recycling. Data was collected on material, shape, food or non-food, colour, closures and packaging aids - such as stickers, sleeves or direct printing. Waste analyses were carried out at three different sorting plants throughout Austria.

The results demonstrate the composition of the separate collection in 2021, where 251 kg were analysed. Polyolefin packaging and polystyrene represents for 14% of the separate collection. PP accounts 8.6% of the separate collection. The second largest amount is HDPE with 4.0%. The smallest target fraction is polystyrene with 1.3%. The composition of the fractions is very different: Two thirds of PP is used as food packaging in the form of trays or cups. In the case of HDPE, the majority of the material is comprised of non-food hollow bodies. The PS fraction consists mainly of cups used for food.

A detailed analysis of the colouring and labelling of the packaging was conducted. The results show that approximately 81% is uncoloured or white. The remaining 19% is coloured, which makes it less suitable for recycling. In terms of labelling, almost half (45%) is labelled with stickers covering less than 50% of the packaging surface and only 19% is unlabelled. This means that a large part of the sorted material has to be separated from the packaging aids to ensure high quality recyclates.

Further investigations are needed to ensure comparability of the data. In conclusion, Austria's polyolefin and polystyrene waste is very diverse and needs to be sorted accordingly to facilitate further processing and the production of high-quality recyclates.

Metallurgical dust recycling applying bioleaching and bioelectrochemical technology

Rebeka Frueholz¹, Sabine Spiess¹, Christian Weiss², Johannes Schenk³, Jan Eisenbacher-Lubensky³, Dominik Wolmuth⁴, Josephine Mueller⁵ & Marianne Haberbauer¹

¹⁾ K1-MET GmbH, Linz, Austria

²⁾ Chair of Process Technology and Environmental Protection, Montanuniversitaet Leoben, Austria

³⁾ Chair of Ferrous Metallurgy, Montanuniversitaet Leoben, Austria

⁴⁾ voestalpine Stahl Donawitz GmbH, Donawitz, Austria

⁵⁾ voestalpine High Performance Metals GmbH, Vienna, Austria

The continuous depletion of raw materials calls for the establishment of circular economical structures in the waste management sector, with focus on recycling of waste materials. Bioleaching is here proposed as a method to extract metals of such residues, becoming then available as raw materials for various industries. During bioleaching, microorganisms are used to interact with minerals in order to leach metals such as copper or iron. Within the scope of the INNOMET project, the potential of chemolithotrophic bacteria was evaluated to extract metals from metallurgical dusts originating from steelmaking processes. Chemolithotrophic bacteria such as Acidithiobacillus ferrooxidans or Sulfobacillus thermosulfidooxidans are able to oxidize reduced inorganic sulfur compounds and ferrous iron, gaining energy through these reactions, and further enabling the solubilization of metals.

Subsequently, the recovery of solubilized metals is investigated. As an example, the recuperation of the heavy metal zinc from leaching solution is examined using bioelectrochemical technology. Within this approach electroactive microorganisms are used to degrade organic waste anaerobically and generating electricity for the deposition of zinc onto an electrode. The use of microorganisms in electrochemical systems has the advantage of significantly reducing the energy demand for metal recovery compared to electrowinning. The coupling of bioleaching and bioelectrochemistry allows an innovative, environmentally friendly, and energy efficient bio hydrometallurgical approach for metal recycling from metallurgical dusts.

Funding: The financial support of the Province Styria and the Styrian Business Promotion Agency ("Zukunftsfoonds Steiermark") within the project INNOMET (PN 1507) is gratefully acknowledged. Further, the authors gratefully acknowledge the funding support of K1-MET GmbH, Metallurgical Competence Center. K1-MET is a COMET Centre within the COMET – Competence Centers for Excellent Technologies Program and funded by the Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology; the Federal Ministry for Labor and Economy; the provinces Upper Austria, Styria and Tyrol as well as the Steirische Wirtschaftsförderungs-gesellschaft m.b.H. (SFG) and the Standortagentur Tyrol. Furthermore, we thank Upper Austrian Research GmbH for the continuous support.

Recycling of construction and demolition waste in forest road construction

Kerstin Pfandl¹ & Ingrid Winter¹

¹⁾ Office of the Regional Government of Styria, Department 14, Water Management, Resources and Sustainability, Waste and Resource Management, Graz, Austria

Construction and demolition waste is one of the most massive waste streams in Austria. In addition to the recycling requirement for construction and demolition waste and the targets for its recovery, the Austrian legislator has provided for a landfilling ban for selected mineral waste streams since the beginning of 2024. One way to usefully recycle mineral construction and demolition waste is to process qualitatively suitable waste into quality-assured recycled construction materials and use these in the course of constructing or maintaining forest roads. Based on current waste management practice, this article summarizes the aspects that need to be taken into account (e.g., legal requirements, required qualities, responsibilities) and shows, on the one hand, how the proper use of recycled construction materials in forest road construction can be implemented on a large and small scale and, on the other hand, what future potential can be estimated for this application. The focus is on recycled construction materials made predominantly from recycled aggregates in accordance with the Austrian Recycling Construction Material Ordinance.

Remediation of the contaminated site „ST32: Halde Schrems” – A case study

Jürgen Maier¹, Thomas Bruggraber¹ & Dagmar Vorraber¹

¹⁾ RM Umweltkonsulenten ZT GmbH, Austria

The contaminated site „Halde Schrems” in Schrems, near Frohnleiten, Styria, is a historical landfill used for the deposition of excavation material from the local lead and silver mining and slag from a nearby smeltery since the 13th century. In 2019 the site was reported as a contaminated site with priority 1 by the Umweltbundesamt GmbH. Basically, the soil in the area of the mine dump was contaminated with lead and zinc, as well as cadmium and mercury. Furthermore, increased concentrations were found in plants and vegetables from on-site gardens. Therefore, and because more than half of the area was used for residential purposes, the remediation was executed with the aim of safe use of the gardens and grown vegetables. The chosen remediation procedure was to replace the contaminated soil with uncontaminated soil. This exchange was performed in two phases: first all places with children under 18 years and in the second phase all the remaining sites used for housing and gardening were remediated. The fact, that this soil exchange was carried out in a housing area and therefore on many smaller zones instead of one large area made the remediation very challenging. Coordination and education of the residents as well as the consideration of their objections and implementing their demands were main elements for completing the remediation successfully. This case study describes the process of the remediation during the field work considering all relevant aspects up to the successful completion of this site from the perspective of the water rights supervisory body.

Determination of PFAS contamination in two national parks and its accumulation in plant samples

Hannes Weinbauer ¹, Romana Hornek-Gausterer ², Daniel Tomsik ¹, Oliver Mann ¹ & Werner Wruss ¹

¹⁾ ESW Consulting Wruss ZT GmbH, Vienna, Austria

²⁾ FH Technikum Wien, Vienna, Austria

Environmental samples were taken in the Danube Wetlands (Donauauen) and Lake Neusiedl National Parks to determine background levels of perfluorinated and polyfluorinated alkyl substances (PFAS). For this purpose, water, sediment, soil and plant samples were taken and analysed for the 20-EU-PFAS. Long- and short-chain perfluorocarboxylic acids (PFCA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) were detected in all sample matrices. The PFOS contamination was particularly noticeable in the plant samples from the main stream of the Danube and from Lake Neusiedl at the Illmitz lido. In the plant samples, perfluorobutanoic acid (PFBA) was the dominant individual substance, accounting for more than 75 % of the sum of 20 EU-PFAS, with an average PFBA contamination of over 1 µg/kg dry matter. The results of this study showed that background levels of PFAS are to be expected in eastern Austria, even in national parks. The dominant components are perfluorocarboxylic acids (PFCA) from C4 to C9 and PFOS. These can be assigned to different use groups. However, the origin of measured PFAS contamination can hardly be assigned, as different PFAS are often used in the same areas of application or individual PFAS have been substituted accordingly due to restrictions. Atmospheric input very likely plays a significant role, as do surface waters influenced by industrial wastewater (bank filtrate), as well as various leisure activities and sports equipment. It has been shown that even in extensive protected areas, an input of PFAS can be detected and that individual PFAS compounds, especially PFBA, can accumulate in a wide variety of plants. The measurements at the Illmitz lido clearly show the anthropogenic influence of PFAS in the environment. It is known that sails and windsurf boards are sometimes treated with PFAS-based coatings to improve the water-repellent properties and protect the material from UV rays and salt. Wetsuits can also contain PFAS-based coatings to increase water repellency and reduce drying time. The use of PFAS in cosmetic products has also been documented. These would be conceivable sources of input at a site influenced by water sports and bathing activities. With regard to the soil samples, the measured concentrations are well below the limit value of 2 µg/kg required in the Federal Waste Management Plan 2023 (Bundesabfallwirtschaftsplan) and can therefore be clearly identified as background pollution.

Data basis for AI systems - case studies and their challenges

Alexia Tischberger-Aldrian¹, Klemens Winkler², Valeria Fonseca Diaz³, Roman Rainer³, Felix Strohmeier⁴, Melanie Neubauer⁵, Elmar Rückert⁵, Gerhard Ebenhofer⁶, Thomas Pönitz⁶ & Gerald Koinig¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

²⁾ K1-MET GmbH, Area 3, Linz, Austria

³⁾ Software Competence Center Hagenberg, Hagenberg, Austria

⁴⁾ Salzburg Research Forschungsgesellschaft mbH, Intelligent Connectivity, Salzburg, Austria

⁵⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Cyber Physical Systems, Leoben, Austria

⁶⁾ PROFACTOR GmbH, Visual Computing, Steyr-Gleink, Austria

Artificial intelligence (AI) is in vogue and everyone's expectations are correspondingly high. However, many people are not aware that AI systems require extensive training and that the selection and provision of training sets have a decisive influence on the accuracy and functionality of the AI. In this article, challenges in the provision of data for AI systems are presented using three case studies for the KIRAMET lead project.

The project team of the KIRAMET lead project, consisting of 14 corporate partners and 5 scientific partners and a very interdisciplinary partner structure, is pursuing the overarching goal of using AI-based methods to increase the efficiency of the existing recycling process in order to provide large quantities of old scrap in the form of high-quality and nationally recyclable metal fractions at an economically justifiable cost, taking ecological aspects into account, and thus making a significant contribution to climate neutrality, raw material supply and increasing real recyclability.

The KIRAMET project consortium sees metal recycling as an opportunity and the potential to actively use AI as a comparatively inexpensive technology for the entire recycling industry as a supporting tool for a wide variety of purposes. However, the prerequisites are, on the one hand, a high degree of digitalization and, on the other hand, available data in the right scope, level of detail and information content. At present, there are still serious deficits here, as data may only be available selectively or owned by certain stakeholders. In addition, an insufficient level of digitalization in the recycling industry makes it difficult to use AI. For metal recycling, information on the composition of individual product components and the composition of the entire product would be of great value. For certain issues, data can or must even be collected individually by individual companies and made available for the AI systems.

In other areas, the recycling industry relies almost exclusively on the provision of data from producers or distributors or from the preceding process steps in the value creation cycle and their stakeholders. This means that the data available in e.g. digital product passports must not be limited to, for example, the indication of ferrous and non-ferrous metals in the entire product, but must contain far more detailed information on alloying elements and components. However, it will neither be useful nor necessary to specify the exact alloy or composition of every component, no matter how small. It will be up to the recycling industry to define what information and data is actually needed and to what level of detail, and this is where KIRAMET will be able to make a significant contribution. Cross-company and cross-sector AI systems will only have a chance to develop their full potential if ways are found to make data sharing possible.

CO₂ balancing for a chemical-physical treatment plant

Hannes Menapace¹ & Felix Kleinsasser¹

¹⁾ Peter Seppele Gesellschaft m.b.H., Feistritz/Drau, Austria

Due to new legal requirements (e.g. Supply Chain Act, sustainability reporting), various environmental management systems and requests from customers, existing material flow balances for treatment efficiency are often no longer sufficient for the provision of data. Customers therefore increasingly want to receive information on the GWP emissions generated during waste treatment, in order to be able to integrate this data into their reporting on waste generation or to include these parameters in tenders as possible additional decision criteria for the evaluation of offers. In the specific case, a CO₂ balance was drawn up for a chemical-physical treatment plant. The obtained values were compared with the CO₂ volume which is generated for the transport of the waste (primarily waste from the customer, secondarily waste from the plant itself to downstream recipients). Finally, the change in the percentage distribution of emissions from treatment and transport was assessed in the paper for a possible switch from conventional diesel fuel to alternative paraffinic diesel (HV100).

Digital Product Passport: Enabling Sustainable Supply Chain Management for Electric Vehicle Batteries

Claus Mersch¹, Felix Strohmeier² & Maria Dos Santos¹

¹⁾ iPoint-Austria GmbH, Research & Innovation, Vienna, Austria

²⁾ Salzburg Research Forschungsgesellschaft mbH, Intelligent Connectivity, Salzburg, Austria

Electric vehicle batteries are among the first products to be required to comply with a Digital Battery Passport (DBP). The Circular Economy Pass research project aims to evaluate the feasibility of a DBP and associated data exchange to improve the sustainability and circularity of automotive products.

In addition to technical interviews and workshops with industry stakeholders to better understanding of their needs; the study developed two DBP prototypes, encompassing passport creation, user rights management, data transfer between different systems (e.g. software solutions, Catena-X EDC connector), etc.

First results show that the DBPs will enable all potential users along the supply chain to make responsible decisions, transfer passports and relevant information, etc. ensuring more sustainable products.

Recycling of resin-bonded grinding tools

Sabrina Sasse¹, Sebastian Pentz¹, Lukas Lämmermaier¹, Niklas Diller¹ & Daniel Vollprecht¹

¹⁾ Institute of Materials and Resource Management, Chair of Resource and Chemical Engineering, University of Augsburg, Augsburg, Germany

Resin-bonded grinding wheels are used in all material processing industries, with 30 to 50 % of each wheel typically remaining as waste. The production of abrasives, such as fused aluminum oxide, is highly energy intensive. To date, recovering pure and resin-free abrasive grains has not been possible, which is why these wheels are landfilled and recycling is not yet feasible. This study, commissioned by the Research Association for Grinding Technology (Forschungsgemeinschaft Schleiftechnik e.V., FGS), investigates various separation processes, including mechanical, chemical, and thermal methods. The research involved a combination of techniques: mechanical pre-shredding with a single-shaft shredder, separation of the glass fiber fabric using a zigzag sifter, thermal treatment under oxidizing conditions, and removal of remaining resin residues with an air jet mill followed by water rinsing. This comprehensive approach successfully yielded high-quality recyclates. The purity of the recycled materials was evaluated using scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDS).

Holistic Sustainability Assessment of Cosmetic Packaging

Michelle Klein¹, Anna Oleynikova², Charlotte Werner², Manfred Tacker² & Silvia Apprich¹

¹⁾ FH Campus Vienna, Research Center Sustainability Assessment and Packaging Solutions, Vienna, Austria

²⁾ Circular Analytics TK GmbH, Vienna, Austria

The objective of the European initiative is to integrate the packaging industry into a closed-loop system. This includes the obligation to use only recyclable plastic packaging in the future and to achieve ambitious recycling rates for all packaging materials. These requirements increase the demand for sustainable packaging solutions. The cosmetics industry is required to combine quality assurance with holistic sustainability by taking recyclability and environmental impact into account. It will be essential for the industry to review and optimise existing packaging in order to achieve EU targets.

The model of holistic environmental sustainability assessment of packaging provides an assessment method that incorporates all relevant aspects of packaging sustainability and thus enables design optimisation for country-specific collection and recycling systems. It is based on the three pillars of product protection, environment and circularity, and the relevant assessment parameters were selected on this basis. As the selected samples are products that are already on the market, it is assumed that product protection is adequate.

In terms of the environment, the parameters analysed included direct environmental effects (streamlined LCA), indirect environmental effects due to product residues, use of certified materials and packaging efficiency. For the assessment of circularity, the parameter of consumer involvement was qualitatively evaluated, and the proportion of recyclates and renewable raw materials was calculated. In addition, the technical recyclability was determined for Germany, Austria and Switzerland.

Over two hundred packaging samples were requested from brand manufacturers, packaging producers and retailers in the cosmetics industry in the DACH region. These samples included products such as shampoo, hair gel/wax, hand cream, body lotion, face cream and serums. The packaging specifications were analysed based on the provided data. Any missing data was supplemented by additional measurements in the laboratory.

The recyclability of a significant proportion of packaging on the market is less than 70% for the countries analysed, which is the minimum requirement for recyclable packaging according to the current draft of the PPWR. The design of packaging plays an important role in determining recyclability, with fully sleeved packaging solutions without proof of NIR detectability and problematic material combinations being particularly problematic. Significant discrepancies exist in terms of packaging efficiency. The carbon footprint of the packaging used indicates that differences of up to five times occur in certain product categories, resulting in the generation of unnecessarily high negative environmental impacts. The residual emptying capacity of numerous types of packaging is often inadequate, with more than 20% of the contents remaining in some packaging. In addition to the filling quantity and viscosity, the choice of packaging system exerts a significant influence on the amount of product residue. Given that the filling product typically exhibits a markedly higher carbon footprint than the packaging, it is of paramount importance to ensure that it can be emptied as effectively as possible.

The findings of this study provide comprehensive options for optimising the sustainability of packaging. The objective of optimisation is to minimise the consumption of resources and the negative environmental impact of the packaging. This requires multi-dimensional optimisation, which should not be limited to a single criterion. When introducing new packaging, it is of particular importance to select the most sustainable solutions possible.

Opportunities and risks in the recycling of tunnel excavation material

Manfred Nahold¹

¹⁾ GUT GRUPPE UMWELT+TECHNIK GMBH, Linz, Austria

In recent years, many large tunnel projects have been underway in Austria. Tunnel excavation material (TEM) is to be regarded as waste according to the Waste Management Act. Excavated material accounts for the largest share of all waste in Austria at just under 60%. Eluates from tunnel excavation material contain around 5 % shotcrete and therefore have high conductivities and high pH values up to 12,5. The state of the art for the recycling of excavated soil and TEM is documented in the Federal Waste Management Plan 2023. Accordingly, unbound utilization is limited up to a pH value of 11 (up to pH 12 if heavy metals are at very low concentrations) and up to an electric conductivity below 150 mS/m or 250 mS/m. These limits cannot be reliably maintained for cyclical drives with the use of shotcrete.

We present data from various tunnelling projects and discuss anomalies and causes. The data include the parameters pH value and conductivity of aqueous eluates, chromium (chromate) and aluminium and also nitrate, nitrite and ammonium, which originate from explosives.

TEM is produced in large quantities and recycling cannot always be regulated according to the same defined procedure. We therefore propose that the framework for recycling (based on the BAWP) be developed by means of a site-specific recycling concept for the respective TUA and its possible limit value-relevant properties. This framework should extend the range for the pH value up to 12.5 and also permit a higher conductivity if these properties do not result in the mobilization of other substances in concentrations that may be harmful to the environment.

In some cases, chromate contents of up to 1 mg/kg have been observed in eluates. Efforts must be made here to use low-chromate cements or reducing agents, provided this does not counteract the required properties of the shotcrete.

Another striking element is aluminum. Aluminum is not limited according to landfill ordinance and the federal waste management plan, but must be assessed with regard to the effects of deposition. There is therefore a need for research into the causes and mechanisms of mobilization. Furthermore, precipitation processes are to be tested under natural conditions. Tunnel excavation material with or without a small proportion of shotcrete will absorb CO₂ from the precipitation water if used unbound.

In addition to minimizing waste-chemically relevant contaminants, there is also a need for action from a waste law perspective: The permitted storage period for waste (1 year) and recycled material (3 years) must be extended. If the client does not provide solutions for disposal or recycling in advance, the market can hardly absorb large quantities of TEM, especially if the Tunnel excavation material (TEM) may only be recycled in bound form (if it contains more than 5 % concrete or pH>11 or >12 or electric conductivity above the limit of 250 mS/m). It must be taken into account in advance that the Environmental Impact Assessment (EIA) permit hardly allows any changes to large mass flows and that transports can be short and by rail in an environmentally friendly manner.

Unconventional Deposits: New Source for Extraction of Critical Metals

Olga Ulanova

Department of Mineral Enrichment and Environmental Protection, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

The global shift to a carbon-free energy system is set to drive a huge increase in the demand for critical metals. Rare earth metals are important components of many modern electronic devices including electric vehicle batteries, the magnets inside wind turbines, and copper electricity cables. Rare earth metals are also called “industrial vitamins” because even small amounts of them in alloys and other compounds improve their properties.

Today, this presents an urgent need to locate new sustainable sources of these critical metals. A potentially rich source of these metals could be unconventional resources include underground, geothermal, oil field brines, and sea water, as well as mine water of mining industry.

Mining enterprises, in particular, those on the territory of the Siberian platform, produce large amounts of pumped water, which cannot be recycled because of its high mineralization and, thus, is discharged as liquid waste either back into the ground or onto the surface. The environmental impact of liquid waste is much higher than that of solid one because of higher migration ability and, thus, larger areas of affected soil. However, groundwater is often a valuable raw material and a source of critical metals. Brines are unique groundwaters.

Central Asia is also rich in industrial groundwater, which is natural underground brines containing individual components or their compounds in quantities that, according to technical and economic indicators, ensure their cost-effective extraction and processing. For example, Kazakhstan: brines of salt lakes of the Aral Sea region, oil reservoir waters of Karachagan. Turkmenistan: brines in Karabogazgol, formation brines and mineralized waters of the North Caucasus region.

The industrial value of brines from Siberia, Kazakhstan, and Turkmenistan, North Caucasus is caused by the high contents of rare elements (lithium, rubidium, cesium, strontium, yttrium, niobium, molybdenum, thorium, zirconium etc.). The absolute concentrations of these elements in brines exceed the lower limits of the mining cut-off tens of times. Today, rare earth metals are a part of the strategic reserve of many countries.

The study was focused on the evaluation of the prospects of the hydromineral resources as unconventional source of rare elements and the exploration of the technological processes for the selective extraction of rare metals from natural and industrial multi-component brines aimed at decreasing their negative environmental impact. The environmental and economic efficiency was proved for processing complex brines and the integrated selective extraction of rare metals from sodium chloride brines and calcium chloride brines based on the ion exchange sorption, eluent chromatography, flotation, crystallization, and freezing techniques. The basic technological schemes were developed for the rare metal extraction from pit water and brines.

Application of 3D simulation technologies in the recycling industry

Thomas Kaufmann¹, Patrick Gröller¹, Manfred Hall¹, Klemens Winkler² & Alexia Tischberger-Aldrian³

¹⁾ EXARON GmbH, Haseldorf-Tobelbad, Austria

²⁾ K1-MET GmbH, Area 3, Linz, Austria

³⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

Due to the wide variety of products and materials and the elements and alloys used, metal recycling will become even more challenging and complex in the future. Metal recycling of post-consumer metal waste is already complex and involves numerous process steps. In practice, almost each of these process steps takes place with different stakeholders. This often makes the exchange of information and data and a targeted, coordinated concept for the maximum recovery of essential metals difficult. Visualizing the process can make a significant contribution to better grasping the complex reality and generating jointly optimized processes. In addition, new processes can also be simulated - without them actually existing.

Simulation and XR technologies are already being used for digital factory planning and digital product and process optimization. In some sectors, such as the automotive, electronics and pharmaceutical industries, these tools are already widely used. Simulation and XR technologies can provide significant support wherever complex processes are continuously increasing and resulting in a decrease in clarity, comprehensibility and traceability.

The simulations created as part of the KIRAMET project are intended to demonstrate that the use of these digital solutions can also provide significant added value for the recycling industry, e.g. to check and validate processes with little effort and ultimately implement them in reality in a resource-saving and sustainable manner. The KIRAMET project aims to provide large quantities of old scrap in the form of high-quality, defined and nationally recyclable metal fractions at an economically justifiable cost, thereby making a significant contribution to climate neutrality and the supply of raw materials.

In the Austrian lead project KIRAMET, these simulations and XR technologies are used to make a complex, fictitious recycling process with a large number of steps, material flows and stakeholders more manageable and comprehensible. Simulations and XR are used not only to visualize individual (newly designed) process paths, but also to obtain a big picture of the entire value creation cycle.

As part of the poster presentations at the Recy&DepoTech conference, it will be possible to experience the simulated processes up close using VR glasses.

Application of FOST for Annotating Metal Composite Waste

Melanie Neubauer¹, Gerald Koinig², Alexia Tischberger-Aldrian², Yves Radmann³,
Walter Martinelli³, Roland Pomberger² & Elmar Rückert¹

¹⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Cyber-Physical-Systems, Leoben, Austria

²⁾ Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria

³⁾ Scholz Austria GmbH, Vienna, Austria

This paper presents a semi-automatic video annotation approach that significantly reduces the annotation effort in computer vision. The developed tool, called "Fast Object Segmentation and Tracking Tool" (FOST), was specifically created for the KIRAMET project, which focuses on the recycling of composite metal waste. It enables the segmentation and classification of objects in videos with a single click, followed by automatic annotation through interpolation and tracking across subsequent frames. The manual segmentation process is supported by the 1-Click algorithm from FastSAM, while the automatic segmentation is achieved by calculating the optical flow between frames. The dataset used consists of videos showing shredded steel scrap on a conveyor belt, with each object categorized by its material class. The results demonstrate that FOST achieves precise segmentations with low computation times, which vary depending on the number and size of the objects. By fine-tuning the pre-trained FastSAM model with custom data, the results can be further improved. Additionally, FOST can be applied to many industrial projects in the field of machine vision due to its flexible implementation.

Werferner Schiefer – An innovative, alternative mineral base liner to clay or loam for landfill construction

Ewald Bückner¹ & Gerd Hofmann²

¹⁾ VA Erzberg GmbH, Sonderprojekte, Eisenerz, Austria

²⁾ VA Erzberg GmbH, Zwischenlager Stahlwerksschlacken, Eisenerz, Austria

In the course of constructing an interim storage facility for steelworks slag at the Steirischen Erzberg, which had to meet the requirements of a residual waste landfill, an innovative, alternative to clay or loam as a mineral base liner was developed. Together with the engineering firms IGBK GmbH (now IKK Group GmbH) and GDP-ZT GmbH, as well as the Institute for Soil Mechanics, Foundation Engineering, and Numerical Geotechnics at the Graz University of Technology, a method was found to produce a mineral base liner from the locally occurring Werferner Schiefer in the open-pit mine of VA Erzberg GmbH that complies with landfill regulations (DVO 2008 – Deponieverordnung 2008; BGBl. II Nr. 39/2008). This innovative base lining material has several advantages over the use of clay or loam in landfill construction. Especially for slope systems steeper than 1:2 (~ 26.5°), the significantly easier installation is noteworthy. The landfill regulations (DVO 2008 – Deponieverordnung 2008; BGBl. II Nr. 39/2008) and the ÖNORM S 2074-2:2023-07 served as the basis for the material investigations. The essential properties of the innovative mineral base liner are reflected in the high friction angle of $\varphi' = 28.9^\circ$, achieved through a high proportion of support grains, and an extremely low permeability of less than $k_f < 1.3 \times 10^{-10}$ m/s. This innovative base lining material can be homogeneously produced in any required quantity and subsequently transported to the respective customer by truck or rail.

Improvement of Polymer Segmentation by X-ray Phase Contrast Computed Tomography

Jonathan Glinz¹, Sarah Heupl¹, Johann Kastner¹ & Sascha Senck¹

¹⁾ University of Applied Sciences Upper Austria, Research Group Computed Tomography, Wels, Austria

The escalating global plastic waste generation necessitates efficient recycling methods for polymer materials. A major challenge in this context is the separation of individual materials from a mixture of polymers to obtain a high-quality recycled product. Current polymer recycling processes often rely on sensor-based sorting methods inspecting only the surfaces of materials, which can lead to false identification, particularly for coated or heavily contaminated materials. X-ray radiographic methods on the contrary can deliver an in-depth investigation of a material stream but often lack sufficient contrast for segmentation of different polymers. X-ray phase contrast imaging (XPCI) leverages the refraction of X-rays by a specimen and thereby offers high robustness against beam hardening effects as well as high sensitivity for low density and low atomic number materials, such as polymers. This paper presents an experimental study comparing XPCI computed tomography with standard attenuation-based X-ray computed tomography for the characterization of four polymer materials: PMMA, POM, PTFE, and PP. The experiments, conducted on a CT system with an integrated Talbot-Lau grating interferometer for phase extraction, demonstrate that XPCI can provide contrast-to-noise ratios (CNRs) in the polymer materials more than twice as high compared to conventional attenuation contrast imaging. Specifically, the CNR between PMMA and POM could be significantly increased from 2.6 to 3.6, allowing an easier segmentation of the materials. The findings presented in this work suggest that XPCI is a promising method for the segmentation and characterization of polymer materials in recycling processes.

Acknowledgements: This work was financed by the project "HyperMAT", funded by the European Just Transition Fund and the Upper Austrian Government.

Measuring the Flow Properties of Secondary Plastics

Ivan Kibet^{1,2} & Juergen Wieser¹

¹⁾ Hochschule Darmstadt, Institute of Plastics Engineering (ikd), Darmstadt, Germany

²⁾ Hochschule Darmstadt, Doctoral Centre for Sustainability Sciences (pznw), Darmstadt, Germany

Recycling of plastics, particularly in high-value applications, is essential for sustainable resource management and achieving climate targets. A critical challenge lies in developing robust processing methods that ensure consistent feeding of secondary raw materials into recycling machinery. After separation, sorting and cleaning, secondary plastics exist as irregularly shaped particles such as ground material, flakes or fibre agglomerates. Their complex flow characteristics defy conventional theoretical assessments and design calculations, necessitating reliance on empirical trial-and-error approaches. This often leads to inefficient equipment design or configuration, frequent operational interruptions and protracted development times. This study builds on practical insights gained through expert knowledge based on previous project applications to systematically investigate the flow and conveying behaviour of ground secondary plastics material.

Investigations on the mechanical recycling of shredded wind turbine blades in bulk moulding compounds

Bianca Purgleitner¹, Karin Krenn¹ & Christoph Burgstaller^{1,2}

¹⁾ Transfercenter für Kunststofftechnik GmbH, Composites, Wels, Austria

²⁾ University of Applied Science Upper Austria R&D-GmbH, Research Center Wels, Wels, Austria

The rotor blades of wind turbines are mainly made of glass fibre reinforced plastic (GFRP) components. Many of them are already reaching the end of their service life. In addition, more and more wind turbines are being built to achieve the requirements of the Renewable Energy Directive (2009/28/EC). Currently, there is no adequate recycling method for the enormous GFRP waste streams in terms of a circular economy. They are still being incinerated or landfilled, which constitutes an enormous disposal problem. Of all state-of-the-art recycling methods, mechanical recycling is still the only economically and ecologically practical process.

The aim of this work was to determine the mechanical characteristics of different resin systems in combination with different particle sizes of shredded wind turbine blades and to identify the influencing factors for satisfactory mechanical properties. Therefore, shredded wind turbine blades were sieved into different fractions and pressed into sheets using various epoxy resin systems. From the produced BMC plates test specimen were cut out to investigate tensile and bending properties, fibre volume content and fracture pattern. In addition to the influence of the particle size and the resin system, the directional dependence of the test specimens and the bond quality were evaluated.

It was found that the recycled material from shredded wind turbine blades is easy to process. Sieving into different particle size fractions is recommendable to reduce batch fluctuations and ensure the reproducibility of the mechanical properties. Smaller particles in the composite provide better strength values. Particle sizes up to 1.4 mm show isotropic material behaviour. The bonding of the resin system to the fibres from the shredded wind turbine blades should be improved to further increase the strength values for a further life cycle of the waste material.

Development of a recovery project in line with the UNFC: screening study

Soraya Heuss-Aßbichler¹, Iman Dorri¹, Juan Antonio Munizaga-Plaza¹ & Ludwig Hermann²

¹⁾ University of Munich (LMU), Department for Earth and Environmental Sciences, Munich, Germany

²⁾ Proman Consulting, Auersthal, Austria

The demand for a secure supply of critical and strategic raw materials has brought about a paradigm shift as the recovery of secondary raw materials from waste streams has gained importance in the last decades. The right selection of projects with commercial potential is crucial for securing the supply of critical raw materials to companies in the EU operating on the basis of sustainable management of primary and secondary resources. The United Nations Framework Classification of Resources (UNFC) is a principle-based tool that enables the classification of anthropogenic resource recovery projects similar to the primary raw materials. It considers three basic principles, social-economic and environmental viability, technical feasibility, and level of confidence in the quantity of materials estimated to be produced. In the Horizon Europe project FutuRaM, a structured procedure is developed to assess anthropogenic resource recovery projects. A user-friendly web-based tool is developed to guide the user through a structured seven-stage procedure that ensures a consistent and transparent evaluation process. These stages include initial information collection, project definition, controlling factors identification, data gathering and project evaluation, categorization of the controlling factors, UNFC classification, and comprehensive reporting. Various case studies are used to test the procedure. A key issue, among others, is often deciding which of the various project ideas are worthy of further development and therefore funding. This paper presents a structured approach for a screening study to help decision-makers gain an overview for making this multi-faceted decision. As part of the screening study, the general requirements for the realization of the project can be recorded and reported. The proposed procedure in FutuRaM consists of 5 steps to collect all information relating to the project idea. Step 1 is to gather basic information and define responsibilities. In Step 2, a background analysis and motivation for initiating the project is carried out. This includes investigating the current problems in the region and in general. It is also necessary to formulate the objectives that need to be achieved. Six questions help to gather additional information to understand the economic and legal motivations for implementing the project. They also help to understand the social and environmental risks of the current situation and the expected improvements that can be expected from the implementation of the project in general. Step 3 focuses on the technical realization of the project and its application in practice. Particular attention should be paid to the requirements for the input material (waste) and the product characteristics. Step 4 relates to the local situation, in which the various directly and indirectly affected stakeholders and their respective needs are taken into account. All information on the project idea is collected and evaluated in the final Step 5, leading to the classification of the project. This can serve as a basis for decisions by the project promoters. In summary, the structured information not only enables a decision to be made on the project's eligibility in general, but also it can serve as a robust basis for the next development phase with a pre-feasibility study. It contains all the necessary information to conduct a study under the principles of the UNFC. Examples of a screening study are, but not limited to, economic considerations, technical innovation, and problem-solving. A special case is the recovery of phosphorus from sludge. Due to the regulatory framework, many wastewater treatment plant operators and local authorities are faced with the decision of which technology is suitable for their site. The holistic and structured presentation of the technologies ensures transparency and comparability which is needed for a fact-based decision making.

Polymer Differentiation with Computed Tomography: Opportunities and Limitations

Sarah Heupl¹, Jonathan Glinz¹, Dietmar Salaberger² & Johann Kastner¹

¹⁾ University of Applied Sciences Upper Austria, Research Group Computed Tomography, Wels, Austria

²⁾ Borealis Polyolefine GmbH, Linz, Austria

In the context of polymer recycling, differentiation and analysis of various polymer types are crucial for effective material separation and reuse. Recycling polymers typically involves the complex task of separating individual materials from mixed polymer waste, since mixed plastics are still a big challenge for the recycling process. This separation often relies on sensor-based sorting methods that use visual identification features such as color, shape, brightness, and fluorescence. Techniques for analyzing these features include optoelectronic, spectroscopic, electromagnetic, and X-ray methods. This study explores the effectiveness of computed tomography (CT) in distinguishing between different types of polymers based on their density and elemental composition, facilitating more efficient recycling processes. A specimen consisting of six stacked polymer sheets, each approximately 500 µm thick, was prepared by Borealis Polyolefine GmbH for analysis. The polymers included polypropylene (PP), polyethylene (PE), polystyrene (PS), polyamide (PA), polyetheretherketone (PEEK) and polyethylene terephthalate (PET). Two different CT devices were employed: the GE Nanotom 180NF and the RX Solutions Easytom 160, each with specific parameters and varying voltage settings. Additionally, simulations using the in-house software SimCT were conducted to complement the experimental data, focusing on both polychromatic and monochromatic X-rays. The grey values obtained from scans as well as simulations were analyzed to determine the distinguishability of the polymers based on their attenuation properties. The findings revealed that lower voltage settings in CT scans offer better contrast between different polymers. However, the differentiation between polymers with very similar densities, such as polypropylene (PP) and polyethylene (PE), remains challenging. The use of monochromatic X-rays in simulations showed promise for improving contrast by absence of noise. This leads to the assumption that by the reduction of noise polymer differentiation could become a more doable task. Among other methods, the usage of a photon-counting detector for CT – which can exclude electronic noise – could be a future possibility for polymer class identification.

Acknowledgements: This work was financed by the project “HyperMAT”, funded by the European Just Transition Fund and the Upper Austrian Government.



Seit 50 Jahren begleiten wir die Kreislaufwirtschaftsbranche und bieten den verschiedenen Akteuren ein Forum des Wissens- und Erfahrungsaustauschs.

Wir veranstalten aktuell vier Konferenzen im Jahr, die sich jeweils einem bestimmten Themenbereich der Abfallwirtschaft widmen – Recycling und Sekundärrohstoffe, Mineralische Nebenprodukte und Abfälle (einschl. Deponien), Klärschlamm und Thermische Verfahren. Die Veranstaltungsreihen finden in einem einjährigen Rhythmus statt und stellen die aktuellen politischen, wirtschaftlichen, technischen und rechtlichen Entwicklungen vor.

Wir bieten eine Plattform, auf der sich die verschiedenen Akteure und Sektoren miteinander austauschen und vernetzen können. Unser persönliches Ziel ist, mit unseren Konferenzen zum Nachdenken anzuregen, Projekten Anschub zu geben und positive Entwicklungen in der Kreislaufwirtschaft voranzutreiben.

Das umfassende Wissen der Vortragenden wird in Fachbeiträgen ausführlich dokumentiert und im Anschluss an die Konferenzen in qualitativ anspruchsvollen Büchern und E-Books präsentiert.

UNSERE AKTUELLEN KONFERENZEN IM ÜBERBLICK:

Berliner Konferenz Abfallwirtschaft und Energie

Berliner Konferenz Metallkreisläufe

Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle

Berliner Klärschlammkonferenz



vivis Webseite

Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Dorfstraße 51

16816 Nietwerder-Neuruppin

Tel. +49 (0)3391 4545 0

E-Mail: registration@vivis.de



vivis Eventportal

VOEB

VERBAND ÖSTERREICHISCHER ENTSORGUNGSBETRIEBE

Seit nun mehr als 40 Jahren ist der Verband Österreichischer Entsorgungsbetriebe (VOEB) für die österreichische Abfall- und Ressourcenwirtschaft als **unabhängige Interessensvertretung** aktiv. Als Stimme der kommerziell geführten Abfall- und Ressourcenwirtschaftsunternehmen in Österreich vertritt der VOEB derzeit über 260 Mitglieder und repräsentiert somit zwei Drittel - gemessen am Umsatz bzw. an den Beschäftigten - der privaten österreichischen Abfallwirtschaftsbetriebe.



Pressearbeit & Newsletter

700.000 Tonnen Biomüll
kleiner Abfall wird direkt verarbeitet.

420 Prozesse
25 Prozesse automatisiert

90 Prozent
der Abfall ist recycelbar und recycelbar.

3 Mio. Tonnen
Abfall wird recycelt.

64.000 Tonnen
Plastikabfall-Anteil bis 2020

MEDIEN & KOMMUNIKATION

VOEB
VERBAND ÖSTERREICHISCHER
ENTSORGUNGSBETRIEBE

JAHRESBERICHT
2023-2024

VOEB 2024
JAHRESBERICHT

Akademie

Für Branchennewlinge & Profis...

Nur: Mehr Kurse im Westen Österreichs. Tradition: Der Kanaljahrheitsprüfungskurs feierte 2024 mit der 40. Ausgabe ein besonderes Jubiläum.

*Gemeinsam
Ressourcen sichern*

**SAVE
THE
DATE**

**JAHRES-
TAGUNG
STEYR**
15.-17.05.2025

Autorenverzeichnis

A

Adam Josef.....	139
Apprich Silvia.....	193
Archodoulaki Vasiliki-Maria.....	69
Arnberger Astrid.....	39
Aster Hannah.....	135
Auer Maximilian	73

B

Back Jan.....	109
Bakry Rania	109
Brantner Jessica	139
Bruggraber Thomas.....	163
Brüning Ralf	49
Bückner Ewald.....	223
Burgstaller Christoph	237

C

Clemenz Peter	119
---------------------	-----

D

Denneler Birthe.....	103
Detter Katrin.....	147
Diller Niklas.....	189
Dinslage Roman	113
Dorri Iman.....	63, 241
Dos Santos Maria	183
Duretek Ivica.....	103

E

Ebenhofer Gerhard	173
Eisenbacher-Lubensky Jan.....	153

F

Fink Thomas	141
Fonseca Diaz Valeria	173
Freilinger Johanna	109
Freudenberg Jan	103
Frueholz Rebeka	153
Fürhacker Maria.....	109

G

Gabriel Viktoria	147
Glinz Jonathan.....	227, 247
Grabner Celine	141
Gröller Patrick	211

H

Haberbauer Marianne	153
Haiden Klaus	103
Hall Manfred	211
Handl Sebastian	109
Hanoshenko Olena	95
Herman Ludwig.....	241
Hermann Robert	39
Heupl Sarah.....	227, 247
Heuss-Aßbichler Soraya.....	63, 241
Hledik Claudia.....	109
Hofmann Gerd	223
Hornek-Gausterer Romana.....	167
Hrad Marlies	79
Huber-Humer Marion	79, 95

J

Jabornig Simon	109
Jahn Elisabeth	147
Jayasinghe Bhagya	63

K

Kaltenbrunner Kevin	59
Kaphahn Isabel	45
Kapp Marianne	135
Kastner Johann	227, 247
Kaufmann Thomas	211
Kibet Ivan	233
Klein Michelle	193
Kleinsasser Felix	179
Koch Marc	109
Koinig Gerald	173, 217
Kopecká Romana	79
Krech Marc	129
Krenn Karin	237
Krisper Michael	85
Kupka Anett	129

L

Lämmermaier Lukas	189
Larch Madeleine	109
Lasslop Nicole	73

M

Maier Jürgen	163
Mann Oliver	167
Martinelli Walter	217
Marx Jana	109
Mayrhofer Elisa	69
Menapace Hannes	179
Menedetter Victoria	91
Mersch Claus	183
Mueller Josephine	153
Munizaga-Plaza Juan Antonio	63, 241

N

Nahold Manfred	199
Neubauer Melanie	173, 217
Nigl Thomas	39, 135
Novak Martin	147
Nti Richard Yaw	135

O

Obholzer Thomas	109
Oleynikova Anna	193
Orth Daniel	59
Osorio Piniella Veronica	69

P

Pentz Sebastian	189
Pfandl Kerstin	157
Pfitzner Manuel	147
Pinter Elisabeth	69
Pladerer Christian	59, 91
Pomberger Roland	39, 217
Pönitz Thomas	173
Poschacher Franz	139
Pupp Maximilian	109
Purgleitner Bianca	237

R

Radmann Yves	217
Rainer Roman	173
Riegler Cornelia	139
Roßkogler Susanne	125
Rückert Elmar	173, 217
Rupprich Marco	109
Rutkowski Cornelia	39
Rutrecht Bettina	39

S

Salaberger Dietmar	247
Sasse Sabrina	189
Schäfer Maria	119, 129
Schenk Johannes	153
Schinner Karin	103
Schlossniki Jessica	69
Schmid Verena	139
Schmidt Jannick	73
Senck Sascha	227
Sobouti Alireza	63
Spiess Sabine	153
Spruck Martin	109
Stark Kirsten	45
Steiner Paul	73
Stipanovic Hana	55, 141
Stock Ulrich	113
Strohmeier Felix	173, 183
Sturm Martin	119

T

Tacker Manfred	193
Tatschl Lisa	55
Tischberger-Aldrian Alexia	55, 103, 141, 173, 211, 217
Tomsik Daniel	167

U

Ulanova Olga	205
--------------	-----

V

Vinzenz Georg	59
Vollprecht Daniel	189
Vorraber Dagmar	163

W

Weber Nicole	103
Weinbauer Hannes	167
Weiss Christian	153
Wellacher Martin	139
Weller Fabian	73
Werner Charlotte	193
Wieser Juergen	233
Winkler Klemens	173, 211
Winter Ingrid	157
Witt Florian	49
Woidasky Jörg	73
Wolmuth Dominik	153
Wruss Werner	167

Z

Zeilerbauer Lukas	135
-------------------------	-----



W W W

WASTE MANAGEMENT WORLD®

‘Waste Management World’ – the official publication of the International Solid Waste Association

Studium

Studienrichtung UKT
(Umwelt- & Klimaschutztechnik)

Exkursionen

Industriennahe Praktika

Events

Recy & DepoTech
(Abfallwirtschaftliche Konferenz)

Tagungen, Seminare &
Workshops



Arbeitsgruppe
Abfallverfahrenstechnik

Versuchsstand für
sensor-gestützte
Sortierung

Arbeitsgruppe
Methoden & Umweltanalytik

Arbeitsgruppe
Future Waste & Abfallwirtschaft

DIGITAL Waste
Research LAB

Arbeitsgruppe
Umweltsanierung & mineralische Abfälle

Forschung

Sachregister

0-9

3D-Simulation	211
---------------------	-----

A

Abbau	109
Abdichtung	113
Abfallbehandlung	179
Akkumulatoren	49
Altablagerung	163
Alttextilien	55
Aluminium	199
Ames Test	69

B

Baurestmassen	157
Baurestmassendeponie	223
Bentonitvergütung	223
Bergbauhalde	163
Bewertung der holistischen Nachhaltigkeit	193
Bilanz	179
Bioelektrochemie	153
Bioleaching	153
Biologisch abbaubare Kunststoffe	129
Biologische Laugung	153
Black Mass	39
Blockchain	85
Brände	49
Brandereignisse	49
Bulk solids	233
Bürgermeisterdeponien	113

C

Carbonfasern	45
Carbonfaser verstärkte Kunststoffe	45
CFK-Abfälle	45
Chromat	199
Circular Economy	125, 183
Circularity	79
Clean cycles	79
CO ₂	179
Cross Chain Intercompatibility	85

D

Diesel	179
Digital Battery Passport (DBP)	183
Digital Product Passport (DPP)	183
Disassembly	39
Dismantling	39
Dynamic flow	233

E

E40	173, 217
Electrolyser stack recycling	135
E-Mobility	39
End of life strategies	135
Environment	95
Environmental impact	167
Erkennung	141

F

Flowability	233
Formiersiebe	103
Forststraße	157
Forstweg	157
FT-IR-Spektroskopie	73
FutuRaM	63, 241

G

Gebinde und Einheiten	85
Gefährdungsbeurteilung	113
Geologische Barriere	223
Gesamtheitliche Bewertung	63, 241
Getrennte Sammlung	55
Glasfaserabfall	237
Glasfaserrecycling	237
Green Deal	125

H

Handlungsempfehlungen	49
HVO	179
Hydromineralressourcen	205

I

Industrial chemicals	167
Industry 5.0	125
IPFS	85

K

Kategorisierung	113
Kompostierung	139
Kosmetik	193
Kreislaufwirtschaft	91, 129
Künstliche Intelligenz	173, 211
Kunststoffrecycling	119
Kunststofftransformation	139
Kupfer	173

L

Landfill	79
Lebensmittelkontakt	69
Life Cycle Assesment	183
Lithium	205
Lithium-Ion-Batteries	39
Logistik	59

M

Manufacturing Industry	125
Maschinelles Sehen	217

Maßnahmen	49
Material recovery	135
Materials Characterization	227, 247
Mechanisches Recycling	73, 237
Mehrweg	91
Mehrwegsystem	59
Metallrecycling	173, 211
Military actions	95

N

Nachhaltige Mobilität	59
Nachverfolgbarkeit	85
Naturfaserverstärkte Kunststoffe	129
Nicht-thermisches Plasma	109

P

Particle size distribution	233
PFAS	109, 167
Phase Contrast Imaging	227
Pollution	95
Polyamid	103
Polymer Recycling	227, 247
Polyolefine	69, 147
Polypropylen	73
Polystyrol	69
Post-war waste management	95
Powder rheology	233
Pressfilze	103

R

Recycling	69, 79, 129, 147, 153, 189, 217
Recycling-Baustoffe	157
Recyclingfähigkeit	193
Regranulat	119
Restmüll	55
Reststoffdeponie	223
ReUse	55, 91, 141
Rezyklate	189
Rotorblätter	237
Rückgewinnungsprojekt	63, 241

S

Sanierung	113
Schleifmittel	189
Sekundär Rohstoffe	63, 153, 241
Sensorische Prüfung	119
Shredderschrott	173
Sicherung	163
Simulation	247
Spritzbeton	199
Stahlschrott	217
Störstoffe	139
Strontium	205

T

Textilabfälle	141
Textilien	141
Textilrecycling	103
Thermische Zersetzung	45
Tiefe Neuronale Netze	217
Tunnelausbruchmaterial	199

U

Umweltauswirkungen	193
United Nation Framework Classification for Resources	63, 241
Unkonventionelle Lagerstätten	205

V

VA Erzberg GmbH	223
Verpackung	91, 193
Verpackungsabfall	59, 147
Verwertung	199
Visualisierung	211

W

Wahlplakat	73
Waldweg	157
Wasseraufbereitung	109
Wasserrechtliche Aufsicht	163
Waste storage	79
Wein	91
WHO-Fasern	45
Wiederverwendung	55, 59, 141
Windradflügel	237

X

X-ray Computed Tomography	227, 247
---------------------------------	----------

Z

Zerkleinerung	129
---------------------	-----

