



**RESSOURCEN
NEU
DENKEN.**

Deutsche Gesellschaft für
Abfallwirtschaft e.V.

14. WISSENSCHAFTSKONGRESS

Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

am 13. und 14. März 2025
an der Universität Kassel

Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen
Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik



innsbruck university press



RESSOURCEN
NEU
DENKEN.

Deutsche Gesellschaft für
Abfallwirtschaft e.V.

Tagungsband

14. WISSENSCHAFTSKONGRESS

Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

am 13. und 14. März 2025
an der Universität Kassel

In Zusammenarbeit mit

U N I K A S S E L	BAUINGENIEUR
V E R S I T Ä T	UND
	U M W E L T
	I N G E N I E U R W E S E N

FACHGEBIET

Ressourcenmanagement und Abfalltechnik

14. WISSENSCHAFTSKONGRESS

Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

Anke Bockreis, Martin Faulstich, Sabine Flamme, Kathrin Greiff,
Martin Kranert, Mario Mockler, Michael Nelles, Peter Quicker,
Gerhard Rettenberger, Vera Susanne Rotter (Hg.)

Wissenschaftliche Organisation

Prof. Dr.-Ing. Anke Bockreis (Univ. Innsbruck)
Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich (INZIN e.V.)
Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme (FH Münster)
Prof. Dr. Kathrin Greiff (RWTH Aachen University, ANTS)
Prof. Dr.-Ing. Martin Kranert (Univ. Stuttgart)
Prof. Dr. Mario Mocker (OTH Amberg-Weiden)
Prof. Dr. mont. Michael Nelles (Univ. Rostock/DBFZ Leipzig)
Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker (RWTH Aachen University, TEER)
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger (HS Trier)
Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter (TU Berlin)

Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V.
DGAW
Von-der-Heydt-Straße 2
10785 Berlin
Tel.: 030.84 59 14 77
E-Mail: info@dgaw.de
www.DGAW.de

© *innsbruck* university press, 2025
Universität Innsbruck
1. Auflage
Alle Rechte vorbehalten.
www.uibk.ac.at/iup
ISBN 978-3-99106-153-3
DOI 10.15203/99106-153-3
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Der Kongress wird unterstützt von:



Medienpartner



Beirat

Prof. Dr. habil. Christian Abendroth (BTU Cottbus-Senftenberg)
Prof. Dr. rer. pol. Heinz Georg Baum (HS Fulda)
Prof. Dipl.-Ing. Frank Baur (HTW des Saarlandes)
Prof. Dr.-Ing. Burkhard Berninger (OTH Amberg-Weiden)
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Bernd Bilitewski (Intecus GmbH)
Prof. Dr.-Ing. Carla Cimattoribus (HS Esslingen)
Prof. Dr.-Ing. Joachim Dach (HS Konstanz)
Prof. Dr.-Ing. habil. Christina Dornack (TU Dresden)
Dr.-Ing. Glykeria Duelli (Univ. Stuttgart)
Prof. Dr.-Ing. Silke Eckhardt (HS Bremen)
Hon. Prof. Dr.-Ing. Matthias Franke (Fraunhofer UMSICHT)
Hon. Prof. Dr. Henning Friege (TU Dresden, Leuphana Univ. Lüneburg)
Prof. Dr. sc. agr. Stefan Gäth (Univ. Gießen)
Prof. Dr.-Ing. Gilian Gerke (HS Magdeburg-Stendal)
Prof. Dr.-Ing. Christian Gierend (Universität der Bundeswehr München)
Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann (TU Clausthal)
Prof. Dr.-Ing. Susanne Hartard (HS Trier)
Prof. Dr. Andrea Heilmann (HS Harz)
Prof. Dr. Christoph Helbig (Univ. Bayreuth)
Prof. Dr.-Ing. Stefanie Hellweg (ETH Zürich)
Prof. Dr. Peter Hense (HS Bochum)
Prof. Dr. Soraya Heuss-Aßbichler (LMU München)
Prof. Dr.-Ing. Robert Holländer (Univ. Leipzig)
Prof. Dr. rer. nat. techn. Marion Huber-Humer (BOKU Wien)
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kraft (Univ. Weimar)
Prof. Dr.-Ing. Kerstin Kuchta (TU Hamburg)
Prof. Dr. David Laner (Univ. Kassel)
Prof. Dr.-Ing. Achim Loewen (HAWK Göttingen)
Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller (Univ. Weimar)
Prof. Dr.-Ing. Annette Ochs (HS Wismar)
Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Roland Pomberger (Univ. Leoben)
Dipl.-Ing. Dr. mont. Arne Ragoßnig (RM Umweltkonsulten ZT GmbH)
Prof. Dr. techn. Helmut Rechberger (TU Wien)
Prof. Dr.-Ing. Alfons Rinschede (FH Gelsenkirchen)
Prof. Dr.-Ing. Stefan Salhofer (BOKU Wien)
Prof. Dr. Miriam Sartor (TH Köln)
Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek (TU Darmstadt)
Prof. Dr.-Ing. Helmut Seifert (KIT)
Prof. Dr.-Ing. Christian Springer (FH Erfurt)
Prof. Dr.-Ing. Rainer Stegmann (TU Hamburg)
Prof. Dr.-Ing. Iris Steinberg (HS Darmstadt)
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel (TH Nürnberg)
Prof. Dr. Daniel Vollprecht (Univ. Augsburg)
Prof. Dr.-Ing. Renatus Widmann (Univ. Duisburg-Essen)
Prof. Dr. Henning Wilts (HafenCity Univ. Hamburg, Wuppertal Institut)
Hon. Prof. Dr. Martin Wittmaier (HS Bremen)
Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky (HS Pforzheim)
Prof. Dr.-Ing. Christoph Wunsch (HS Merseburg)

Vorwort

Die Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft, der Beirat des Wissenschaftskongresses sowie der Unterzeichner freuen sich, in diesem Jahr an der Universität Kassel bei Prof. Dr. David Laner und Mitarbeitern zu Gast sein zu dürfen. Wir sind wieder auf viele engagierte Menschen getroffen, die eine solch vitale Veranstaltung ermöglicht haben. Ihnen allen sei ganz herzlich gedankt.

Der Wissenschaftskongress (Wiko) hat sich erneut weiterentwickelt. Die Teilnehmerzahlen haben weiter zugenommen. Ebenso das Engagement der Sponsoren und die Veranstaltungen um den Wiko herum. Der Dialog zwischen Wissenschaft und Praxis wird intensiv ausgebaut.

Die Kreislaufwirtschaft konzentriert sich weiter auf Umweltauswirkungen, Stoff- und Energieflüsse sowie Ressourcen. Die Auswirkungen auf ökonomische Gegebenheiten und soziale Aspekte werden dabei mit betrachtet. Fragen der Technologieentwicklung haben jedoch weiterhin eine große Bedeutung. Alle diese Aspekte werden auch bei diesem Wissenschaftskongress deutlich.

Parallel zu diesem Kongress tagte wiederum die Akademie der Kreislaufwirtschaft der Deutschen Gesellschaft für Abfallwirtschaft. Damit wird deutlich, dass die DGAW der wissenschaftsorientierten Kreislaufwirtschaft weiter die Türen öffnet. Überzeugende Ergebnisse zu liefern, damit eine Gesellschaft Vertrauen darin entwickelt, wissenschaftlich gewonnene Ergebnisse zu akzeptieren, ist ein wichtiges Anliegen auch des Kongresses.

Nochmals herzlichen Dank an alle Beteiligten: An Prof. Dr. David Laner mit Team als Veranstalter vor Ort, an die Sponsoren, die im Tagungsband genannt werden, an die DGAW als Organisatorin, an den Beirat und an die Gestalter des E-Tagungsbandes der Universität Innsbruck und natürlich an alle Teilnehmer, die zum Kongress und zu diesem Band ihren inhaltlichen Beitrag geleistet haben.

Der 15. Kongress ist für 2026 in Pforzheim geplant. Zunächst aber wünsche ich viele neue und interessante Einsichten durch die Vielzahl der Vorträge und Poster, durch die zahlreichen Gespräche am Rande sowie beim Lesen des hier vorgelegten Bandes.

Für die Herausgeber
Ihr Gerhard Rettenberger

Inhalt

KAPITEL I – VORTRÄGE

Teil 1 Stoffstrommanagement

Ole Weber

Entwicklung eines regionalen Stoffstrommanagementmodells für mineralische Bau- & Abbruchabfälle	19
---	----

Isla Hodgkinson

Was ist der Stellenwert von Biokunststoffen wie PLA für eine nachhaltige Zukunft?	25
---	----

Konstantin Saure, Lukas Gast, Verena Svensson, Martin Faulstich

Urbane Redistributionslogistik für Mehrwegverpackungen für vorverpackte Lebensmittel	31
--	----

Luisa Bergmann

Das Quartier: Planungs- und Bewertungsebene für ökologisch nachhaltige Stadtentwicklung	37
---	----

Teil 2 Recycling

Stefani Rivić, Michael Freiberger, Oliver Cencic, Christoph Scharff,

Alexia Prskawetz, Helmut Rechberger

Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung des Kunststoffkreislaufs mittels eines makroökonomischen Modells	45
---	----

Richard Yaw Nti, Thomas Nigl

Sustainable Recycling Approaches to PEM Electrolyser Stacks: Focus on Bipolar Plates and Porous Transport Layers	49
--	----

Sijia Tang, Elsa Madleen Jung, Vera Susanne Rotter

Recycling menschlicher Ausscheidungen zur Substitution von synthetischen Düngemitteln – Skalierung im regionalen Kontext	55
--	----

Melanie Börmel, Eckhard Kraft

Charakterisierung textiler Abfallfraktionen aus der Sortierung von Post-Consumer Textilien in Thüringen	61
---	----

Teil 3 Metallrecycling

Jannick Schmidt, Jörg Woidasky

"Closed loop by LIPS" – Legierungsspezifisches Aluminium-Neuschrottrecycling
für die Automobilindustrie 67

Paul Demschar, Thomas Kremlicka, Klaus Philipp Sedlazeck und Roland Pomberger

Scherensand als Beitrag zur Kreislaufwirtschaft in der Stahlindustrie 73

*Talha Waseem, Michael Schmidt, Noah Schnurrenberger, Anita Gottlieb,
Daniel Vollprecht*

Foundry Dust Recycling in Pilot Plant and Application – Resource Conservation,
Substitution and Digitalization Towards 100% Efficiency 79

Teil 4 Thermische Verfahren und Reststoffe

*Kirsten Stark, Matthias Schnell, Peter Quicker, Arkya Sanyal, Johannes Lukas,
Maximilian Weitzer, Steffen Leimbach, Jürgen Karl*

Minderung von N₂O-Emissionen durch primäre Maßnahmen und
Agglomerationsüberwachung bei der Klärschlammverbrennung 87

Iveta Vateva, Marcel Laabs, Bernhard Middendorf, David Laner

Optimierung der mineralischen Fraktion von Hausmüllverbrennungsaschen
zur Nutzung im Beton 93

*Alena Vydrenkova, Jonathan Krobatschek, Theresa Sattler,
Roland Pomberger & Klaus Philipp Sedlazeck*

Transforming Mineral Wool Waste into CO₂-Reduced Binding Agents 99

Julia Mühl, Simon Mika, Jakob Lederer

Glasrückgewinnung aus Müllverbrennungs-Bettaschen 105

Teil 5 Charakterisierung und Analytik

*Manuela Wexler, Krassimir Garbev, Hans-Joachim Gehrman, Manuela Hauser,
Jonathan Mahl, Daniela Merz, Dieter Stapf*

Einfluss der Struktur auf den thermischen Abbau von Carbonfasern –
Grundlagenuntersuchungen und Übertrag auf die Abfallverwertung 111

*Jutta Geier, Chiara Barretta, Mario Messiha, Márton Bredács, Eric Helfer,
Lisa Meinhardt, Gerald Koinig, Gernot Oreski*

Detektion gealterter PE Proben mittels Nahinfrarot Hyperspektralkamera 117

Fabian Mattersberger

Qualitativer und Semi-Quantitativer Nachweis verschiedener Bromierter Flammschutzmittel in Kunststoffen des Bausektors	123
---	-----

<i>Vanessa Nuredin, Hans-Joachim Gehrmann, Björn Meermann, Manuela Hauser, Steffen Zuchowski, Antje Cossmer, Peter Gläser, Birgitta Landwehr, Dieter Stapf</i> Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens fluorhaltiger Abfälle in einem Festbettreaktor	129
--	-----

Teil 6 Internationale Abfallwirtschaft

<i>Sara Neuburg, Francis Okori, Richard David Lee, Therese Schwarzböck</i> Was tun mit dem Rest? – Erhebung des Verwertungspotentials der Siebreste zweier Siedlungsabfallbehandlungsanlagen in Uganda	137
--	-----

<i>Souphaphone Soudachanh, Stefan Salhofer</i> The environmental potential of smartphone repair: case study Vientiane Capital, Laos	143
---	-----

<i>Muhammad Angga Kusuma, Abdallah Nassour, Michael Nelles</i> MSW to RDF Conversion for Cement Plant in Indonesia Through Pilot Project and Modeling	149
---	-----

KAPITEL II – POSTER

<i>Lucia Aguirre Molina, Sarah Schmidt, David Laner</i> Die Rolle der Abfallwirtschaft im Klimaschutz: Kohlenstoffflüsse und Potenziale zur Treibhausgasreduktion	155
---	-----

<i>Maximilian Auer, Simon Eberle, Leon Deterding, Raphael Schill, Kiriaki Karatopi, Jörg Woidasky</i> Verpackungsstudie 2024: Detail-Charakterisierung des deutschen Leichtverpackungsabfalls	159
---	-----

<i>Konstantin Bachmann, David Laner</i> Kurz- und mittelfristige Effekte von Maßnahmen zur Steigerung der Getrennt- sammlung von Bioabfällen in Kasseler Geschosswohnungsbauten hinsichtlich Menge und Zusammensetzung	165
---	-----

<i>Gisela Breslmayer, Jakob Lederer</i> Charakterisierung von Nichtverpackungskunststoffen in ausgewählten Abfallströmen und deren Potential für eine getrennte Sammlung	171
<i>Lara Clemens, Fabian Roemer, Norbert Effertz, Kirsten Stark, Peter Quicker</i> Chemisches Recycling von abfallstämmigen Matratzenschaum durch Pyrolyse	175
<i>Heike Espelage</i> Toward a Circular Battery Value Chain – A Qualitative Case Study of End-of-First-Life Strategies for Lithium-ion Batteries Stemming from Maritime Applications	179
<i>Martin Johannes Findl, Iye Szin Ang, Elisabeth Hauzinger, Elmar Rückert, Robert Galler, Klaus Philipp Sedlazeck</i> Nachhaltige Nutzung von Aushubmaterialien des Tief- & Tunnelbaus mithilfe sensorgestützter Technologien	185
<i>Leonie Gerking</i> WIR! recyceln Fasern V1.1	191
<i>Martin Gertz</i> Rahmenbedingungen zur Nachhaltigkeitsbewertung von dezentralen Energiesystemen in Wohnquartieren unter Berücksichtigung von Maßnahmen zur Lebensdauerverlängerung	195
<i>Lieve Göbbels, Karoline Raulf</i> There is more to an experiment than its design	199
<i>Betül Gök, Veronika Kladnik, Therese Schwarzböck</i> Optimierung des Abfallmanagements im öffentlichen Raum: Betrachtung der Umweltauswirkungen am Beispiel Wien	205
<i>Lea Gritsch, Gisela Breslmayer, Jakob Lederer</i> Was landet wo? Charakterisierung und Erfassungsgrad papierbasierter Verpackungen – eine Fallstudie aus Österreich	209
<i>Matilda Groote, Peter Hense</i> Entwicklung eines Pfandkonzepts zur Reduktion batteriebedingter Brände durch die Steigerung der Sammelquoten von Lithium-Ionen-Batterien	215
<i>Katrin Große Scharmann</i> Umsetzung der zirkulären Wertschöpfung bei Altfenstern	221

<i>Livia Hökl, Christian Ebner, Anke Bockreis</i> Biologische Abbaubarkeit und Umweltverträglichkeit von Textilien aus Bio-Baumwolle und Polycotton	227
<i>Pauline Jegen, Lukas Gast, Martin Faulstich</i> Analyse der Auswirkungen der Implementierung von R-Strategien auf Material- flüsse im Bausektor und Implikationen für zukünftige Stoffströme im Ruhrgebiet	233
<i>Pablo Kählig, Wolfgang Ipsmiller, Andreas Bartl, Jakob Lederer</i> Zusammensetzung der Alttextilien in Wien	239
<i>Isabel Kaphahn, Kirsten Stark, Peter Quicker</i> Forschung zur Oxymethan-Verbrennung von Abfällen	243
<i>Marcel Kern, Anna-Sophie Walz, Sebastian Can, Mohammed Achraf Jebari, Volker Biehl, Jörg Woidasky</i> Recyclinggerechte Produktgestaltung von Einwegbeatmungsbeuteln	249
<i>Romana Kopecká, Marlies Hrad, Marion Huber-Humer</i> Enhancing Circularity – The Role of Temporary Material Hubs: A Conceptual Framework	255
<i>Cinthy Lara, Jan Sprafke, Michael Nelles</i> The potential of a small-scale treatment system for the management of pig slurry	261
<i>Richard David Lee, Therese Schwarzböck, Sara Neuburg, Francis Okori</i> Wasted potential? A look back on carbon offsetting development projects within the waste management sector in Sub-Saharan Africa	267
<i>Thomas Lichtmannegger, Julika Knapp, Christian Ebner, Anke Bockreis</i> Landwirtschaftliche Bioressourcen Energetisch und Stofflich Nutzen (BESN)	273
<i>Anna-Maria Lipp, Jakob Lederer</i> Zirkuläre Absichten, lineare Realitäten? Eine Evaluierung der Kreislaufwirtschaft von Verpackungsabfällen in Österreich	277
<i>Simon Mika, Jakob Lederer</i> Getrennte Sammlung und Rückgewinnung von Aluminium aus Siedlungsabfällen	281
<i>Annalisa Nolte, Juliano Bezerra de Araújo, Kathrin Greiff</i> DACE – Data Competence Center for Circular Economy Data	287
<i>Daniel Ohl, Lukas Gast, Martin Faulstich</i> Analyse und Entwicklung eines Indikatoren-Sets für die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie	293

<i>Alexej Parchomenko, Elisabeth Zettl, Letizia Fratini, Thomas Berlinghof, Valentina Romagnoli</i>	
Unverkaufte Textilien in der EU – Ein Ansatz zur Quantifizierung der Materialflüsse und Routen aus Rücksendungen	299
<i>Johannes Preuß</i>	
Potenzialstudie zum End-of-Life von E-Bike-Akkumulatoren	305
<i>Cornelia Rutkowski, Bettina Rutrecht, Thomas Nigl, Roland Pomberger</i>	
The LIB Recycling Challenge – Pathways Achieving Efficiency Rates	311
<i>Raphael Schill, Claus Lang-Koetz</i>	
Abfallwirtschaft 2.0: Kunststoff-Aufbereitungsanforderungen der Zukunft	317
<i>Hannah Lisa Schlicht</i>	
Digitaler Produktpass in der Textilindustrie: Materialflussanalyse möglicher Auswirkungen auf den Sortierprozess	321
<i>Martin Schneiderbeck, Nikolai Kuhn, Gerald Koinig, Alexia Tischberger-Aldrian</i>	
Entwicklung eines Klassifikationsmodells zur sensorbasierten Sortierung von Kunststofffolien anhand von VIS-Aufnahmen	327
<i>Anna Spindlegger, Aleksander Jandric, Sandra Pavón, Sebastian Hippmann, Florian Part</i>	
Vergleichende Lebenszyklusanalyse innovativer und etablierter Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien	331
<i>Freya Sternkopf, Eero Kerojoki</i>	
Untersuchung der Zigarettenkippen-Kampagne „Schnipp und weg?“ in Dresden und der Rolle gesetzlicher Maßnahmen bei der Reduktion von Zigaretten-Littering	337
<i>Benedikt Verkic, Kornelia Drees, Klaus Dosch, Kathrin Greiff</i>	
KREGI – Ein Modell zur Bewertung von Klima- und Ressourceneffizienz in Gewerbe- und Industriegebieten durch Kommunen	341
<i>Anton Vielsack, Jörg Woidasky</i>	
Vergleichsstudie zur Abfallerzeugung in deutschen Akutkrankenhäusern	345
<i>Meike Walz, Marie Warnecke, Fabian Gievers, Achim Loewen</i>	
Einfluss unterschiedlicher Lagerungsverfahren und Prozessparameter auf das Methanbildungspotenzial und Restgasemissionen von Wirtschaftsdüngern und Gärresten	351

<i>Teresa Weber, Julika Knapp, Anke Bockreis</i> Zirkuläre Produktion von biologisch abbaubaren Hanffaserverbund- bauteilen (FALCON)	357
<i>Marco Wehner, Julika Knapp, Anke Bockreis</i> Alpine Solutions for the Transition of the textile and plastic Equipment industry and the harmonization of interregional 5R strategies (ASTER)	361
<i>Franziska Zecha, Jörg Woidasky, Tobias Viere</i> Methodische Entwicklungsbedarfe bei der Anwendung der Lebenszyklusanalyse (LCA) im Gesundheitssektor	365

KAPITEL I – VORTRÄGE

TEIL 1 Stoffstrommanagement

Leitung:

Prof. Dr.-Ing. Anke Bockreis

Entwicklung eines regionalen Stoffstrommanagementmodells für mineralische Bau- & Abbruchabfälle

Abstract: Mineralische Baustoffe stellen eine wesentliche Grundlage der Bauwirtschaft dar. Politische und gesellschaftliche Entwicklungen fordern zum einen eine Senkung des Rohstoffverbrauchs. Zum anderen führen gesetzliche Restriktionen und die Verknappung von Deponieraum zu einer lokalen Begrenzung der Verwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten. Um dem entgegenzuwirken und die Ver- und Entsorgungssicherheit aufrechtzuerhalten, bedarf es einer gezielten Planung und Steuerung des Stoffstroms der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle. Die Bewirtschaftung dieses Stoffstroms erfolgt dabei aufgrund der geringen Werthaltigkeit und des hohen Gewichts in einem regionalen Kontext, sodass die Kosten für einen Transport in Relation zum Rohstoffpreis niedrig gehalten werden können. Für ein regionales Stoffstrommanagement von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen sind quantitative Aussagen zum Bauwerksbestand, dem Rohstoffbedarf und Abfallaufkommen, sowie zu den Standorten und der Qualität von Entsorgungsmöglichkeiten notwendig. Zudem müssen regionale Rohstoffverfügbarkeiten und die hydrogeologischen Gegebenheiten aufgezeigt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der regionale Bauwerksbestand und die Input- und Outputströme mithilfe von Methoden aus der Literatur und regional verfügbaren Statistiken ermittelt. Zusätzlich wurden für das Bundesland NRW die Entsorgungsmöglichkeiten, die Rohstoffverfügbarkeiten und begrenzt die hydrogeologischen Gegebenheiten kartografisch dargestellt. Im weiteren Verlauf soll auf Grundlage dieser Informationen ein Stoffstrommanagementmodell entwickelt werden, welches regional optimierte Verwertungsmöglichkeiten gewährleistet.

1 Einleitung

Der Baubereich nimmt in Deutschland mit 592 Mio. Mg/a jährlich 61 % des natürlichen Rohstoffverbrauchs in Anspruch (Statistisches Bundesamt 2024a) und erzeugt 54 % des Abfallaufkommens (ca. 216 Mio. Mg/a) (Statistisches Bundesamt 2024b). Zwar wurden vom angefallenen Bauschutt knapp 82 % und vom Straßenabruch ca. 93 % recycelt, dennoch ersetzen die Recycling-Baustoffe mit ca. 75 Mio Mg/ a jährlich nur circa 13 % der benötigten Gesteinskörnung (Frederichs 2024). Das restliche Material wird deponiert, oder gelangt in die sonstige Verwertung wie bspw. die Verfüllung von Abgrabungen oder in den Deponiebau (Frederichs 2024). Dadurch wird nicht das volle Potenzial des Stoffstroms ausgeschöpft. Aufgrund der hohen Mengenrelevanz des Stoffstroms und zunehmender politischer Bedeutung auf europäischer Ebene durch den EU Green Deal und dem daraus resultierenden Circular Economy Action Plan (European Commission, Direc-

torate-General for Environment 2020) sowie auf nationaler Ebene im Rahmen der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) 2024) und länderspezifischen Ambitionen sind vermehrt Forderungen nach festen Einsatzquoten von Sekundärmaterialien zu vernehmen. Eine europäische, bundes- oder landesweit einheitliche Rezyklateinsatzquote vernachlässigt jedoch regional unterschiedliche Möglichkeiten im Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen sowie Verfügbarkeiten von Sekundärmaterialien, sodass es zu erhöhten Transportaufwänden kommen kann. Dies würde sich gesamtbilanziell ökonomisch und ökologisch nachteilig auf den Bauprozess auswirken.

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Modells zur quantitativen Analyse von Potenzialen für die Kreislaufführung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen. Auf diese Weise sollen ökonomische und ökologische Bewertungen von Verwertungswegen ermöglicht und regionale Handlungsempfehlungen aufgezeigt werden.

2 Methodik

Der Ansatz für ein regionales Stoffstrommanagement wird von (Walica et al. 2020) übernommen. Der dabei entwickelte Bauatlas NRW liefert eine qualitative Einschätzung zu regionalen Potenzialen für die Kreislaufführung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in den Bereichen Primärrohstoffvorkommen, Baustoffbedarf, Abfallaufkommen, Entsorgungsmöglichkeiten und hydrogeologische Rahmenbedingungen (Walica et al. 2020). Für eine quantitative Analyse in NRW wird eine umfassende Literatur- und Datenrecherche durchgeführt. Zunächst wird der regionale Bauwerksbestand des Hochbaus mit Wohn- und Nichtwohngebäuden, sowie des Tiefbaus mit der Straßenverkehrs- und Kanalisationsinfrastruktur modelliert. Anschließend werden die daraus resultierenden Input- und Outputstoffströme als Größenordnung für den Baustoffbedarf bzw. für das Abfallaufkommen ermittelt. Die Primärrohstoffvorkommen, Entsorgungsmöglichkeiten und hydrogeologischen Rahmenbedingungen werden als Flächen- und Standortdaten kartiert, die in weiteren Schritten mit qualitativen Informationen wie Ergiebigkeit und Aufbereitungskapazitäten ergänzt werden. Zudem werden Transportentfernungen um die Standorte berechnet, sodass wirtschaftliche und ökobilanzielle Berechnungen für den Bezug und die Verwertung von mineralischen (Sekundär-)Rohstoffen erfolgen. Im Weiteren erfolgt eine Integration der regionalen Bedarfe, des Abfallaufkommens sowie der Aufbereitungskapazitäten und -qualitäten in einem Modell und einer regionalen Materialflussanalyse.

3 Vorläufige Ergebnisse

Der Bestand im Hochbau wurde nach (Rebekka Volk et al. 2018) analysiert. Hierbei erfolgte die Hochrechnung von Wohngebäuden (WG) nach Auswertung kreisscharfer Zensus-Daten. Für Nichtwohngebäude (NWG) liegen keine statistischen Daten vor, die direkt Aufschluss über den Bestand geben. Deshalb wurden Kennzahlen auf Grundlage der Daten von (Deilmann et al. 2013) gebildet, die sodann kreisspezifisch hochgerechnet wurden. Diese Kennzahlen wurden abhängig vom Gebäudetyp u.a. über die Anzahl an Beschäftigten, Schülern, Studierenden, KiTa-Plätzen, Einwohnern und landwirtschaftlichen Nutzflächen gebildet. Die somit berechneten Bruttorauminhalte wurden durch gebäudespezifische Materialintensitäten aus der Bauwerksdatenbank des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung (IÖR) in einen Materialbestand umgerechnet. Die Berechnung der Stoffströme erfolgte über das Gebäudealter, Bestandsveränderungen, Ersatzneubauquoten sowie mit Hilfe von Sanierungsquoten.

Im Bereich des Tiefbaus fand zunächst die Untersuchung des Straßenbestands statt. Dazu wurden die Straßenflächen für jede Straßenkategorie mittels Längenstatistiken [des (Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) 2022] und Regelquerschnitten berechnet. Über Materialintensitäten, die näherungsweise durch regelwerkstypische Straßenaufbauten bestimmbar sind, erfolgte daraufhin die Ermittlung des Materialbestands. Die Input- und Outputströme wurden gegenwärtig über die Lebensdauern der einzelnen Bauteilschichten berechnet. Die Ermittlung des Zu- und Rückbaus von Straßen ist Gegenstand weiterer Untersuchungen. Die Regionalisierung erfolgt ebenfalls über die Bildung von Kennzahlen. Hierzu wurde die bundesweit ermittelte Straßenfläche ins Verhältnis zur statistischen Flächenerhebung für die Straßenverkehrsnutzung gestellt.

Durch die regional verfügbaren Statistiken konnten kreisscharfe Hochrechnungen bestimmt werden, die für das Modell angesetzt werden. Tabelle 1 zeigt die vorläufige Hochrechnung des Gebäudebestands in den Beispielregionen.

Tabelle 1: Vorläufige Hochrechnung des Bauwerksbestands in den Beispielregionen

Region	Strukturtyp	Fläche [km²]	Hochbaubestand [Mio. Mg]	Tiefbaubestand [Mio. Mg]
Wittmund, Lk	Dünn besiedelter ländl. Kreis	657	10,0	21,4
Düsseldorf, krf. Stadt	Gr. Großstadt	217	108,1	25,9
Wesel, Lk	Städt. Kreis	1.043	68,5	50,4
Münster, krf. Stadt	Kl. Großstadt	303	54,1	20,1
Hochsauerlandkreis	ländl. Kreis mit Verdichtungsansätzen	1.960	45,9	46,7

Dabei wird deutlich, dass in den betrachteten ländlichen Kreisen der Straßenbestand überwiegt. Dies ist zum einen auf die größere Fläche zurückzuführen und zum anderen auf den geringeren Hochbauanteil. In den analysierten städtischen Kreisen überwiegt der Hochbaubestand. Die hinzukommende Betrachtung der Kanalisationsinfrastruktur führt zudem zu einer stärkeren Gewichtung des Tiefbaus. Unter Einbezug der In- und Outputströme können für die Regionen erste Strategien und Handlungsempfehlungen zur Verwertung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen abgeleitet werden. Aus den ermittelten Stoffströmen des Wohngebäudebestands ergibt sich ein größerer Input als Output. Dieser richtet sich in der Größenordnung nach dem regionalen Bestand und zeigt, dass das anthropogene Materiallager in den betrachteten Kreisen aktuell wächst. Die Erreichbarkeitsanalyse zeigt, dass in NRW innerhalb eines Radius von 30 km eine flächendeckende Versorgung mit Aufbereitungsanlagen besteht. Für eine Betrachtung von spezifischen Verwertungswegen muss die Qualität der Anlagen bewertet werden. Im Bereich der Deponien ist die Erreichbarkeit bis zu 50 km weitestgehend gewährleistet. Teile des nördlichen Münsterlandes sind nicht durch Deponiekapazitäten in einer angemessenen Entfernung innerhalb von Nordrhein-Westfalen zu erreichen. Die Rohstoffversorgung in NRW ist dabei deutlich heterogener aufgeteilt. Während Sand und Kies im Norden des Landes und in der Rheinschiene vorkommen, beschränken sich die Natursteinvorkommen auf das Bergische Land, das östliche Ruhrgebiet und auf den Nordosten von NRW. Dadurch sind erhöhte Transportwege für die Versorgung mit Sand und Kies im Bereich des Sauerlandes und des östlichen Ruhrgebiets notwendig. Gleiches gilt für die Versorgung mit Natursteinen im westlichen Ruhrgebiet und dem Niederrhein.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Eine regionale Hochrechnung des Bauwerksbestands in Kombination mit Rohstoff-, Aufbereitungs- und Deponiestandorten ermöglicht eine Potenzialanalyse für die Kreislaufführung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen. Die Herausforderung bei der Entwicklung eines regionalen Stoffstrommanagement ist die Verfügbarkeit, Anbindung und richtige Zusammenstellung von Daten. Ist dies gegeben, kann die Quantität des Bestands und der Stoffströme hochgerechnet werden. Wenn es die Datentiefe erlaubt, oder ausreichende Annahmen getroffen werden können, sind in weiteren Schritten die Qualität der Stoffströme und der Aufbereitungsanlagen zu hinterlegen. Dies würde eine Bewertung von ökologisch und ökonomisch optimierten Verwertungswegen, sowie von regionalen Substitutionspotenzialen erlauben.

Literatur/Quellen

- Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) (2022): Bestandsaufnahme der Straßen des überörtlichen Verkehrs. Berlin. Online verfügbar unter <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/bestandsaufnahme-strassen-ueberoertlich.html>, zuletzt geprüft am 02.01.2025.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2024): Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nationale_kreislaufwirtschaftsstrategie_bf.pdf, zuletzt geprüft am 19.12.2024.
- Deilmann, Clemens; Behnisch, Martin; Dirlich, Stefan; Gruhler, Karin; Hagemann, Ulrike; Petereit, Ralph et al. (2013): Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude. Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvbs/bmvbs-online/2013/ON272013.html>, zuletzt geprüft am 02.01.2025.
- European Commission, Directorate-General for Environment (2020): A new Circular Economy Action Plan. Brüssel. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN>, zuletzt geprüft am 19.12.2024.
- Frederichs, Matthias (2024): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2022. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2022. Hg. v. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/>, zuletzt geprüft am 13.01.2025.
- Rebekka Volk; Richard Müller; Frank Schultmann; Jérémy Rimbon; Thomas Lützkendorf; Joachim Reinhardt; Florian Knappe (2018): Stofffluss- und Akteursmodell als Grundlage für ein aktives Ressourcenmanagement im Bauwesen von Baden-Württemberg „StAR-Bau“. Schlussbericht des Forschungsvorhabens. Hg. v. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe (Band 32). Online verfügbar unter <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000086644>, zuletzt geprüft am 02.01.2025.
- Statistisches Bundesamt (2024a): Umweltökonomische Gesamtrechnungen Materialflüsse 2021. Statistisches Bundesamt. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Tabellen/material-energiefluesse.html>, zuletzt geprüft am 13.01.2025.
- Statistisches Bundesamt (2024b): Abfallwirtschaft. Kurzübersicht Abfallbilanz 2022. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/liste-abfallbilanz-kurzuebersicht.html>, zuletzt geprüft am 13.01.2025.

Walica, Wojciech Zbigniew; Walter, Gotthard; Flamme, Sabine (2020): Bauatlas NRW. Analyse regionaler Potenziale für die Kreislaufführung von mineralischen Bauabfällen. In: MÜLL und ABFALL 2 / 2020, S. 75–83. DOI: 10.37307/10.37307/j.1863-9763.2020.02.07.

Kontakt

M. Sc. Ole Weber, wissenschaftlicher Mitarbeiter
FH Münster, IWARU – Arbeitsgruppe Ressourcen
Tel.-Nr. 0251 83-65154
E-Mail: ole.weber@fh-muenster.de
Homepage: www.fh-muenster.de/iwaru

Was ist der Stellenwert von Biokunststoffen wie PLA für eine nachhaltige Zukunft?

Abstract: Aufgrund ihrer biologischen Herkunft und ihrer potentiellen Bioabbaubarkeit wird häufig pauschal angenommen, dass Biokunststoffe eine nachhaltigere Alternative zu ihrem fossilen Pendant darstellen, doch dies ist diskutabel. Erstens bestehen biobasierte Stoffe nicht aus unendlichen Ressourcen, sondern aus nachwachsenden; d. h. dass diese durch begrenzte Ressourcen wie Fläche, Zeit und Bodenqualität limitiert sind und somit in direkter Konkurrenz mit anderen natürlichen Gütern und Dienstleistungen stehen. Zweitens steht die Eigenschaft „bioabbaubar“ im direkten Widerspruch zu den Einsatzgebiet von Kunststoffverpackungen als Umweltbarriere oder langlebiges Produkt. Der Biokunststoff PLA ist der am meisten nachgefragte Kunststoff, da er im Vergleich zu anderen Biokunststoffen bei natürlich vorkommenden Temperaturen eine hohe Stabilität und Hydrophobizität vorweist und trotzdem als „bioabbaubar“ beworben wird. Jedoch beschreibt die Eigenschaft „industriell-kompostierbar“ PLA besser, da erst bei Überschreiten seiner Glasübergangstemperatur von 58 °C in einer feuchten Umgebung die Hydrolyserate stark ansteigt. Solche Bedingungen sind in der natürlichen Umwelt unwahrscheinlich, aber in einer industriellen Kompostierung möglich. Dies bedeutet, dass PLA keine passende Lösung gegen die Umweltverschmutzung darstellt, jedoch die industrielle Kompostierung als Auslöser für den benötigten Eigenschaftswechseln dienen kann. Es ist somit stattdessen der Mehrwert von PLA für die Kompostierung zu betrachten und wie dieser innerhalb einer LCA bewertet werden kann.

1 Einleitung

Auf der Suche nach nachhaltigen Alternativen für bestehende Produkte rückt die Bioökonomie und mit ihr der Einsatz von Biokunststoffen immer mehr in den Fokus von vielen Produktentwicklern. Hierbei gibt es vor allem drei Aspekte, welche Potential für ein nachhaltigeres Produkt bieten: 1. dass sie aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen, 2. dass während der Wachstumsphase der Pflanze CO₂ der Atmosphäre entzogen wird und 3. dass sie in einigen Fällen bioabbaubar sind und somit auch in Ländern ohne geregelte Abfallsammlung oder bei Fehlverhalten nicht zur langfristigen Umweltverschmutzung beitragen. In dem Projekt BioRePly wurde der Einsatz von PLA (Polymilchsäure, engl. poly lactic acid) in Holz-Kunststoff-Verbunden getestet und für die Nachhaltigkeitsbewertung dessen Bioabbaubarkeit getestet. Die Auswertung der eigenen Kompostiersversuche mithilfe einer Literaturrecherche ergab, dass die Abbaurate von PLA bei Überreten dessen Glasübergangstemperatur von 58 °C durch das Eintreten von Wasser in den Polymer und

die Hydrolyse der amorphen Anteile stark beschleunigt wird. Eine detailliertere Schilderung des Abbauprozesses ist im letztjährigen WikoTagungsband enthalten (Hodgkinson 2024).

Diese Erkenntnis zu dem Abbauprozess wirkt sich auf seine End-of-Life-Szenarien und potentiellen Einsatzgebiete aus. Im Folgenden wird deswegen zuerst darauf eingegangen, wie die Eigenschaften „biobasiert“ und „bioabbaubar“ Produkte nachhaltiger machen sollen, und wo Diskussionsbedarf besteht. Anschließend wird auf PLAs Rolle in der industriellen Kompostierung eingegangen und was notwendig ist, um diese ökobilanziell bewerten zu können.

2 Ansatzpunkte für nachhaltigere Produkte durch Biokunststoffe

Biokunststoffe wurden entwickelt, um Teil der Lösung für die Begrenztheit von fossilen Ressourcen und der Akkumulation von Makro- und Mikrokunststoffen in der Umwelt zu sein und somit eine Alternative zu den herkömmlichen Kunststoffen zu bieten. Unter den Biokunststoffen unterscheidet man unter „biobasierten“, „bioabbaubaren“ und jenen, die beiden Eigenschaften besitzen (EEA 2020).

2.1 Biobasiert – CO₂-Senke und nachwachsene Ressourcen

„Biobasiert“ ist hierbei das Gegenteil von „fossilbasiert“ und stellt somit einfach eine alternative Rohstoffquelle dar, sofern nicht mehr ausreichend fossilbasierte Kunststoffe vorhanden sein sollten, um den menschlichen Bedarf zu decken. Häufig wird davon ausgegangen, dass diese Biokunststoffe „nachhaltig“ sind, da sie auf Pflanzenbasis hergestellt werden und somit scheinbar „unendlich“ nachwachsen. Jedoch greift der Mensch in den natürlichen Kreislauf ein, indem er durch Intensivierung der Land- und Forstwirtschaft die Stoffflussraten beschleunigt. Neben den vergleichsweise großen Stoffströmen von Kohlenstoff, Stickstoff und Wasser müssen ebenfalls Makro- und Mikronährstoffe als limitierender Faktor betrachtet werden. Auch der organische Kohlenstoff im Oberboden als fester Bestandteil des Ökosystems und Wasserhaushaltes ist begrenzt und durch verstärkte Erosion gefährdet (Laurentiis et al. 2024). Letzten Endes sind somit „nachwachsende“ Rohstoffe nicht unendlich, sondern bauen auf endlichen Ressourcen, welche ebenfalls nachhaltig, d. h. langfristig, bewirtschaftet werden müssen.

Der ökologische Mehrwert darf somit nicht einfach pauschal angenommen werden, sondern muss unter Berücksichtigung aller Wirkungskategorien erfolgen. Genauso wie durch eine ganzheitliche, konsequentielle Betrachtung überprüft werden muss, ob die Biokunststoffproduktion eine langfristige CO₂-Senke darstellt.

2.2 Bioabbaubar – Beschleunigte Abbauraten in der Umwelt

„Bioabbaubar“ bezeichnet die Eigenschaft sich in einen kurzen Zeitraum (unter 1,5 Jahren) in CH₄/CO₂, H₂O und Biomasse abzubauen (UBA 2018; Löw et al. 2021). Jedoch steht dies im Gegensatz zum Einsatzgebiet von Kunststoffen. Neben ihrer eigenen Langlebigkeit sollen Kunststoffe häufig als Barriere zu biologischen Abbauprozessen und Wasser dienen, um die Lebensdauer eines anderen Produkts zu erhöhen. Der ideale Biokunststoff müsste demnach während seiner Nutzungszeit stabil sein und dann an seinem Lebensende plötzlich eine rasant schnellere Abbaurate entwickeln, welche jedoch nicht mit ubiquitären Mikroorganismen zusammenhängen darf. Die Hydrolyserate des weltweit am meisten produzierte Biokunststoffes PLA beschleunigt sich rasant bei Überschreiten seiner Glasübergangstemperatur von ca. 58°C (Gorrasi und Pantani 2018). Diese Temperaturen sind in der Natur, Biogasanlagen und der Heimkompostierung nicht realistisch. Das einzige Szenario, wo ein beschleunigter Abbau von PLA demnach realistisch ist, ist die in-

dustrielle Kompostierung. Vielmehr als „bioabbaubar“ beschreibt „industriell kompostierbar“ die Eigenschaft von PLA somit besser. Es gibt zwar Biokunststoffe (wie PHA oder stärke-basierte), welche auch bei niedrigen Temperaturen eine kurze Lebenszeit haben (Löw et al. 2021), aber die Marktdominanz von PLA zeigt (European Bioplastic e. V. 2022), dass dieser die Anforderungen der Wirtschaft besser erfüllt.

Die umweltfreundlichste Option ist nicht immer der nachhaltigsten Lösung gleichzusetzen, da für Nachhaltigkeit auch soziale Gerechtigkeit und Wirtschaftlichkeit notwendig sind, damit die Menschen langfristig diese Lösung als Teil ihrer Lebensweise akzeptieren können und sich auch für diese entscheiden. Das heißt nicht, dass in einigen Fällen die Ökologie nicht am höchsten gewichtet werden muss, aber dass ökologische Produkte, welche gesellschaftlich nicht angenommen werden, ein unnötiger Ressourcenverbrauch sind, wenn diese ungenutzt wieder entsorgt werden müssen.

2.3 Folge für die Rolle von PLA in der Entwicklung von nachhaltigeren Produkten

Es ist zu hinterfragen, inwieweit Biokunststoffe wirklich Makro- und Mikrokunststoffe vermeiden können, wenn sie wie PLA gestaltet sein müssen, um eine Alternative zu konventionellen Kunststoffen zu bieten, aber nicht in der Umwelt, sondern nur in der industriellen Kompostierung abbaubar sind, welche global nicht flächendeckend verfügbar ist. Gleichzeitig sollte PLA aber auch als interessanter neuer Werkstoff betrachtet werden, welcher durch seine Eigenschaften möglicherweise woanders eine Verbesserung im Umwelt-, Ressourcen- und Klimaschutz bieten könnte.

Hierfür muss noch einmal darüber reflektiert werden, welche Rolle die „industrielle Kompostierung“ in einer nachhaltigen Zukunft einnimmt. Vergleicht man im Rahmen einer LCA nur das Treibhausgaspotential und den kumulierten Energieaufwand, so werden die in Kompostierung entstandenen CO₂-Emissionen direkt an die Atmosphäre gegeben und es gibt nicht wie im Biogasprozess oder der Verbrennung die Möglichkeit die entstandene Energie zu nutzen. Der wahre Wert des Kompostes liegt in dem, was als Feststoff verbleibt: dem Humus und den Nährstoffen. PLA soll jedoch vollständig zu CO₂ und Wasser umgesetzt werden, um mögliches Mikroplastik zu vermeiden. Hier kann zwar argumentiert werden, dass ca. 10-20% des Kohlenstoffes durch die mikrobielle Aktivität als Biomasse gebunden wird (Stadtmüller 2004; UBA 2018), aber dies ist den eingesparten fossilen Energieträgern im Fall der Energierückgewinnung in der Verbrennung gegenüberzustellen. PLA alleine betrachtet kann demnach keine oder nur einen kleinen Beitrag zum Klima- und Bodenschutz leisten. Anders könnte es jedoch sein, wenn es einen anderen biologischen Stoffstrom verstärkt in die Kompostierung eintragen kann und somit die Rückführung von organischen Kohlenstoffen und Nährstoffen in den Boden erhöhen kann. Ein Beispiel hierfür wären die oben genannten Holz-Kunststoffverbunde des BioRePlys-Projektes, welche momentan noch verbrannt werden müssen.

3 Kompostierung im Rahmen von LCAs

Aktuell geht der Eintrag von der größten Ökobilanzdatenbank Ecolinvent zur Behandlung von Bioabfällen in der industriellen Kompostierung seit der Version 2.0 auf ein Projekt von der Carbotech AG für das schweizerische Bundesamt für Energie zurück, welches das Ziel hatte eine Entscheidungsgrundlage für die optimale Verwertung von Grüngut zu schaffen. Neben einer Verbesserung der Methanemissionen mithilfe eines Expertengremiums und einer verbesserten Bewertungsmethode für die Schwermetallgehalte wurde auch eine neue Bewertungsmethode für organische Substanz von Kompost entwickelt (Dinkel et al. 2012). Der organische Kohlenstoffgehalt ist essentieller Bestandteil von den Ökosystemdienstleistungen des Umweltmediums Boden und dessen Verlust oder Zuwachs sollte deswegen insbesondere im Rahmen der

ökologischen Betrachtung von Bioökonomieprodukten mitbetrachtet werden. Zu dem Schluss kam auch die UNEP-SETAC Life Cycle Initiative, welche seit Anfang der 2000er an Methoden zur Bewertung von Einflüssen auf die Bodenqualität im Rahmen von Ökobilanzierungen arbeiteten (Köllner et al. 2013). Parallel zu Dinkel et al. (2012) wird auch hier der organische Kohlenstoff bzw. die Materie als stellvertretender Indikator für die Bodenqualität und damit verbundenen Ökosystemdienstleistungen gesehen. Während Dinkel et al. (2012) Stroh und/oder Torf als eingesparnte Produkte im Rahmen von „avoided burden“ oder „basket-of-benefits“ Methoden verwenden, konzentrieren sich das vom Fraunhofer IBM entwickelte LANCA®-Modell und der von ihm abgeleitete und von der UNEP-SETAC Life Cycle Initiative diskutierte Bodenqualitätsindex (SQI, engl. soil quality index) auf eine Bewertung der unterschiedlichen Eigenschaften von geographisch zugeordneten Landnutzungsformen und deren Transformation, wo Kompost als organischer Dünger eine landwirtschaftliche Nutzungsform darstellt (Köllner et al. 2012, 2013; Bos et al. 2016; Laurentiis et al. 2024). Um die Wertschöpfung von PLA als Trägermaterial des Stoffstroms „Holz“ ökobilanziell bewerten zu können, kann der Eintrag in Ecolnvent von Dinkel et al. (2012) nicht verwendet werden, da dieser sich auf einen Mittelwert des Bioabfalls in der Schweiz bezieht, und somit 1.) geographisch spezifisch ist und 2.) eine andere Stoffzusammensetzung und Humusbildrate als Holz besitzt. Weiterhin muss hinterfragt werden, wie gut sich dieser Ansatz mit dem SQI kombinieren lässt, um z. B. Doppelzählungen zu vermeiden.

Danksagung

Das Projekt BioRePlay wurde von 2021–2024 durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) gefördert (FKZ:2220HV093B). Projektträger ist die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).

Literatur/Quellen

- Bos, U.; Horn, R.; Beck, T.; Lindner, J. P.; Fischer, M. (2016): LANCA® – Characterization factors for life cycle impact assessment. Version 2.0. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Dinkel, F.; Zschokke, M.; Schleis, K. (2012): Ökobilanzen zur Biomasseverwertung. Schlussbericht 20. April 2012. carbotech. https://carbotech.ch/cms/wpcontent/uploads/LCA_Biomasseverwertung.pdf, 12.01.2025.
- EEA, European Environmental Agency (2020): Biodegradable and compostable plastics – challenges and opportunities. <https://www.eea.europa.eu/publications/biodegradable-and-compostable-plastics>, 07.01.2024.
- European Bioplastics e.V. (2022): Bioplastics market development. Update 2022. https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/2022/Report_Bioplastics_Market_Data_2022_short_version.pdf, 31.10.2024.
- Gorrasi, G.; Pantani, R. (2018): Hydrolysis and Biodegradation of Poly(lactic acid). In: Di Lorenzo, M. L.; Androsch, R. (Hg.): Synthesis, Structure and Properties of Poly(lactic acid), Springer International Publishing (Advances in Polymer Science) 279: 119–151.
- Hodgkinson, I. (2024): Bioabbaubar gleich kompostierbar? – Wie die initial notwendige abiotische Hydrolyse den Abbau von PLA in der Kompostierung und der Natur beeinflusst. In: DGAW, Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e. V.: Tagungsband vom 13. Wissenschaftskongress Kreislauf- und Ressourcenwirt-

- schaft am 15. und 16. Februar 2024 an der Technischen Universität Wien. innsbruck university press: 261–268.
- Köllner, T.; de Baan, L.; Beck, T.; Brandao, M.; Civit, B.; Goedkoop, M.; Margni, M. Milà i Canals, L.; Müller-Wenk, R.; Wiedema, B.; Wittstock, B. (2012): Principles or life cycle inventories of land use on a global scale. *Int. J. Life Cycle Assessment* 18: 1203–1215.
- Koellner, T.; de Baan, L.; Beck, T.; Brandao, M.; Civit, B.; Margni, M. Milà i Canals, L.; Saad, R. de Souza, D.; Müller-Wenk, R. (2013): UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services In *LCA. Int. J Life Cycle Assess* 18: 1188–1202.
- De Laurentiis, V.; Maier, S.; Horn, R.; Uusitalo, V.; Hiederer, R.; Chéron-Bessou, C.; Morais, T.; Grant, T.; Milà i Canals, L.; Sala, S. (2024): Soil organic carbon as an indicator of land use impacts in life cycle assessment. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* 29 (7): 1190–1208.
- Löw, C.; Prakash, S.; Stuber-Rousselle, K. (2021): Why are biobased and biodegradable plastic not part of the solution to reduce plastic waste? Checking the facts!. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Ökoinstitut e. V. https://www.thai-german-cooperation.info/wp-content/uploads/2021/11/Oekoinstitut_biobased_and_biodegradable_plastic.pdf, 20.09.2024.
- Stadtmüller, Ulrike (2004): Grundlagen der Bioabfallwirtschaft. Lehr- und Handbuch. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky.
- UBA, Umweltbundesamt (2018): Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe. Unter Mitarbeit von Burgstaller, M.; Portrykus, A.; Weißenbacher, J.; Kabasci, S.; Merrettig-Bruns, U.; Sayder, B. UBA-Texte 57/2018.

Kontakt

M. Sc., Isla Hodgkinson, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Technische Universität Dresden / Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Tel.-Nr.: +49 351 463-44132

E-Mail: isla_marie.hodgkinson@tu-dresden.de

Homepage: <https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/iak>

Urbane Redistributionslogistik für Mehrwegverpackungen für vorverpackte Lebensmittel

Abstract: Der Einsatz von Mehrwegverpackungen stellt eine Möglichkeit zur Reduktion des Aufkommens von Post-Consumer-Abfällen durch Einwegkunststoffverpackungen für vorverpackte Lebensmittel dar. Um den Gebrauch für KonsumentInnen zu vereinfachen, kann die Rückgabe der leeren Verpackungen über öffentlich aufgestellte Rücknahmeautomaten erfolgen. Durch die Redistribution der leeren Verpackungen durch den kommunalen Entsorger ergeben sich zudem neue Geschäftsmodelle, deren Wirtschaftlichkeit im Wesentlichen von der Skalierung des Mehrwegsystems und damit der Auslastung der Infrastruktur abhängt.

1 Einleitung

Über 40 % der (Primär)Kunststoffverpackungen in Deutschland stammen aus dem Lebensmittelbereich, was einer jährlichen Menge von ca. 1,3 Mio. t entspricht (Detzel et al., 2018). Eine Produktgruppe, bei der auf eine Vorverpackung zumeist verzichtet werden kann, ist „Obst und Gemüse“ (Istel, 2020), die dennoch in 58 % der Fälle in Kunststoff verpackt ist (Lim und Holmes, 2024). Von dieser Produktgruppe machen Beeren und Trauben 24 % dieser Verpackungsabfälle aus, wobei ein Verzicht auf die Verpackung aufgrund der Empfindlichkeit des Produktes besonders schwierig ist (Istel, 2020).

Stand 2023 werden rund 64 % der Kunststoffabfälle energetisch verwertet, die meistens aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden (Lindner et al., 2024) und damit entsprechende Emissionen verursachen.

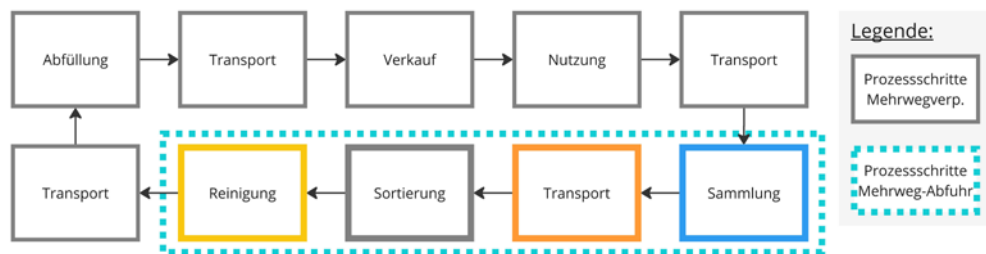
Eine Möglichkeit zur Reduktion der negativen Auswirkungen stellt der Einsatz von Mehrwegverpackungen dar (Herrmann et al., 2022). Der Aufwand zur Redistribution der leeren Verpackungen ist jedoch sowohl auf Kunden- als auch auf Unternehmensseite eine wesentliche Herausforderung (Rödig et al., 2022). Vor diesem Hintergrund wird mit dieser Promotion das Ziel verfolgt, ein Konzept für eine haushaltsnahe Sammlung von unterschiedlichen Mehrwegverpackungen für vorverpackte Lebensmittel im urbanen Raum zu entwickeln. Dies schließt die Auslegung der benötigten Infrastruktur zur Sammlung, Sortierung und Reinigung ein, als auch die Ermittlung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen. Ferner werden die Möglichkeiten des Betriebs der Infrastruktur durch kommunale Entsorger untersucht („Mehrweg-Abfuhr“), da diese zumeist über die benötigte Logistik verfügen (ReFrastructure, 2024).

2 Methodik

Für die Entwicklung des Lösungskonzeptes sind vergangene Projekte zur Vereinfachung der Rückgabe von Mehrwegverpackungen aus dem To-Go-Bereich (siehe Böckel et al., 2024) analysiert und die notwendigen Prozesse identifiziert worden (siehe Abbildung 1). Um das Konzept zu bewerten, ist dieses in ein computergestütztes Materialflussmodell überführt worden. Die Bewertung erfolgt anhand ökonomischer

und ökologischer Kennzahlen aus einer vergleichbaren Studie (vgl. Ellen MacArthur Foundation 2023). Mit dem Modell wird für einen Anwendungsfall (ein in Mehrwegverpackungen abzufüllendes Produkt) und in einem festzulegenden zeitlichen und räumlichen Rahmen die Infrastruktur ausgelegt und die daraus resultierenden Investitionen, Verbräuche und Betriebskosten ermittelt. Ausgehend von Verbrauchswerten aus themenspezifischen Studien (Ellen MacArthur Foundation, 2023; Bradbury et al., 2023; Mateu, 2024) und Emissionsfaktoren (BAFA, 2024; Schmidt, 2023) werden zudem überschlägig die energiebedingten CO₂-Emissionen der Prozesse berechnet. Zur Antizipation des Abfallaufkommens durch Fehlwürfe und Ausschussware infolge der Nutzung von Mehrwegverpackungen ist der Modell-Ansatz der „Aging Chain“ implementiert worden, der die Simulation von Produktlebenszyklen ermöglicht (Glöser-Chahoud, 2017).

Abbildung 1: Prozesse zur Redistribution von Mehrwegverpackungen



Wie eingangs erwähnt, entstehen durch Beeren und Trauben erhebliche Mengen an Verpackungsabfällen. Deshalb wird der Anwendungsfall betrachtet, dass von Anfang 2035 bis Anfang 2050 im Regierungsbezirk Düsseldorf angebaute Strauchbeeren in Mehrwegbechern abgefüllt und über den Lebensmitteleinzelhandel in der Stadt verkauft werden. Aufgrund der voraussichtlich kleinen Mengen wird anstelle der haushaltsnahen Sammlung die Rücknahme über neben Wertstoffcontainern aufgestellte Automaten und deren Leerung im Zuge der Altkleidersammlung durch die kommunale Entsorgung angenommen. Auf dem Betriebshof des Entsorgers erfolgt anschließend die Sortierung und Reinigung der Verpackungen. Mithilfe der Erntemengen (IT.NRW, 2024), der Bevölkerungszahlen (Landeshauptstadt Düsseldorf, 2024) und dem Konsumverhalten (BLE, 2023) werden die jährlich in Mehrwegverpackungen abzufüllenden Produkte berechnet. Um das Abfallvermeidungspotenzial zu bestimmen, wird der Status Quo des Abfallaufkommens mit den aus dem Anwendungsfall resultierenden Mengen verglichen. Der Status Quo wiederum ergibt sich aus der letzten Hausmüllanalyse (Santjer et al., 2024) und der Siedlungsabfallbilanz (Landeshauptstadt Düsseldorf, 2024). Zur Untersuchung der Auswirkungen von Skaleneffekten werden unterschiedliche Entwicklungsszenarien (siehe Tabelle 1) der Bevölkerungszahlen der Stadt Düsseldorf in das Modell implementiert (Landeshauptstadt Düsseldorf, 2024). Beim ersten Szenario wird von einem linearen Anstieg der Bevölkerungszahl von 702.500 auf 707.300 ausgegangen. Beim zweiten Szenario ändert sich die Bevölkerungszahl jährlich zwischen - 0,5 % und + 0,4 %, schrumpft jedoch bis 2050 auf 697.300 EinwohnerInnen. Das letzte Szenario geht von einem linearen Anstieg der Bevölkerung auf 747.500 EinwohnerInnen aus.

3 Vorläufige Ergebnisse und Diskussion

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich wird, wirken sich die Veränderungen der Bevölkerungszahlen gleichermaßen auf die Größe der Infrastruktur aus. In den ersten beiden Fällen werden 73 Rücknahmeautomaten, ein Sammelfahrzeug und je eine Sortier- und Reinigungsanlage benötigt. Im dritten Szenario werden lediglich zwei Automaten mehr benötigt, was zu höheren Investitionsausgaben führt. Die Abschreibungen dieser machen 63 % der jährlichen Betriebskosten aus, während 30 % auf Wartungskosten, 7 % auf Personalkosten und ein marginaler Teil auf die Energiekosten entfällt. Der Anteil der Abschreibungen ergibt sich aus den angenommenen Ausgaben für die Sortieranlage (5 Mio. €) und Automaten (à 35.000 €) (Edeka, o.J.). Bezogen auf 1.000 kg Strauchbeeren sinken die Gesamtkosten mit den steigenden Bevölkerungszahlen aufgrund der Skaleneffekte von 6.137 € auf 6.005 €. Einerseits führt die Skalierung des Systems zu einem Anstieg der jährlichen Verbräuche (elektr. Strom und Kraftstoff) und der resultierenden Emissionen von 16,7 t CO₂ auf 17 t CO₂. Andererseits können durch die Substitution von Einweg- durch Mehrwegverpackungen, bezogen auf die jährliche abzufüllende Menge an Strauchbeeren, bis zu 1,5 t an Kunststoffverpackungsabfällen vermieden werden. Zudem sinkt voraussichtlich die Menge an Verpackungsabfällen, die als Fehlwürfe mit dem Hausmüll thermisch verwertet werden, wodurch jährlich zwischen 2,4 t CO₂ und 2,5 t CO₂ eingespart werden können.

Tabelle 1: Simulationsergebnisse für unterschiedliche Bevölkerungsvorausberechnungen in Düsseldorf

	1. Szenario	2. Szenario	3. Szenario
Max. Bestand an Mehrwegverpackungen / Stk.	107.738	108.470	113.862
Investitionsausgaben / T€	8.605	8.605	8.675
Betriebskosten / (T€ / Jahr)	1.319	1.319	1.330
Gesamtkosten / (€ / t Beeren)	6.137	6.118	6.005
Emissionen „Mehrweg-Abfuhr“ / (kg CO ₂ / Jahr)	16.653	16.677	16.992
Abfallvermeidungspotenzial / (kg / Jahr)	1.440	1.429	1.508
CO ₂ -Einsparpotenzial* / (kg CO ₂ fossil / Jahr)	2.397	2.388	2.496

Legende: T€ = 1.000,00 Euro; Stk. = Stückzahl

Bei Betrachtung der Abbildung 2 wird ersichtlich, dass die durch den Betrieb der Mehrweg-Abfuhr entstehenden jährlichen Emissionen sich größtenteils auf die Prozesse Sammlung und Reinigung aufteilen. Der geringe Ausstoß durch die Sortierung ist dem hohen Durchsatz der Anlage und dessen niedrigen Energieverbrauch geschuldet (Ellen MacArthur Foundation, 2023). Die Anwendung der Mehrweg-Abfuhr auf andere Produkte und damit die Ausweitung des Systems könnte aufgrund der veränderten Auslastung zu einer Verschiebung dieser Verteilung führen.

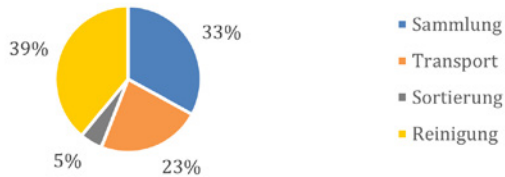


Abbildung 2: Aufteilung der ermittelten jährlichen Emissionen auf die Prozesse der Mehrweg-Abfuhr

4 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass im dargelegten Anwendungsfall die Ausweitung der Anwendung von Mehrwegverpackungen das Abfallaufkommen um bis zu 23 % reduzieren könnte. Ausgehend von den Simulationsergebnissen beeinflussen der Aufbau und Auslastungsgrad der Infrastruktur im Wesentlichen seine Wirtschaftlichkeit, sodass eine ausreichende Skalierung für eine haushaltsnahe Sammlung erreicht werden muss. Für eine ganzheitliche Bewertung wird das Modell dahingehend erweitert, dass auch die Vorketten der Verpackungslösungen im Rahmen einer Ökobilanzierung mitbetrachtet werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung der Forschung im Rahmen eines INZIN-Stipendiums durch die Stadtwerke Düsseldorf AG.

Literatur

- BLE (2021): Presseinfo. Pro-Kopf-Verbrauch von Strauchbeeren: 5,1 Kilogramm, Bonn, BLE-Pressestelle.
- BAFA (2024): Informationsblatt CO₂-Faktoren - Bundesförderungen für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft - Zuschuss 3.1.
- Böckel, A.; Pietzke, A.; Wilts, H.; Seyring, N. (2024): Pilotierung von Infrastruktur zur Rücknahme von Mehrwegverpackungen, Wuppertal Institut, Mehrwegverband Deutschland und ReFrastructure gGmbH.
- Bradbury, J.; Kirk-Smith, M.; Crossette, S.; Joseph, L. (2023): Assessing Climate Impact - Reusable vs. Single-use Takeaway Packaging, Bristol, Eunomia.
- Detzel, A.; Bodrogi, F.; Kauertz, B.; Bick, C.; Welle, F.; Schmid, M.; Schmitz, K.; Müller, K.; Káb, H. (2018): Biobasierte Kunststoffe als Verpackung von Lebensmitteln, ifeu, Fraunhofer IVV und narocon.
- EDEKA (o.J.): Unser Weg heißt Mehrweg: Einblick in den Mehrwegkreislauf bei Getränken in einem EDEKA-Markt.
- Ellen MacArthur Foundation (2023): Unlocking a reuse revolution: scaling reusable packaging: Modelling technical appendix, Modellierung und Analyse durch SYSTEMIQ und Eunomia.
- Glöser-Chahoud, S. (2017): Quantitative Analyse der Kritikalität mineralischer und metallischer Rohstoffe unter Verwendung eines systemdynamischen Modell-Ansatzes, Dissertation, Clausthal-Zellerfeld, Technische Universität Clausthal.

- Herrmann, S.; Kast, M.; Kühl, C.; Philipp, F.; Stuchtey, M. (2021): Verpackungswende jetzt!, SYSTEMIQ.
- Istel, K. (2020): Vorverpackungen bei Obst und Gemüse: Zahlen und Fakten 2019, NABU, Berlin.
- IT.NRW (2024): Anbauflächen, Erträge und Erntemengen der Strauchbeerenarten in Nordrhein-Westfalen 2022 und 2023: (Ergebnisse für Regierungsbezirke), (031 / 24), Düsseldorf, IT NRW Pressestelle.
- Landeshauptstadt Düsseldorf (2021): Bevölkerungsprognose 2035: Statistik & Stadtforschung Nr. 59.
- Landeshauptstadt Düsseldorf (2024): Abfallbilanz 2023 für die Landeshauptstadt Düsseldorf.
- Lim, R.; Holmes, J. (2024): The Material Change Index: Unpacking the scale of plastic packaging and opportunities for change in European supermarkets, Retail Economics, im Auftrag von DS Smith.
- Lindner, C.; Schmitt, J.; Hein, J.; Fischer, E. (2024): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen - Kurzfassung der Conversio Studie.
- Mateu, M. (2024): LCA Report - Comparative life cycle assessment of sykell reusable packaging EINFACH MEHRWEG, Re-Viu, im Auftrag von sykell.
- ReFrastructure gGmbH (Hg.) (2024): Abschlusspräsentation - Systemübergreifende MEHRWEG-INFRA-STRUKTUR im Take-Away Bereich: Pilotprojekt in der Gemeinde Haar Juni - Dezember 2023.
- Rödig, L.; Jepsen, D.; Falkenstein, A.; Zimmermann, T.; Hauschke, F.; Cayé, N.; Schüler, K.; Burger, A.; Schomerus, T.; Jacoby, H. (2022): Förderung von Mehrwegverpackungssystemen zur Verringerung des Verpackungsverbrauchs, Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- Santjer, M.; Hannes, L. (2024): Analyse des Restabfalls aus privaten Haushalten in der Stadt Düsseldorf: Untersuchungsergebnisse (vorläufige Ergebnisse), INFA, im Auftrag der Landeshauptstadt Düsseldorf.
- Schmidt, S. (2023): Plastic packaging waste management in Germany: Evaluating and optimizing material flows and environmental impacts, Dissertation, Kassel, Universität Kassel.

Kontakt

M. Eng., Konstantin Saure, Doktorand / Stipendiat und Referent

Technische Universität Dortmund / INZIN e.V.

Tel.-Nr. 015754729602

E-Mail: konstantin.saure@inzin.de

Homepage: www.inzin.de

Das Quartier: Planungs- und Bewertungsebene für ökologisch nachhaltige Stadtentwicklung

Abstract: *Der deutsche Wohngebäudesektor muss für das Erreichen des politisch gesetzten Ziels der Klimaneutralität bis 2045 weitreichend energetisch saniert werden. Die aktuelle Sanierungsrate bleibt dabei hinter den Erwartungen zurück, weshalb nach Lösungen zu einer Erhöhung dieser Rate gesucht wird. Dabei etabliert sich zunehmend die Erarbeitung von Sanierungsplänen für ganze Quartiere. Durch die Zusammenfassung einer Vielzahl von Gebäuden innerhalb einer Sanierungsmaßnahme besteht die Chance die energetische Sanierungsrate insgesamt schneller zu erhöhen als durch Sanierungsmaßnahmen auf Gebäudeebene. Eine konsistente Bewertung der, durch Maßnahmen der energetischen Sanierung entstehenden, Umweltauswirkungen auf der Implementierungsebene des Quartiers ist dabei entscheidend, um mögliche Verlagerungseffekte frühzeitig zu erkennen. Ziel dieser Forschungsarbeit, die im Rahmen einer Dissertation erfolgt, ist es, einen solchen Bewertungsrahmen zu erarbeiten, um darauf aufbauend weitere Forschung betreiben zu können.*

1 Einleitung

Wegen seiner hohen Materialintensität und seines erheblichen Energiebedarfs stellt der Gebäudesektor einen der weltweit relevantesten Treiber des voranschreitenden Klimawandels dar (IPCC, 2023). Eine zentrale Maßnahme, diesem Problem zu begegnen, ist der Erhalt des Gebäudebestands vor dessen Abriss und Neubau energieeffizienterer Gebäude. So können bereits eingesetzte Ressourcen länger in ihrer primären Nutzungsphase gehalten werden, was direkt zur Ressourcenschonung und damit einhergehenden Reduktion der Treibhausgasemissionen beiträgt (Küstner et al., 2022). Diese Maßnahme wurde nun auch in Deutschland innerhalb der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie aufgenommen und unterstreicht dessen Wichtigkeit für eine voranschreitende Circular Economy (BMUV, 2024). Gleichzeitig muss besonders der Wohngebäudebestand weitreichend energetisch saniert werden, um die Klimaschutzziele der Europäischen Kommission bzw. Deutschlands zu erreichen (Küstner et al., 2022). Bisherige Sanierungsanstrengungen beschränken sich innerhalb des Wohngebäudebestands bisher meist auf einzelne Gebäude, was in einer aktuellen Sanierungsrate von etwa einem Prozent, statt der erforderlichen 1,6 bis 1,75 Prozent, resultiert (ebd.).

2 Städtische Quartiere als Handlungsebene

Ein Ansatz, um die Sanierungsrate insgesamt anzuheben, ist es, Maßnahmen der energetischen Sanierung nicht nur auf einzelne Gebäude zu beschränken, sondern Sanierungspläne für ganze Quartiere zu erarbeiten. Quartiere können hier als Strukturtyp verstanden werden, bei dem sich Bau-, Grün- und verschiedene Verkehrs- und Versorgungsinfrastrukturen überlagern (BMVBS, 2012). Fachspezifisch unterschiedliche Abgrenzungen sind dabei notwendig, überlagern sich jedoch oft (ebd.). In der städtischen Planung ist das Quartier z.B. in den Fachbereichen der kommunalen Wärmeplanung und Verkehrsplanung bereits als Planungsebene etabliert. Besonders die kommunale Wärmeplanung weist dabei starke Bezüge auch zur energetischen Sanierung des Wohngebäudebestands auf, da die energetische Performance eines Gebäudes neben dem Wärmedurchgangskoeffizienten der äußeren Gebäudehülle und damit einhergehenden Endenergiebedarf stark durch die Technologie der Wärmebereitstellung innerhalb der Nutzungsphase beeinflusst werden. Durch eine gemeinschaftliche Umsetzung von kommunaler Wärmeplanung und Maßnahmen der energetischen Stadtsanierung können so z.B. Skalierungseffekte in der Technologiewahl zur Wärmebereitstellung und deren Auslegung genutzt werden. Als Handlungsebene der energetischen Sanierung dient die Quartiersebene als Zwischenebene von national beschlossenen Maßnahmenpaketen und lokal-individuell umgesetzten Maßnahmen.

Entscheidend ist dabei jedoch, die umgesetzten Maßnahmen hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen auf Implementierungsebene bewerten zu können, um z.B. Verlagerungseffekte zwischen Lebenszyklusphasen, Umweltauswirkungen und Gebieten vermeiden zu können (Lotteau et al., 2015).

Lotteau et al. (2015) arbeiten heraus, dass ein konsistenter und systematischer Untersuchungsrahmen hierzu bislang fehlt. Erste Ergebnisse meiner Arbeit zeigen, wie ein solcher Untersuchungsrahmen aussehen und auf welche Fragestellungen dieser angewendet werden kann. Dazu wurde eine systematische Literaturrecherche zu Methoden der Nachhaltigkeitsbewertung durchgeführt und darauf basierende weitere Überlegungen angestellt.

3 Der Untersuchungsrahmen

3.1 Identifikation der passenden Methodik

Zur Identifikation der passenden Methodik der Nachhaltigkeitsbewertung konnten Loiseau et al. (2012) herausarbeiten, dass die Ökobilanzierung die einzige Methodik unter den von ihnen Untersuchten ist, mit der Verlagerungseffekte berücksichtigt werden können. Da diese wie Lotteau et al. (2015) beschreiben, eine der kritischsten Punkte der Nachhaltigkeitsbewertung darstellen, wird die Ökobilanzierung für diese Forschungsarbeit als passende Methodik erfasst. Die Ökobilanzierung hat allgemein das Ziel, Informationen zu potenziellen Umweltwirkungen eines Produkts (produktbasierte Ökobilanzierung, kurz: ALCA) oder einer Entscheidung (entscheidungsorientierte Ökobilanzierung, kurz: CLCA) über deren gesamten Lebenszyklus hinweg bereitzustellen (Weidema, 2000). Im Gebäudesektor hat sich auf der Betrachtungsebene einzelner Gebäude besonders die ALCA etabliert (Hansen et al., 2023). Studien auf dieser Mikroebene fokussieren sich besonders auf Materialvergleiche und Designstrategien (ebd.). CLCA auf der anderen Seite wird besonders bei der Erarbeitung von Regularien und Strategien zur Gebäudeentwicklung in einem größeren räumlichen Kontext relevant (ebd.). Auf einer Meso- bis Makroebene liegt hier der Fokus auf der Information und Entwicklung von Politiken u.a. im Quartierskontext (ebd.).

Um eine Entscheidung darüber treffen zu können, welche der Varianten der Ökobilanzierung für den Untersuchungsrahmen geeignet ist, muss deshalb zuerst geklärt werden, für welche Anwendung dieser genutzt werden soll. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, makroskopische Entscheidungen im Quartierskontext zu unterstützen und die Umweltwirkungen, die aus der potenziellen Umsetzung dieser Sanierungsentscheidungen entstehen, zu bilanzieren. Daher bietet die CLCA für diese Arbeit die passende Methodik.

3.2 Festlegen der Funktionellen Einheit

Besonders relevant bei der weiteren detaillierteren Ausarbeitung des Untersuchungsrahmens ist die Definition der Funktionellen Einheit. Die Funktionelle Einheit liefert nach Definition der DIN EN ISO 14040 (2006) die Grundlage für die Quantifizierung aller Inputs und Outputs im untersuchten System und ermöglicht Vergleiche von Ergebnissen auf Grundlage ihrer funktionalen Leistung. Zur Identifikation der Funktionellen Einheit muss demnach die funktionale Leistung des Systems „Quartier“ definiert werden. Eine einheitliche, über alle Fachplanungen etablierte Funktion existiert nicht (Jenks und Dempsey, 2007). Zur Definition kann jedoch die Eigenschaft der CLCA zu Nutzen gemacht werden, die ausschließlich nach den potenziellen Veränderungen im System durch eine Entscheidung fragt. Somit resultieren die für den Untersuchungsrahmen relevanten Funktionen und damit auch die Funktionelle Einheit aus den potenziellen Veränderungen des Systems. Diese potenziellen Veränderungen richten sich weiterhin nach den Anwendungen und Fragestellungen, auf die der Untersuchungsrahmen angewendet werden soll. Diese können in zwei Teile unterteilt werden:

3.2.1 Funktionelle Einheit zur Erarbeitung lokaler Sanierungsstrategien

Zum einen soll der Untersuchungsrahmen ein spezifisches Quartier erfassen können und die Umweltwirkungen, die durch die Durchführung einer energetischen Sanierung im Speziellen zu erwarten sind, bilanzieren. Bei der potenziellen Umsetzung verschiedener Sanierungsszenarien treten dabei Veränderungen in der Sanierungstiefe, dem Endenergiebedarf sowie der Materialzusammensetzung dieses Quartiers auf. Ziel der Anwendung des Untersuchungsrahmens ist es hier, lokale Strategien zur Verringerung von Umweltauswirkungen in diesem spezifischen Quartier durch die Entscheidung für ein bestimmtes Szenario zu entwickeln. Die daraus resultierende Funktionelle Einheit muss das Quartier als Ganzes erfassen, z.B. durch die Einheit „pro Quartier“. Dabei sollte dieses Quartier durch Angaben zu Anzahl von Wohnungen und Gebäuden im Quartier, Sanierungstiefe u.v.m. genauer definiert sein (Lotteau et al., 2015).

3.2.2 Ergänzende Funktionelle Einheiten zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher Quartiere

Neben dieser Funktion soll der Untersuchungsrahmen jedoch auch für den Vergleich unterschiedlicher Quartiere anwendbar sein. Hierbei stehen nicht die Umweltwirkungen im Vordergrund, die durch die Entscheidung für ein bestimmtes Szenario innerhalb eines Quartiers entstehen, sondern jene, die aus den Unterschieden zwischen den Quartieren resultieren. Entscheidend für die Definition der Funktionellen Einheit ist es somit, eine Vergleichsbasis zu schaffen, auf Grundlage derer sich die Unterschiede der verschiedenen Quartiere, die für die Modellierung relevant sind, in Relation setzen lassen. Hier konnten ebenfalls im Rahmen der systematischen Literaturrecherche zwei Funktionelle Einheiten definiert werden. Einerseits ist eine räumliche Einheit wie „pro m² Nutzfläche“ nötig, die die lokale Ausdehnung der Quartiere normiert (Stephan et al., 2013). Andererseits sollte die Bewohner*innendichte z.B. durch eine „pro Kopf“-Einheit einbezogen werden, um soziale Unterschiede zu erfassen (ebd.).

4 Ergebnisse und Limitationen

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit zeigen, dass die Quartiersebene zur Erhöhung der Sanierungsrate im deutschen Wohngebäudebestand eine entscheidende Handlungsebene einnimmt. Die CLCA liefert dabei im Feld der Nachhaltigkeitsbewertung von energetischen Sanierungen auf Quartiersebene einen passenden Rahmen. Um die Komplexität und Vielschichtigkeit eines Quartiers auch in Abgrenzung zu anderen Quartieren abbilden zu können, sind jedoch z.B. mehrere Funktionelle Einheiten nötig.

Offen bleibt die praktische Anwendung des entwickelten Untersuchungsrahmens. Als erster Anwendungsfall soll der Untersuchungsrahmen dafür genutzt werden, den Einfluss der Heterogenität des Gebäudebestands innerhalb eines Quartiers auf die resultierenden Umweltauswirkungen von Sanierungsszenarien zu untersuchen. Außerdem ist die Entwicklung explorativer Umbauszenarien der energetischen Stadtsanierung für ein bestehendes Wohnbauquartier und die Bewertung dieser Szenarien hinsichtlich der entstehenden Umweltwirkungen bei Umsetzung denkbar. So und durch weitere Anwendungsfälle sollen mögliche Defizite der Methodik sichtbar und der bestehende Untersuchungsrahmen weiterentwickelt werden.

Literatur/Quellen

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2024): Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. Online verfügbar unter: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nationale_kreislaufwirtschaftsstrategie_bf.pdf, zuletzt geprüft am 12.12.2024.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2012): EQ - Anforderungen an energieeffiziente und klimaneutrale Quartiere. Ein ExWoSt-Forschungsfeld. 42/1. Online verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/exwost/42/exwost42_1.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 13.12.2024.
- DIN EN ISO 14040 (2006): Deutsches Institut für Normung e. V., Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Hansen, R.N.; Rasmussen, F.N.; Ryberg, M.; Birgisdóttir, H. (2023): A systematic review of consequential LCA on buildings: the perspectives and challenges of applications and inventory modelling, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 131-145, <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02126-w>.
- IPCC (2023): Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland, pp. 35-115, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Jenks, Mike; Dempsey, Nicola (2007) "Defining the neighbourhood. Challenges for empirical research", *TPR*, 78 (2), <https://doi.org/10.3828/tp.78.2.4>.
- Künstner, S.; Tauer, R.; Breer, S. (2022): Hintergrundpapier Circular Economy im Gebäudesektor. Zirkuläre Maßnahmen im Bestand und Neubau zum Schutz von Klima- und Ökosystemen ergreifen, WWF Deutschland. Online verfügbar unter: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/Hintergrundpapier-Circular-Economy-im-Gebaeudesektor.pdf>, zuletzt geprüft am 04.10.2024.
- Loiseau, E.; Junqua, G.; Roux, P.; Bellon-Maurel, V. (2012): Environmental assessment of a territory: An overview of existing tools and methods, *Journal of Environmental Management*, pp. 213-225, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.024>.

- Lotteau, M.; Loubet, P.; Pousse, M.; Dufrasnes, E. (2015): Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale, *Building and Environment*, 93, pp. 165–178, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.029>.
- Stephan, A.; Crawford, R.H.; de Myttenaere, K. (2013): Multi-scale life cycle energy analysis of a low-density suburban neighbourhood in Melbourne, Australia, *Building and Environment* 68, pp. 34–49, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.06.003>.
- Weidema, B.P. (2000) Increasing Credibility of LCA', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(2), pp. 63–64, <https://doi.org/10.1007/BF02979718>.

Kontakt

M. Sc., Luisa Bergmann, Researcherin und Doktorandin
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH und
Technische Universität Darmstadt (Institut IWAR)
Tel.-Nr.: +49 202 2492-451
E-Mail: luisa.bergmann@wupperinst.org
Homepage: wupperinst.org

TEIL 2

Recycling

Leitung: Prof. Dr.-Ing. Martin Kranert

Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung des Kunststoffkreislaufs mittels eines makroökonomischen Modells

Abstract: Die COV19-Pandemie hat zu einigen Verwerfungen in der Recyclingbranche geführt: Neben steigenden Energiekosten erschwerten rückläufige Konsumzahlen der Haushalte die Rezyklatproduktion. Insbesondere das Recycling von Kunststoffverpackungen wurde durch den Verfall des Rohölpreises und die damit verbundenen deutlich niedrigeren Preise für Primärkunststoffe beeinträchtigt. Die Recyclingbranche hatte Schwierigkeiten, ihre Rezyklate auf den Markt zu bringen, und die Lager füllten sich. Es wurden Forderungen nach einem verbindlichen Mindesteinsatz von Rezyklaten in der Produktion erhoben, die es der Recyclingbranche ermöglichen sollte, ihre Rezyklate unabhängig von solchen Preisschwankungen zu verkaufen. Um diese Zusammenhänge besser zu verstehen, haben wir das Kunststoffverpackungssystem als einfaches Stoffstromsystem modelliert und mit einem ökonomischen Gleichgewichtsmodell kombiniert. Anhand verschiedener Szenarien haben wir untersucht, wie das System auf drastisch gesunkene Primärkunststoffpreise und die Einführung einer Mindestverwertungsquote reagiert. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell die realen Auswirkungen qualitativ sehr gut abbildet und dass eine Mindesteinsatzquote als zusätzliche, aber alleinige Maßnahme nicht zu den gewünschten Ergebnissen führt. Das Modell kann jedoch sehr gut dazu verwendet werden, politische Maßnahmen zu finden und zu testen.

1 Einleitung

Die Bewirtschaftung von Kunststoffen ist aufgrund des steigenden Kunststoffkonsum (Statista, 2021) sowie niedriger Recyclingquoten (Graedel et al., 2021; Scheeder et al., 2018) in den letzten Jahren in den Fokus der EU-Politik gerückt. Die europäische Verpackungsverordnung sieht vor, dass 50% der Kunststoffverpackungen von jedem EU-Mitgliedsland bis 2030 recycelt werden müssen. Obwohl Österreich eines jener Länder mit den höheren Recyclingquoten ist, ist man auch hierzulande mit 25% noch weit von der Erreichung der EU-Vorgaben entfernt. Dies zeigt, dass erhebliche Anstrengungen erforderlich sind, um das für 2030 gesetzte Ziel zu erreichen. Darüber hinaus sind Recycler seit der Covid19-Pandemie erheblichen Schwierigkeiten ausgesetzt. Neben steigenden Energiekosten erschweren rückläufige Konsumzahlen der Haushalte die Rezyklatproduktion. Doch vor allem die volatilen Preise auf dem Rohölmarkt führten zuletzt zu sinkenden Primärkunststoffpreisen und schafften so einen maßgeblichen Preisvorteil gegenüber den Rezyklaten. Trotz sinkender Wettbewerbsfähigkeit der Recycler gilt es, die Quote von 55% zu erreichen. Einen Ausweg sieht man in der Forderung nach einer verbindlichen Mindestrezyklateinsatzquote, die es den Recyclern ermöglichen soll, ihre Rezyklate unabhängig von den genannten Preisschwankungen zu

verkaufen, da sie den Recyclern eine Art Abnahmegarantie für die produzierten Rezyklate bieten würde. Die Wirksamkeit solcher politischen Maßnahmen ist jedoch umstritten und noch nicht erforscht. Kritiker befürchten, dass die Einführung einer Mindestrezyklateinsatzquote einerseits negative Auswirkungen auf die Qualität des Rezyklats haben und andererseits den Preis für Rezyklate erhöhen könnte (EUWID, 2023).

Die beschriebene Situation zeigt, dass es sich hierbei um ein komplexes und sehr volatiles System aus fixen und freien Variablen handelt, das aus Märkten (Preisen und konkurrierenden Gütern) und gesetzlichen Vorgaben (Mindestrezyklateinsatzquote, Recyclingquote) besteht. Um dieses System beschreiben zu können, haben wir ein Stoffflusssystem mit einem ökonomischen Gleichgewichtsmodell verknüpft.

2 Methodik

2.1 Deskriptive Beschreibung des Modells

Für die Entwicklung des Modells führen wir zunächst eine Materialflussanalyse (MFA) des österreichischen Kunststoffes aus. Diese integrieren wir in ein ökonomisches Gleichgewichtsmodell, indem wir ausgehend von der Materialflussanalyse die teilnehmenden Sektoren sowie die Märkte identifizieren.

Wir beginnen mit dem Haushaltssektor. Dieser konsumiert in erster Linie Güter und somit in zweiter Hand auch Kunststoffverpackungen, in beiden Fällen gehen wir von exogenen Zeitreihen aus. Die Effizienz, mit der die Kunststoffabfälle von den Haushalten gesammelt werden, ergibt sich aus den Sammelanstrengungen des Recyclingsektors und bestimmt die maximale Menge an Kunststoffabfällen, die dem Recyclingsektor zur Verfügung steht.

Im Recyclingsektor nehmen nur wenige Betriebe teil, wir finden hier somit einen oligopolistischen Markt vor. Jeder Betrieb übernimmt eine gewisse Menge an Abfällen vom Haushaltssektor und produziert daraus Rezyklate, die ihrerseits von den Kunststoffverpackungsherstellern nachgefragt werden. Die Produktionskosten der Recycler ergeben sich aus den Ressourcen, die sie in ihre Sammel- und Sortiereffizienz investieren sowie der Menge an Abfällen, die sie verarbeiten. Des Weiteren übernehmen die Recyclingbetriebe die Verantwortung für die Erfüllung eines staatlich vorgegebenen Recyclingziels. Im Gegenzug erhalten sie im Rahmen der erweiterten Produzentenverantwortung (EPR) Lizenzgebühren für die Verarbeitung des Abfalls von den Inverkehrbringern von Kunststoffverpackungen.

Letztere stellen den dritten Sektor dar. Dieser erzeugt aus Rezyklaten und Primärkunststoffen Kunststoffverpackungen, welche an Konsumgüterproduzenten verkauft werden. Dabei stehen die Kunststoffverpackungsproduzenten in einem vollkommenen Wettbewerbsverhältnis und optimieren dementsprechend ihre Profite. Der Anteil an Rezyklat, der verarbeitet wird, kann über eine Mindestrezyklateinsatzquote gesteuert werden.

Den Kreis schließen die Konsumgüterproduzenten. Wie bereits erwähnt, entnehmen wir hier einer exogenen Zeitreihe Nachfrage und Angebot an den Haushaltssektor.

Die nachstehende Grafik veranschaulicht den beschriebenen Kunststoffverpackungskreislauf unter Berücksichtigung der ökonomischen Aspekte.

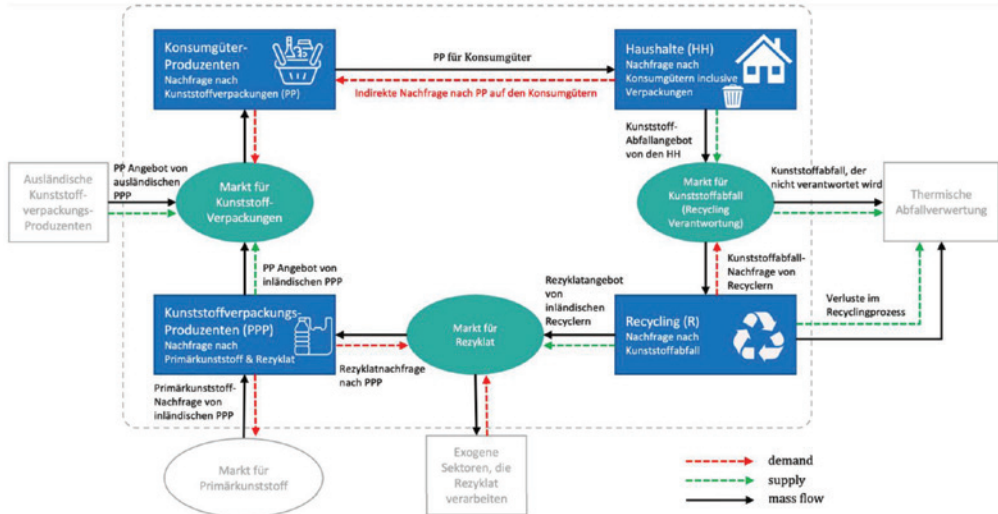
2.2 Simulation des Kunststoffkreislauf

2.2.1 Lösung des Modells

Die Lösung der Modellgleichungen ist notwendige Voraussetzung zur Simulation der Ergebnisse und zum Testen von politischen Maßnahmen. Insgesamt liegen drei Optimierungsprobleme und 17 Gleichungen in

23 Variablen vor. Da es sich um ein Gleichgewichtsmodell handelt, müssen die Lösungen simultan gefunden werden. Mit anderen Worten müssen alle drei Märkte gleichzeitig im Gleichgewicht sein.

Im ersten Schritt werden Optimierungsprobleme, sofern möglich, analytisch gelöst. Aufgrund der komplexen Funktionen ist dies nur teilweise möglich. In solchen Fällen muss das System numerisch gelöst werden. Zur Programmierung haben wir die Sprache „Julia“ genutzt.



2.2.2 Kalibrierung des Modells

Nach der Lösung des Modells folgt die numerische Kalibrierung. Dies bedeutet, dass wir Werte für unsere Parameter suchen, sodass die Ergebnisse aus dem Modell die tatsächlichen, realen Werte reproduzieren. Hierfür suchen wir zunächst in Form einer Literaturrecherche als auch im Diskurs mit Expert*innen nach Parameterwerten, beispielsweise der technologischen Effizienz im Recyclingprozess. Jene Werte, die nicht öffentlich verfügbar sind, wie etwa Kostenparameter, müssen wir numerisch schätzen. Ziel ist es nicht nur die Realität zu reproduzieren, sondern auch ein robustes Modell zu erzeugen. Damit ist gemeint, dass kleine Änderungen der Parameter nicht zu unverhältnismäßig großen Veränderungen der Zielvariablen führen. Das Finden geeigneter Parameter ist somit eine komplexe Aufgabe und spielt eine maßgebliche Rolle in der Reliabilität eines Modells. Ist dies geschafft, kann das Modell und somit der Kunststoffkreislauf simuliert werden.

2.2.3 Testen von politischen Maßnahmen

Im abschließenden Schritt werden relevante Szenarien durchgespielt. Hierbei werden beispielsweise die Auswirkungen externer Schocks auf die Zielvariablen, wie etwa die produzierte Rezyklatmenge, analysiert. Ein solches Szenario könnte zum Beispiel ein abruptes Absinken der Preise sein, wie es nach der Covid-19-Pandemie auftrat. Ebenso könnte die Einführung politischer Maßnahmen wie eines Recyclingziels oder einer Mindestrezyklateinsatzquote untersucht werden. Diese Szenarien entsprechen Änderungen der Parameter und werden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei werden nicht nur die Ergebnisse nach den beschriebenen Parameteränderungen betrachtet, sondern auch deren Plausibilität

hinterfragt. Das Ziel ist es, vertrauenswürdige Ergebnisse zu erarbeiten, die Entscheidungsträger*innen zur Verfügung gestellt werden können.

3 Ergebnis

Das zentrale Ergebnis ist ein Modell, welches die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Sektoren im Kunststoffkreislauf und den damit verbundenen Preisen abbildet und sich somit sehr gut dazu eignet, politische Maßnahmen simulativ zu testen. Anhand verschiedener Szenarien können wir untersuchen, wie das System auf drastisch sinkende bzw. steigende Primärkunststoffpreise, schwankende Nachfrage nach Rezyklaten oder der Einführung einer Mindestrezyklateinsatzquote reagiert. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Modell die realen Zusammenhänge sehr gut repliziert und somit qualitative Aussagen über die beschriebenen Szenarien getroffen werden können. Nichtsdestotrotz hat die analytische Erfassung des Kunststoffkreislaufs gezeigt, welche blinden Flecken im System existieren und welche Daten und Informationen zur Verfügung gestellt werden bzw. bekannt sein müssen, um präzisere Aussagen treffen zu können. Die mathematisch-ökonomische Modellierung des Kunststoffverpackungsrecyclings stellt somit eine Innovation in diesem Forschungsgebiet der Abfallwirtschaft dar und erlaubt es erstmalig, in beschriebener Komplexität wissenschaftlich fundierte Aussagen zur Wirksamkeit von (politischen) Maßnahmen im Bereich Kunststoffrecycling zu treffen.

Unser Modell hilft Entscheidungsträger*innen somit bei der Beurteilung von politischen Maßnahmen, ökonomischen Umständen und der Relevanz von Einflussfaktoren im Bereich Kunststoffverpackungsrecycling.

Literatur/Quellen

- Scheeder, P.R.W., Kawecki, D., Nowak, B., 2018. Probabilistic Material Flow Analysis of Seven Commodity Plastics in Europe. *Environmental Science & Technology*: 9874–9888.
- EUWID, 2023. Markt für PET: Aufkommen und Neuware und Rezyklaten übersteigt weiterhin Bedarfe. EU-WID: 43.
- Graedel, T.E., Miatto, A., Di, J., Reck, B.K., 2021. United States plastics: Large flows, short lifetimes, and negligible recycling. *Resources, Conservation & Recycling*: 117.
- Statista, 2021. Weltweite und europäische Kunststoffproduktion in den Jahren von 1950 bis 2019. [WWW Document]. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950/#statisticContainer>.

Kontakt

Dipl. Ing.in, BSc., Stefani Rivić, Universitätsassistentin
Technische Universität Wien
Tel.-Nr. +43 1 58 801 226 44
E-Mail: stefani.rivic@tuwien.ac.at
Homepage: <https://www.tuwien.at/cee/iwr/ressourcen>

Sustainable Recycling Approaches to PEM Electrolyser Stacks: Focus on Bipolar Plates and Porous Transport Layers

Abstract: Proton Exchange Membrane (PEM) electrolyzers play a progressively essential role in the global hydrogen economy. However, the need to sustainably recycle their key components such as the bipolar plates (BPPs) and porous transport layers (PTLs) which mostly contain strategically critical raw materials like titanium and platinum group metals (PGMs) has turned out to be critical. These materials are valuable yet pose challenges regarding their end-of-life management because of their high cost and environmental impact. This ReCycle project keenly wants to address the sustainability of PEM stacks and develop efficient recycling processes that recover materials of interest while reducing environmental impact. The principal aim of this research work is to establish a sustainable recycling strategy which enables the recovery of titanium and PGMs from PEM electrolyzers. Stack disassembly has been manually completed, a crucial step ensuring clean recovery of materials laying the groundwork for subsequent recycling techniques like hydrometallurgy. The project seeks to answer key question including how titanium and PGMs can be effectively recovered and which methods offer the most environmental and economic benefits. The methodology involves a stepwise process: first, manual disassembly to preserve component integrity and reduce contamination, followed by the application of hydrometallurgical leaching techniques to selectively extract titanium and PGMs. This approach is currently in its early stages, with the disassembly process successfully completed, and leaching experiments set to follow. Initial analysis will focus on recovery rates, purity, and the overall feasibility of the recycling approach. While this research work shows potential for the sustainable management of PEM electrolyser components, it also faces limitations. Manual disassembly is labor-intensive, which limits scalability, and the chemical leaching process has not yet been optimized. Future research efforts will be directed towards the exploration of automated disassembly solutions especially when production volumes of electrolyser exponentially increase and a more efficient leaching techniques to improve recovery yields and reduce environmental impact. This research project contributes to the development of circular economies within the hydrogen sector by addressing the pressing challenge of sustainably managing PEM electrolyser end-of-life materials

1 Introduction

Proton Exchange Membrane (PEM) electrolyzers are at the forefront of the global shift towards a sustainable hydrogen economy, offering a clean and more efficient method for producing hydrogen from water using renewable electricity [1]. With hydrogen emerging as a vital energy carrier in achieving decarbonization goals, the significance of PEM electrolyzers in generating green hydrogen becomes increasingly pivotal. Their widespread adoption is driven by their high efficiency, compact design and ability to integrate with renewable energy sources like wind and solar power [2], [3]. Nevertheless, despite their technological benefits, a significant challenge lies in the sustainable recycling of their core components, particularly bipolar plates (BPPs) and porous transport layers (PTLs). These components are produced using valuable and strategically critical materials, including titanium for its exceptional durability and corrosion resistance and platinum group metals (PGMs), such as platinum and iridium, which serve as key catalysts [4]. These materials contribute significantly to the cost of PEM electrolyzers while posing substantial challenges for end-of-life management due to their environmental impacts and limited availability [5]. Improper disposal or inefficient recovery may result in resource depletion, higher cost and ecological damage, making sustainable recycling a pressing issue [6]. Recognizing these challenges, the Reduction of environmental impact and related recycling capabilities (ReCycle) project aims to develop the best innovative recycling chain for PEM stacks which not only efficient but environmentally friendly and economically feasible. By focusing largely on the recovery of titanium and PGMs based components. 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. Environmental impact and economic viability of the proposed circular scenarios will be evaluated. The project 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. The project seeks to reduce the environmental impact of PEM electrolyser production, address economic concerns related to material costs, and contribute to the broader goal of establishing a circular economy, aligning with global sustainability goals and promoting long-term viability of the hydrogen economy.

1.1 Challenges of Recycling PEM Electrolyzers

As mentioned before, these strategically critical raw materials do not only pose significant challenges for end-of-life management due to their environmental impact, high cost, scarcity and complexity of recycling but however, the extraction and refining of these materials from natural resources have severe environmental repercussions, including ecosystem degradation and greenhouse gas emissions [7]. The integrated design of PEM stacks further complicates material recovery, making it difficult to extract components without contamination or loss of value. These challenges underscore the need for sustainable recycling strategies to support a circular economy within the hydrogen sector.

2 Methodology

The ReCycle project employs a systematic approach to sustainably manage PEM stacks by combining precise manual disassembly with advanced hydrometallurgical techniques for material recovery. Manual disassembly serves as a critical initial step, preserving the structural integrity of components, reducing contamination and enabling the effective separation of materials like BPPs and PTLs. While effective for small-scale operations, this process is labor-intensive and presents scalability challenges. Following disassembly, hydrometallurgical leaching techniques are applied to selectively extract valuable metals such as titanium and PGMs using chemical solutions (aqua regia and solution of hydrogen peroxide and hydrochloric acid) that dissolve target metals for high-purity recovery. Current efforts focus on optimizing the leaching process while considering temperature, concentration and reaction time, all in order to reduce chemical consumption, minimize waste generation, and enhance overall efficiency, ensuring both environmental sustainability and economic viability. By reducing dependence on scarce, costly materials and promoting circular economy practices, this methodology offers a scalable framework for addressing PEM stack end-of-life challenges while aligning with sustainability goals.

3 Early Results and Feasibility

The project has successfully completed manual disassembly, achieving clean separation of bipolar plates and porous transport layers, laying a solid foundation for subsequent recycling approaches. Upcoming leaching experiments will focus on evaluating recovery rates to determine the percentage of titanium and platinum group metals (PGMs) that can be effectively recovered, assessing material purity to ensure the recovered materials meet industry standards for reuse, and examining process feasibility to balance environmental benefits with economic viability. Currently, findings from literature and preliminary work highlight significant potential of hydrometallurgy for sustainable material recovery, therefore further experimentation is required to address current limitations and improve the efficiency of the approach.

4 Addressing Limitations and Future directions

Although the current approach appears promising, several limitations must be addressed to ensure long-term sustainability and scalability. The labor-intensive nature of manual disassembly restricts its feasibility at large production scales; automating this process could significantly enhance efficiency and reduce costs, particularly as the adoption of electrolyzers increases in the future as seen in Fig 1 [6]. Additionally, chemical leaching techniques require optimization to maximize recovery yields while minimizing environmental impacts. This will involve reducing reliance on hazardous chemicals, improving energy efficiency, and implementing closed-loop systems to facilitate the reuse of chemical agents, thereby enhancing the overall sustainability of the recycling process.

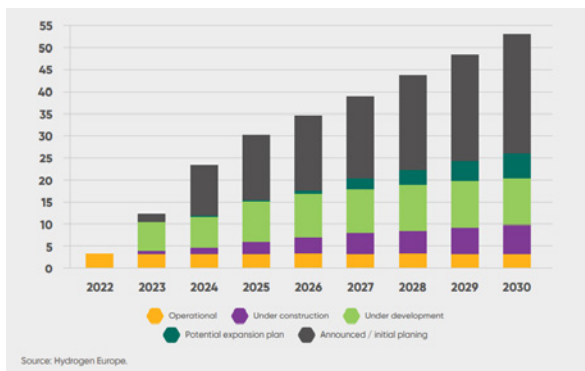


Fig. 1: Cumulative electrolyser manufacturing capacity by stage of development in Europe by 2030 (in GW/year) [6]

To address these challenges and scale up the recycling process, future research will prioritize several key areas. Automation of disassembly will involve developing robotic systems or semi-automated processes to streamline component separation and reduce labor dependency. Enhanced leaching processes will focus on experimenting with alternative leaching agents, such as bio-based solvents, and integrating innovative recovery technologies to improve efficiency. A comprehensive life cycle assessment (LCA) will be conducted to quantify the environmental and economic benefits of the recycling process, ensuring alignment with sustainability objectives. Additionally, collaboration with stakeholders across the hydrogen value chain will aim to establish closed-loop systems that enable the reuse of recovered materials in new PEM electrolyzers, fostering integration into circular economies.

5 Implications for the Hydrogen Sector

ReCycle project marks a significant step towards achieving sustainability in the hydrogen economy by addressing the end-of-life management of PEM stacks. This research aids in advancing circular economies, where materials are continuously reused, decreasing dependence on raw resources and minimizing environmental impacts. Successful implementation of these recycling strategies will help reduce material costs by recovering and reusing high-value components, thus lowering the overall cost of PEM electrolyzers and accelerating their adoption. It will also minimize environmental impacts by reducing the need for resource extraction and mitigating associated ecological damage. Moreover, establishing sustainable recycling systems will support the long-term growth and sustainability of the hydrogen economy as it scales to meet global demand.

Conclusion

The ReCycle project's innovative approach to recycling PEM electrolyser stacks marks an important milestone in the transition towards a sustainable hydrogen economy. By focusing on the recovery of titanium and PGMs, the project addresses critical challenges in material sustainability and economic feasibility. Although

current efforts are in their early stages, ongoing research and technological advancements hold the potential to revolutionize PEM stack recycling, paving the way for a greener, more sustainable future.

Acknowledgement

ReCycle is carried out within the framework of the COMET – (Competence Centers for Excellent Technologies) Centre HyCentA and funded by the federal government of Austria and the provinces of Styria, Upper Austria, Tyrol and Vienna.

References

- [1] S. Shiva Kumar and V. Himabindu, "Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review," Dec. 01, 2019, KeAi Communications Co. doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.
- [2] A. Trattner, M. Klell, and F. Radner, "Sustainable hydrogen society – Vision, findings and development of a hydrogen economy using the example of Austria," Int J Hydrogen Energy, vol. 47, no. 4, pp. 2059–2079, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.166.
- [3] S. Krishnan et al., "Present and future cost of alkaline and PEM electrolyser stacks," Int J Hydrogen Energy, vol. 48, no. 83, pp. 32313–32330, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.031.
- [4] N. S. Hassan et al., "Recent review and evaluation of green hydrogen production via water electrolysis for a sustainable and clean energy society," Int J Hydrogen Energy, vol. 52, pp. 420–441, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.068.
- [5] M. N. I. Salehmin, T. Husaini, J. Goh, and A. B. Sulong, "High-pressure PEM water electrolyser: A review on challenges and mitigation strategies towards green and low-cost hydrogen production," Sep. 15, 2022, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.enconman.2022.115985.
- [6] G. Pawelec, S. Jackson, I.-P. Yovchev, A. Allsop, and M. Bortolotti, "Reviewers: Matus Muron Design: Think Things Studio Barcelona."
- [7] K. E. Ayers, A. R. Motz, and B. D. Carter, "(Invited) Recycling Considerations for PEM Electrolysis Materials," ECS Meeting Abstracts, vol. MA2021-02, no. 60, p. 1790, Oct. 2021, doi: 10.1149/MA2021-02601790mtgabs.

Contact

Richard Yaw Nti, Scientific staff

Department of Environmental and Energy Process Engineering

Working group "Future Waste & Waste Management"

Montanuniversität Leoben

Phone: +43 3842 / 402-5146

E-Mail: richard.nti@unileoben.ac.at

Recycling menschlicher Ausscheidungen zur Substitution von synthetischen Düngemitteln – Skalierung im regionalen Kontext

Abstract: Diese Studie untersucht im Rahmen des Projekts zirkulierBAR das Potenzial des Recyclings menschlicher Ausscheidungen zur Stickstoffrückgewinnung und Produktion recycelter Düngemittel in der Region Barnim (Brandenburg). Während der Projektlaufzeit (2022–2024) erreichte die Pilotanlage eine Stickstoffrückgewinnungsrate von 74 % und gewann 4 Tonnen Stickstoff aus 239 Tonnen recyceltem Dünger zurück. Szenarioanalysen bewerteten das theoretische und technische Potenzial der Erzeugung recycelter Düngemittel in Barnim für die Jahre 2020 und 2030. Die Szenarien für 2020 ergeben, dass insgesamt 641 Tonnen Stickstoff (theoretisch) bzw. 63 Tonnen Stickstoff (technisch) aus menschlichen Ausscheidungen zurückgewonnen werden könnten, was Substitutionsraten synthetischer Düngemittel von 37,8 % bzw. 3,7 % entspräche. Für das Zukunftsszenario 2030 könnten im Klärschlammsszenario 279 Tonnen Stickstoff und im technischen Szenario 82 Tonnen Stickstoff zurückgewonnen werden. Zusätzlich wurde ein benutzerfreundliches Excel-Tool entwickelt, mit dem Kommunen das Potenzial zur Erzeugung recycelter Düngemittel, Wasserersparnisse und das Düngepotential für ihren konkreten Fall abschätzen können.

1 Einleitung

Nachhaltiges Nährstoffmanagement ist ein Schlüsselfaktor für den Aufbau eines geschlossenen Systems in der Kreislaufwirtschaft. Im Jahr 2023 verursachte der Agrarsektor 52,2 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent und trug damit 7,7 % zu den gesamten Treibhausgasemissionen bei (UBA, 2024). Angesichts des erheblichen ökologischen Fußabdrucks dieses Sektors ist es von entscheidender Bedeutung, die Abhängigkeit von synthetischen Düngemitteln zu verringern und nachhaltigere Praktiken des Nährstoffmanagements einzuführen. Ein möglicher Ansatz ist das Sammeln menschlicher Ausscheidungen an der Quelle und die Herstellung von Recycling-Dünger. Der Einsatz von Trockentoiletten verringert nicht nur die Abfallmenge, sondern reduziert auch den Wasser- und Energieverbrauch und fördert die Rückgewinnung von Nährstoffen, insbesondere von Stickstoff (Krause et al., 2024). Dieser Nährstoff trägt wesentlich zum Pflanzenwachstum bei und wird traditionell über synthetische Düngemittel bereitgestellt, deren Herstellung jedoch mit hohen Kosten und Umweltwirkungen verbunden ist.

In der Region Barnim (Brandenburg) wird im Rahmen des Projekts zirkulierBAR ein Kreislaulabor zur Herstellung hygienisch unbedenklicher und qualitätsgeprüfter Recyclingdünger eingerichtet. Mit der Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV, 2017, § 3), die die Verwendung von Klärschlamm als Düngemittel einschränkt und stattdessen die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlammmasche in den

Vordergrund stellt, ist es notwendig, das Rückgewinnungspotenzial aus getrennt gesammelten menschlichen Ausscheidungen zu bewerten. Ziel dieser Studie ist es daher, die Recyclinganlage für menschliche Ausscheidungen im Barnim mitsamt ihren Hotspots für Stickstoffverluste zu modellieren und das Potenzial für die Produktion von Recyclingdünger als auch die Substitution von synthetischem Dünger in der Region zu bewerten. Ebenso wichtig ist die Untersuchung, wie viel Agrarfläche mit diesen recycelten Düngemitteln gedüngt werden kann. Darüber hinaus soll ein benutzerfreundliches Excel-Tool entwickelt werden, das es dem Einzelnen ermöglicht, das Potenzial der Rückgewinnung von Düngemitteln und Nährstoffen mit dieser Technologie zu prognostizieren.

2 Methodik

Um dieses Potenzial abzuschätzen und die Möglichkeit des Ersatzes von Mineraldüngern zu bewerten, wurden im Rahmen des Projekts ZirkulierBAR Materialflussanalysen (MFA) für recycelte Dünger durchgeführt. Der recycelte Humusdünger und der Flüssigdünger werden aus menschlichen Fäzes und Urin gewonnen, die in Trockentoiletten gesammelt werden. Die Feststoffe aus den Trockentoiletten werden zunächst bei 70 °C hygienisiert und anschließend mit Zuschlagstoffen humifiziert. Der sogenannte flüssige „Perkurin“ (Urin nach dem Kontakt mit Fäkalien) wird zuerst stabilisiert, danach eingedampft und kondensiert. (Finizio, 2024) Jeder Prozessschritt in der Pilotanlage wurde wissenschaftlich begleitet, und die Ergebnisse der Qualitätsanalysen bilden zusammen mit Daten aus amtlichen Statistiken, Literatur und Schätzungen die Grundlage für eine umfassende MFA.

2.1 Modellentwicklung

Zur Bestimmung der Massenströme und Emissionen in jedem Prozessschritt wurde zunächst eine MFA basierend auf der tatsächlichen Verteilung der Ausgangsstoffe in der Pilotanlage durchgeführt. Die daraus abgeleiteten Transferkoeffizienten dienen dazu, die theoretische Produktion von recyceltem Dünger unter idealen Ausgangsbedingungen zu simulieren. Im Anschluss an die Modellierung wurden die Stickstoffverluste, Emissionen der Pilotanlage sowie die theoretische Produktion von recyceltem Dünger und die Stickstoffrückgewinnungsrate ermittelt. Ergänzend wurde ein benutzerfreundlicher Excel-Düngemittelrechner (Jung, 2024) entwickelt, der auf dem MFA-Modell basiert. Mit diesem Tool kann das Nährstoffpotenzial aus menschlichen Ausscheidungen in Abhängigkeit von individuellen Gegebenheiten berechnet werden.

2.2 Szenarioanalyse

Das Modell der Pilotanlage wurde anschließend um relevante Biomasseflüsse im Projektgebiet Barnim (Brandenburg) erweitert, um das regionale Produktionspotenzial von Recyclingdüngern unter Berücksichtigung des landwirtschaftlichen Sektors sowie die Substitutionsrate von Mineraldünger darzustellen. Auf regionaler Ebene wurden die Produktionsmengen des recycelten Düngers für verschiedene Szenarien berechnet, um eine klarere Perspektive auf das Potenzial der Nutzung von Recyclingdüngern aus menschlichen Ausscheidungen zu gewinnen. Die Ausgestaltung dieser Szenarien ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Erklärung der unterschiedlichen Szenarien des N-Rückgewinnungspotentials von Recycling-Dünger aus menschlichen Abfällen

Szenario	Jahr	Fokus	Quelle menschlicher Ausscheidungen zur Herstellung von Recyclingdünger in der Region Barnim	Untersuchungsobjekt
1	2020	theoretisch	Alle Personen	Düngungsmittel Ersatz N-Rückgewinnung aus dem kommunalen Bereich
2		technisch	Personen mit Verbindung zu Sammelgruben (nicht angeschlossene Haushalte) sowie aus öffentlichen Toiletten, von Festivals, Baustellen und Kleingärten	
3	2030 (Bevölkerung +6 %)	Klärschlammwiedergewinnung	Personen mit Verbindung zu Abwasserbehandlungsanlagen mit einer Ausbaugröße von bis zu 100.000 Einwohnerwerten	Substitution synthetischer Dünger und Agrar-Versorgung durch Recyclingdünger
4		technisch	Personen mit Verbindung zu kleinen Kläranlagen und Sammelgruben	

3 Vorläufige Ergebnisse

3.1 System Performance

Im Verlauf des Projektzeitraums (2022–2024) produzierte die Pilotanlage etwa 239 Tonnen recycelten Dünger und gewann insgesamt 4 Tonnen Stickstoff zurück. Diese Rückgewinnung wurde durch 11 Kompostierungszyklen erreicht, die nach idealisierter Kompostierungsrezeptur durchgeführt wurden. Mit der angewendeten Technik und Rezeptur der Humifizierung konnte im Humusdünger eine Stickstoffrückgewinnungsrate von 40 % erzielt werden. Die Stickstoffverluste verteilen sich wie folgt: 22 % während der Hygienisierung, 31 % während der Humifizierung und 7 % durch die Entsorgung von Siebrückständen. Beim Recycling von Urin tritt der primäre Stickstoffverlust während der Lagerung des Urins auf. Da der Urinbehandlungsprozess im Rahmen des Projekts noch nicht vollständig implementiert ist, wird der Stickstoffverlust während der Lagerphase auf 5 % geschätzt. Unter Berücksichtigung all dieser Faktoren beträgt die Gesamt-Stickstoffrückgewinnungsrate des Systems zur Wiederverwertung menschlicher Ausscheidungen 74 %.

3.2 Szenariostudien in Barnim

Im Jahr 2020 hatte Barnim eine Bevölkerung von 187.343 Einwohner:innen, die schätzungsweise 8.753 Tonnen Fäkalien und 68.286 Tonnen Urin erzeugten. In einem theoretischen Szenario, in dem alle menschlichen Ausscheidungen gesammelt und in einer Recyclinganlage behandelt werden, könnten 25.727 Tonnen Humusdünger und 12.159 Tonnen Urindünger produziert werden, wobei 130 Tonnen Stickstoff im Humus und 511 Tonnen im Urin recycelt würden. Im technischen Szenario für 2020 würden mobile Toiletten auf Festivals, Baustellen, in Kleingärten, öffentlichen Toiletten sowie in Haushalten ohne Abwasseranschluss durch Trockentoiletten ersetzt. Dies würde jährlich 18.371 Einwohnerwerte abdecken. Durch die Sammlung menschlicher Ausscheidungen aus mobilen Toiletten und ländlichen Gebieten könn-

ten 2.522 Tonnen Humusdünger und 1.192 Tonnen Urindünger produziert werden, wobei 13 Tonnen bzw. 50 Tonnen Stickstoff recycelt würden. Dies ergibt eine Substitutionsrate synthetischer Düngemittel von 37,8 % im theoretischen Szenario und 3,7 % im technischen Szenario.

Im Jahr 2030 wird die novellierte AbfKlärV vorschreiben, dass die Kläranlage Schönerlinde Phosphor aus Klärschlammasche zurückgewinnen muss, wodurch andere Nährstoffe wie Stickstoff für die landwirtschaftliche Ausbringung verloren gehen. In diesem Szenario wird die an die Kläranlage Schönerlinde angeschlossene Bevölkerung auf 81.409 Einwohner:innen geschätzt. Deren Ausscheidungen würden 11.178 Tonnen Humusdünger und 5.283 Tonnen Urindünger erzeugen, welche 57 Tonnen bzw. 222 Tonnen Stickstoff beinhalten. Im technischen Szenario für 2030 würde die menschliche Ausscheidung von 23.815 ländlichen Bewohner:innen 3.295 Tonnen Humusdünger und 1.557 Tonnen Urindünger erzeugen, wobei 17 Tonnen und 65 Tonnen Stickstoff zurückgewonnen werden könnten.

4 Diskussion

4.1 Szenarien 2020: Stickstoffrückgewinnung aus dem kommunalen Bereich (Kläranlage und Bioabfälle)

Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen die theoretischen und technischen Stickstoffrückgewinnungsraten für die Landwirtschaft aus kommunalen Sektoren: Kläranlagen, Anlagen zur Behandlung organischer Fraktionen von Siedlungsabfällen (OFMSW) und Recyclinganlagen für menschliche Ausscheidungen im Barnim. Die theoretische Stickstoffrückgewinnungsrate beträgt 22 %, während die technische Rückgewinnungsrate bei 6,8 % liegt. Im Vergleich zur Basis-Stickstoffrückgewinnungsrate von 5,4 % ohne die Recyclinganlage für menschliche Ausscheidungen (Tang, 2023) kann durch die Implementierung der Recyclinganlage, die für die landwirtschaftliche Nutzung zurückgewonnene Stickstoffmenge erhöht werden.

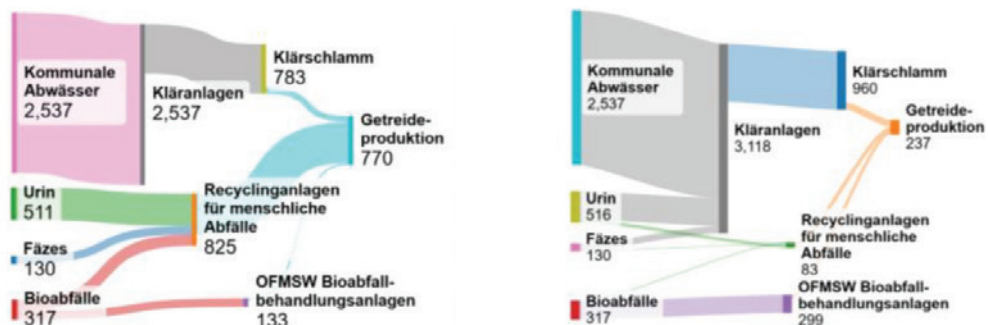


Abbildung 1 und 2: Die Masse (in Tonnen) des Gesamtstickstoffs in den verschiedenen Produktionsketten organischer Düngemittel, von der Quelle bis zur Endverwendung in der Getreideproduktion, aus dem theoretischen Szenario 2020 (links) und dem technischen Szenario 2020 (rechts)

4.2 Zukunftsszenarien 2030: Reduktion von synthetischem Dünger und Versorgung mit Recyclingdünger

Im Zukunftsszenario wird der Stickstoffgehalt von Recyclingdünger sowie die Menge an synthetischem Dünger, die ersetzt werden könnte, prognostiziert. Im Szenario 3 können 279 Tonnen Stickstoff vor der obligatorischen Verbrennung von Klärschlamm eingespart werden, was zur Produktion von 605 Tonnen Harnstoffdünger führt und 1.587 GJ Energie bei der synthetischen Düngerproduktion einspart. Dies könnte die Düngung von 2.126 Hektar schwach nährstoffbedürftiger Pflanzen oder 1.047 Hektar stark nährstoffbedürftiger Pflanzen unterstützen, was etwa 4 % bzw. 2 % der entsprechenden Anbauflächen im Landkreis Barnim entspricht. Im technischen Szenario für 2030 könnte der menschliche Abfall von Haushalten, die an kleine Kläranlagen angeschlossen sind oder gar nicht angeschlossen sind, durch Trockentoiletten ersetzt werden. In diesem Szenario könnten 82 Tonnen Stickstoff recycelt werden, was zur Produktion von 178 Tonnen Harnstoffdünger führt und 468 GJ Energie spart. Dies könnte die Düngung von 627 Hektar schwach nährstoffbedürftiger Pflanzen und 309 Hektar stark nährstoffbedürftiger Pflanzen unterstützen, was etwa 1 % der entsprechenden Anbauflächen im Landkreis Barnim ausmacht.

5 Schlussfolgerung

Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf verschiedene geografische und landwirtschaftliche Kontexte anwenden, was diesen Ansatz zu einer wertvollen Grundlage für die Umsetzung nachhaltiger Landwirtschaft in unterschiedlichsten Regionen macht. Es sollte jedoch betont werden, dass die im theoretischen Szenario angenommene Menge aufgrund der bestehenden Infrastruktur und rechtlicher Hürden derzeit noch nicht umsetzbar ist. Dennoch zeigt das technische Szenario, dass eine beträchtliche Menge an Dünger zurückgewonnen werden kann, die kurzfristig leichter umgesetzt werden könnte. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass recycelte Dünger, die aus menschlichen Fäkalien gewonnen werden, ein hohes Nährstoffpotenzial haben und daher verstärkt in der landwirtschaftlichen Praxis eingesetzt werden sollten. Allerdings müssen auch rechtliche Hindernisse beseitigt werden, um menschliche Ausscheidungen als akzeptables Ausgangsmaterial für Bioabfälle und Düngemittel anzuerkennen und so eine nachhaltige Ressourcennutzung in der Landwirtschaft zu fördern.

Literatur/Quellen

- Finizio. (2024): Recycling der Feststoffe Anlage Eberswalde Ostend. Finizio. <https://finizio.de/recycling/> (Zugriff: 22. Januar 2025)
- Jung. (2024): Recycling-Rechner für die kommunale Verwertung von Trockentoiletteninhalten (XLS). Verfügbar unter: <https://www.naehrstoffwende.org/%20zirkulierbar-handbuch/> (Zugriff: 1. November 2024)
- Krause et al. (2024): Zurück in der Kreislauf - Handbuch für die Sanitär- und Nährstoffwende. Verfügbar unter: <https://www.naehrstoffwende.org/wp-content/uploads/2024/10/Handbuch-fuer-die-Sanitaer-und-Naehrstoffwende.pdf> (Zugriff: 1. November 2024)
- Tang. (2023): Assessing the Nitrogen Recovery Potential of Recycling Fertilizers from Human Excreta using Thermophilic Composting in the Barnim Region: A Scenario Study based on Material Flow Analysis; Masterarbeit; Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie an der Technischen Universität Berlin.

UBA. (2024): Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas>; (Zugriff: 22. Januar 2025)

Kontakt

Sijia Tang, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Technische Universität Berlin / Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie

Tel.-Nr.: +49 15206270734

E-Mail: sijia.tang@tu-berlin.de

Homepage: <https://zirkulierbar.de/>

Charakterisierung textiler Abfallfraktionen aus der Sortierung von Post-Consumer Textilien in Thüringen

Abstract: Aktuell stellen textile Abfälle der Endkonsumenten eine besondere Herausforderung für textiles Recycling dar. Unkenntnis über den Materialabbau in Folge von Verschleiß, die exakte Materialzusammensetzung oder möglicher Kontakt von Schadstoffen erschwert die Auswahl eines geeigneten Recyclingverfahrens. Von deutschlandweit schätzungsweise 1 Mio. t getrennt gesammelter Textilien werden mindestens 12 % einer thermischen Verwertung zugeführt. Die Charakterisierung des Abfallstroms aus der gewerblichen Vollsortierung in Thüringen zeigt, welches Recyclingpotential quantitativ als auch qualitativ in dem aktuell der Verbrennung zugeführten Stoffstrom steckt.

1 Einleitung und Zielstellung

Die Textilwirtschaft ist als eine der fünf größten Verursacher von Treibhausgasen und Rohstoffverbräuchen sowie als drittgrößte Quelle für Wasserverschmutzung und Flächenverbrauch identifiziert (Vgl. UBA 2020). Die politischen Rahmenbedingungen streben u. a. mit der europäischen Strategie für nachhaltige und kreislauffähige Textilien (EK 2022) und der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (BMUV 2024) Änderungen in der aktuellen Textilwirtschaft an.

Eine bereits pflichtige Rechtsnorm für Alttextilien stellt insbesondere das Kreislaufwirtschaftsgesetz (BMJ 2012) dar. Gemäß § 6 KrWG sind Erzeuger und Besitzer von Abfällen zur Einhaltung der Abfallhierarchie verpflichtet. Als oberste Priorität steht die Abfallvermeidung bzw. die Wiederverwendung von Textilien.

Ein weiterer Grundsatz der Abfallbewirtschaftung stellt das Textilrecycling vor eine thermische Verwertung der Abfälle. Aktuell fehlt es den Marktakteuren an technologischen Fortschritten, um Post-Consumer-Textilabfälle als brauchbare Quelle für die Herstellung insbesondere hochwertiger Fasern zu nutzen (Andini et al. 2024).

Um die technische Möglichkeit und die wirtschaftliche Zumutbarkeit für die Abfallbewirtschaftler zu gewährleisten, bedarf es innovativer Aufbereitungs-, Sortier- und Recyclingverfahren. Mit der Kenntnis über die stoffliche Zusammensetzung der gewerblichen Abfallfraktion aus der Vollsortierung können Aussagen über die notwendige Ausgestaltung dieser Techniken getroffen und das Potential für mögliche Recyclingverfahren aus diesem Stoffstrom bestimmt werden.

Thüringen gehört zu den Standorten mit einer der größten gewerblichen Sortieranlagen Deutschlands. Im Freistaat werden jährlich rund 25.000 t Alttextilien aus Haushaltungen sortiert. Davon werden bereits im Sortiervorgang durchschnittlich 12 % der Kategorie „Thermische Verwertung“, also der Energiegewinnung durch Verbrennung zugeordnet. Die Charakterisierung dieses Stoffstroms stellt damit eine Grundlage für die Bestrebungen dar, diesen Anteil zukünftig zu minimieren und damit die Kreislauffähigkeit von Textilien zu unterstützen.

2 Methodik

Für die Charakterisierung des Abfallstroms wurde eine Mischprobe von 80 kg Alttextilien aus der gewerblichen Vollsortierung entnommen. Die Fraktion wurde im Sortierunternehmen der Kategorie „Thermische Verwertung“ (Abfallschlüsselnummer: 191208) zugeordnet, enthält keine Schuhe und stammt aus dem Sortierprozess im Herbst 2024. Um eine Aussage über mögliche Recyclingverfahren sowie notwendige Aufbereitungsschritte zu treffen, wurde jedes Einzelstück durch visuelle Inspektion auf seinen physischen Zustand untersucht. Darunter zählt die Aufnahme von Beschädigungen und Flecken sowie deren Größe als auch die Bewertung des Zustands der potentiell dem Recycling zuführbaren Materialfläche. Das Material bzw. die Materialmischungen wurden mit einem mobilen Nahinfrarot-Handspektrometer (PAL One SYS-IR-R-P, tri-namiX GmbH) durch Doppelmessung bestimmt und sofern vorhanden mit den Etikettangaben abgeglichen. Um Aussagen über notwendige Aufbereitungsverfahren zu erhalten, wurden auch Zusatzteile der Textilien aufgenommen (Lochknöpfe, Reißverschlüsse, Metallteile etc.). Diese stellen Störstoffe für ein Recycling dar bzw. können teilweise auch wiederverwendet werden. Die Aufnahme der Parameter Kleiderkategorie, Saison, Farbe, Größe, Funktionalität und Gewicht (Midrics 1, Minebea Intec GmbH) der Textilien ermöglicht statistische Auswertungen zur Beschreibung des Stoffstroms und möglichst hochwertige Verwertungswege gemäß Abfallhierarchie. Für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft ist ein closed-loop Recycling (Faser-zu-Faser Recycling) einem open-loop Recycling (z.B. Verwendung als Füllstoffe) vorzuziehen.

Einen Überblick über die aktuell praktizierten sowie noch nicht im industriellen Maßstab vorhandenen mechanischen, chemischen und thermischen Recyclingverfahren beleuchten unter anderem Löw et al. (2024) und Feldbaumer et al. (2022).

3 Ergebnisse

Es wurden insgesamt 461 Einzelteile des Abfallstroms charakterisiert. Der Anteil an Bekleidungsstücken macht 98 % aus. Andere Kategorien stellen Hauswaren, Plüschtiere und Stoffbeutel dar. Das durchschnittliche Gewicht der Bekleidungsstücke beträgt 174 g. Es konnten mehr als 25 verschiedene Materialien bzw. Materialmischungen detektiert werden. Ein Anteil von 6 % aller Einzelstücke konnte durch das Spektrometer nicht erkannt werden und ist der Kategorie „Unbekannt“ zugeordnet (siehe Abb. 1).

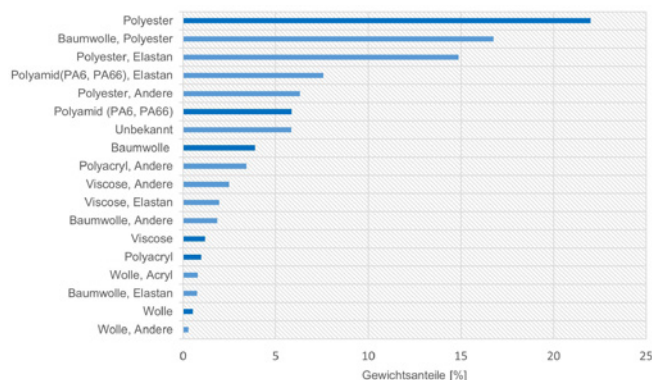


Abbildung 1: Gewichtsanteile nach Materialzusammensetzung

Die drei größten Gewichtsanteile stellen Textilien aus Polyester, Baumwolle-Polyester-Mischungen und Polyester mit Elastananteil dar. Dies entspricht auch dem Materials Market Report (TexEx 2024), der Polyester mit 57 % als meistproduzierte Faser weltweit erfasst. Das Recycling von Polyester kann mechanisch als auch chemisch erfolgen. Für beide Verfahren wird in der Praxis eine Zerkleinerung des Materials vorgenommen als auch eine Störstoffentfernung. Im genannten Polyester-Anteil sind 25 % der Textilien mit Störstoffen besetzt oder befindet sich in einem Verbund mit mehreren Materialschichten. Die effektive Aufbereitung des Abfallstroms trägt demnach eine wichtige Rolle für wirtschaftliches Recycling.

Unter Berücksichtigung der Standardabweichung des Spektrometers von 7 % sowie der technischen Herausforderung bei der Detektion von geringen Elastan-Anteilen konnte für einen Gewichtsanteil von knapp 30 % der Stichproben ein Vollmaterial (Polyester, Baumwolle, Polyamid, Viscose, Wolle) erkannt werden. Naturfasern spielen mit einem Gewichtsanteil von 4,5 % eine eher untergeordnete Rolle im Abfallstrom, dies spiegelt auch die hohe Nachfrage dieser Materialien auf dem aktuellen Alttextilmarkt wider.

Zusätzlich bedarf es für den Naturfaseranteil einer Entfärbung der Fasern, da mehr als 75 % einen mittleren bis dunklen Faseranteil aufweisen.

Überraschend ist der Anteil der Textilien, die keine Fehler, waschbare Flecken oder reparierbare Beschädigungen aufweisen. Diese Textilien machen sogar 57 % aller untersuchten Teile aus. Damit stehen neben der verfahrenstechnischen Frage für ein Recycling insbesondere die wirtschaftliche Machbarkeit und Möglichkeiten politischer Förderungen für die Aufbereitung zur Wiederverwendung im Mittelpunkt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Aktuell entsprechen insbesondere Bekleidungstextilien keinem recycelfähigen Design und werden nach der Entledigung und Sortierung thermisch verwertet. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass insbesondere das Recycling von Polyester aus Alttextilien von hoher Relevanz ist. Der Abfallstrom aus der gewerblichen Sortierung in Thüringen könnte um bis zu 50 % reduziert werden, wenn Post-Consumer Textilien als Eingangsstoffe in großmaßstäbliche Aufbereitungs- und Recyclingprozesse Einzug finden. Der Anteil an Naturfasern ist gering, was die vorhandene Nachfrage nach diesem Stoffstrom bei den Sortierunternehmen bestätigt. Die Ergebnisse stellen die Grundlage für die Entwicklung innovativer Sortier- und Aufbereitungslösungen sowie nachhaltiger Abfallmanagementstrategien dar.

Aktuell werden aus wirtschaftlichen Gründen auch Textilien verbrannt, die durch Wäsche oder Reparatur einer Wiederverwendung zugeführt werden könnten. Hier setzen weitergehende politische und wirtschaftliche Fragestellungen an.

Danksagung

Die Untersuchungen finden im Rahmen der Forschungsgruppe „seRo.inTech- Einsatz innovativer Technologien zur Erschließung sekundärer Rohstoffquellen in Thüringen“ (01/2024-06/2026, Nr. 2023 FGR 0092) statt. Das Projekt wird durch den Freistaat Thüringen gefördert und durch den Europäischen Sozialfonds PLUS kofinanziert.

Literatur

- Jungmichel, N.; Wick, K.; Nill, M. Dr. (2020): Kleider mit Haken. Fallstudie zur globalen Umweltinanspruchnahme durch die Herstellung unserer Kleidung. Dessau, Umweltbundesamt (Hg.), 2020.
- Europäische Kommission (2022): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen EU-Strategie für nachhaltige und kreislauffähige Textilien.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2024): Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. Arbeitsgruppe Öffentlichkeitsarbeit, Online-Kommunikation, Trends & Analysen, Berlin, 2024.
- Bundesministerium der Justiz (2012): Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 2. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 56) geändert worden ist
- Andini, E.; Bhalode, P.; Gantert, E.; Sadula, S.a; Vlachos, D. (2024): Chemical recycling of mixed textile waste. Sci. Adv. 2024, 10 (27).
- Feldbaumer, M.; Granzer-Sudra, K.; Ganglberger, E. (2022): Sekundärrohstoffe für die österreichische Textilindustrie. Kurzstudie mit Handlungsempfehlungen für die österreichische FTI-Politik, Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik (ÖGUT), Wien.
- Textile Exchange (2024): Materials Market Report. Textile Exchange (Hg.), 2024.
- Löw, C.; Lorösch, H.; Moch, K. (2024): Textilrecycling – Status Quo und aktuelle Entwicklungen. Kurzstudie im Auftrag des NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V., Öko-Institut (Hg.), 2024.

Kontakt

M. Sc. Melanie Börmel, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Bauhaus-Universität Weimar, Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infrastruktursysteme (b.is)

Tel.-Nr.: 03643/584670

E-Mail: melanie.boermel@uni-weimar.de

Homepage: <https://www.uni-weimar.de/de/bau-und-umwelt/professuren/ressourcenwirtschaft/>

TEIL 3

Metallrecycling

Leitung:

Prof. Dr.-Ing. Mario Mocker

„Closed loop by LIPS“ – Legierungsspezifisches Aluminium-Neuschrottrecycling für die Automobilindustrie

Abstract: Das Forschungsprojekt KANAL verfolgt das Ziel eines geschlossenen Kreislaufs für Aluminium-Neuschrott aus der Automobil-Herstellung. Im Fokus steht die Nutzung einer durchsatz- und qualitätsoptimierten LIPS-Anlage zur Trennung der Legierungsgruppen 5xxx und 6xxx gemeinsam mit der Einbeziehung aller Stakeholder entlang der Prozesskette. Im Probetrieb der LIPS-Anlage wurden Untersuchungen zur Quantifizierung des Einflusses der Parameter Durchsatz und Wertstoffmischung auf die Leistungsfähigkeit der LIPS-Anlage (Wertstoffausbringung und Reinheit) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wertstoffmischung im Input und die Durchsatzrate entscheidenden Einfluss auf die Reinheit und die Wertstoffausbringung haben. Bei massenmäßig gleichverteiltem Input und Durchsatzraten von 2 t/h und 3,5 t/h konnten Reinheiten von über 95% erzielt werden.

1 Einleitung

Aluminium ist einer der wichtigsten metallischen Werkstoffe und das wichtigste Leichtmetall mit Anwendungen in den Schlüsselbranchen Automobil, Bauwesen und Verpackung. In Deutschland lag der Aluminiumbedarf im Jahr 2020 bei 2,1 Mio. t/a, von welchen etwa ein Drittel durch Sekundäraluminium gedeckt wird (Vasters und Franken 2020). Weltweit wird mit einem Bedarf von ca. 14,4 Mio. t Sekundäraluminium gerechnet. Deutschland verfügt nicht über Bauxit als Aluminium-Primärrohstoff und ist daher vollständig von Importen abhängig. Gleichzeitig werden knapp 1 Mio. t Aluminiumabfälle und -schrotte exportiert (Bookhagen et al. 2022). Mit 45% des deutschen Aluminiumverbrauchs stellt die Automobilindustrie den größten Anwendungsbereich dar, da konventionelle Neuwagen ca. 180 kg und Elektrofahrzeuge ca. 440 kg/Fahrzeug an Aluminium enthalten (Wirtschaftsvereinigung Metalle 2021). Dadurch steigt der Aluminiumbedarf mit der zunehmenden Produktion batterieelektrischer Fahrzeuge weiter an (DuckerFrontier 2019).

Im Rahmen des vom Technologietransfer-Programm Leichtbau des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Forschungsprojekts „KANAL“ – „Kreislaufsistem für funktionales Aluminium-Neuschrottrecycling aus der Automobilproduktion mittels laserinduzierter Plasmaspektroskopie (LIPS)“ wurde 2024 in Gaggenau eine speziell für Aluminium-Neuschrotte entwickelte LIPS-Sortieranlage errichtet und für einen Demonstrationsbetrieb bereitgestellt: Bei der Herstellung von Automobil-Leichtbaukarosserien kommt es zur Vermischung von Aluminium der 5xxx- und 6xxx-Legierungsgruppe, die bislang im Recycling nicht erkannt und sortiert werden konnten. Die Verwertung dieser Legierungsgemische führt durch die Entstehung von Gusslegierungen zu einer erheblichen Qualitätsverschlechterung. Deshalb mussten zur Herstellung rezyklathaltiger, hochwertiger Knetlegierungen für die Automobil-Herstellung bisher große Anteile energieintensiv hergestellten Primäraluminiums zugemischt werden, um die Konzentration nicht gewünschter Legierungselemente herabzusetzen.

Als zentraler technischer Schritt der Legierungstrennung und damit der Kreislaufschließung wird die durchsatz- und qualitätsoptimierte LIPS-Technologie eingesetzt, die die gemischten Aluminiumschrotte der Legierungsgruppen identifiziert und trennt. Das Einbeziehen aller Stakeholder entlang der Prozesskette, der Anfallstelle von Aluminium-Neuschrotten aus der Automobil-Herstellung (Mercedes-Benz), der Identifikation und Sortierung (Tomra) im Recyclingunternehmen (Lang Recycling) und der Verwertung bzw. Halbzeugherstellung (Novelis) ermöglicht das Erreichen eines Gesamtoptimums im Recyclingprozess anstelle der üblichen betriebspezifischen Prozessoptimierung. Technisch und wissenschaftlich wird das Projekt durch die Umweltkanzlei (Laatzten) und die Hochschule Pforzheim begleitet.

Im aktuellen Probetrieb der LIPS-Anlage wird das Ziel verfolgt, den Einfluss grundlegender Prozessparameter wie z. B. Blechdicke oder Partikelgröße auf die Sortier-Leistungsfähigkeit der Anlage zu quantifizieren. Dabei wird als Zielgröße eine Reinheit der Konzentrate von mind. 95% angestrebt.

2 Methodik

Für die Einfahrversuche wurden jeweils 270 kg Coil-Abschnitte von zwei Legierungsgruppen (5xxx, 6xxx) in der Zerkleinerungsanlage eines Projektpartners zerkleinert und farbig lackiert. Die hier dargestellten Zweistoff-Versuche wurden mit den Durchsätzen 2 t/h (Charge 1 - 4), 3,5 t/h (Charge 5 - 8) und 5 t/h (Charge 9 - 12) zu je vier Wertstoffmischungen kombiniert und durch die LIPS-Anlage sortiert (Tabelle 1). Dabei wurde als Zielfraktion die 6xxx-Legierung definiert und als „Eject“-Fraktion in der LIPS-Anlage durch Positivsortierung abgetrennt, während als weitere Fraktion die „Drop“-Fraktion mit dem sonstigen Aufgabematerial (vorwiegend 5xxx) verblieb.

Tabelle 1: Versuchsübersicht

Chargen-Nr.	Anteil 5xxx [Gew.-%]	Anteil 6xxx [Gew.-%]	Durchsatz [t/h]	Blechdicke [mm]
1	25,0	75,0	2	1
2	33,3	66,6	2	1
3	50,0	50,0	2	1
4	75,0	25,0	2	1
5 – 8	Mischungen analog zu Charge 1 – 4		3,5	1
9 – 12	Mischungen analog zu Charge 1 – 4		5	1

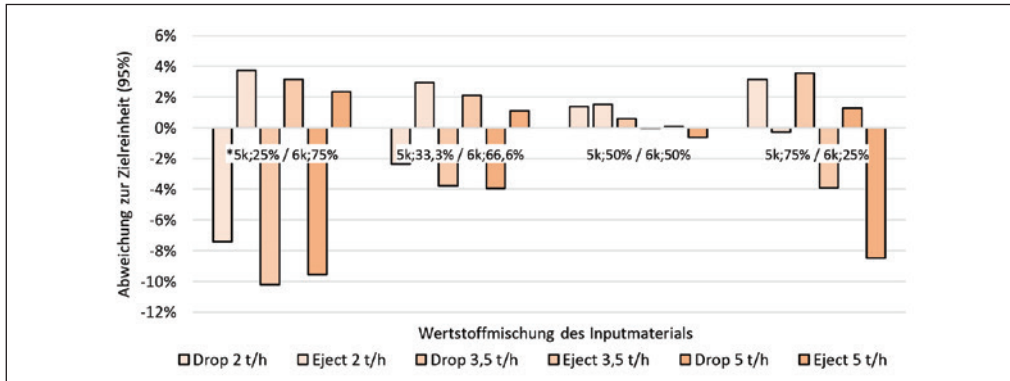
Zu jedem Versuch wurde alle 30 s eine dreisekündige Probe aus dem bewegten Stoffstrom des Anlagen- auslaufs entnommen, was einer Probemasse von ca. 10 Gew.-% der Inputmasse entspricht. Zur Ermittlung der Korngrößenverteilung wurde die Probemasse zufällig in ca. 1 Gew.-% große Tranchen aufgeteilt und mit der Vibrationssiebmaschine AS 450 basic (Retsch) bei voller Amplitude, unter Verwendung der Analysesiebe mit den Maschenweiten 63 mm, 45 mm, 31,5 mm, 22,4 mm und 16 mm, für drei Minuten gesiebt.

Für die Quantifizierung der Sortierleistung wurden alle Massenströme erfasst und zur Ermittlung des Wertstoffausbringens und der Reinheit der Konzentrate einer (händischen) stofflichen Analyse unterzogen. Diese Analyse basiert auf der vorab erfolgten farblichen Kennzeichnung aller Partikel.

3 Ergebnisse und Diskussion

In den Versuchen mit den Chargen 1, 2, 5, 6, 9 und 10 (d. h. mit massereicherer 6xxx-Zielfraktion im Input) wird im Eject-Konzentrat eine Reinheit von über 95% erreicht, während die 5xxx (Drop)-Fraktion in diesen Fällen eine Reinheit unter 95% aufweist (Abbildung 1). Bei massereicherer Drop-Fraktion kehrt sich dieses Verhältnis um. Eine Reinheit von 95% in der Drop- und Eject-Fraktion konnte nur bei gleichmäßig verteiltem Input und bei Durchsatzraten von 2 t/h und 3,5 t/h erreicht werden. Bei einem Durchsatz von 5 t/h unterschreitet mit der verwendeten Korngrößenverteilung die Eject-Fraktion die Ziel-Reinheit um 0,6%-Punkte, was auf ein Überfahren der Anlage (mechanische Grenze des Ausblasens) hindeutet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wertstoffmischung des Inputs entscheidend für die erreichbare Produktreinheit ist. Dies gilt insbesondere für gleichmäßige Wertstoffmischungen im Input, die jedoch im Rahmen des KANAL-Projekts selten auftreten, sowie für massereichere Eject-Fractionen. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen ist jedoch typischerweise die Zielfraktion jene mit geringerem Massenanteil. Für die Auswahl sind jedoch detaillierte Kenntnisse über die (Massen-)Zusammensetzung des Input-Materials nötig. Im KANAL-Vorhaben können diese Übergabe-Parameter (Schnittstelle zwischen Anfall und Sortierung) durch die Integration aller relevanten Stakeholder entlang der gesamten Wertschöpfungskette abgebildet werden. Darüber hinaus ist mit zunehmender Durchsatzrate eine Abnahme der Reinheit festzustellen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, die Sortieranlage innerhalb ihrer optimalen Leistungsgrenzen zu betreiben, um eine gleichbleibend hohe Reinheit der Konzentrate zu gewährleisten. Durchsätze bis über 10 t/h sind mit anderen (dickwandigeren) Schrotten jedoch auch mit hohen Produktreinheiten problemlos möglich.



*z. B.: Gemisch aus den Legierungsgruppen 5xxx zu 25 Gew.-% und 6xxx zu 75 Gew.-%

Abbildung 1: Abweichungen vom 95%-Reinheits-Zielwert bei der Sortierung der Versuchschargen

Wertstoffmischungen und Durchsatzrate haben einen erheblichen Einfluss auf die Wertstoffausbringung der Sortieranlage (Tabelle 2). Eine höhere Wertstoffausbringung in der Drop-Fraktion wird durch einen höheren Anteil an Legierung 5xxx erzielt, wohingegen eine höhere Ausbringung im Eject-Konzentrat durch eine Zunahme der Legierung 6xxx erzielt wird. Weiter nimmt die Wertstoffausbringung in beiden Fraktionen mit zunehmender Durchsatzrate ab.

Tabelle 2: Wertstoffausbringung in Abhängigkeit von Durchsatz und Ausgangsmischung (6xxx Eject)

Mischung Durchsatz	5xxx; 25 Gew.-%	6xxx; 75 Gew.-%	5xxx; 33,3 Gew.-%	6xxx; 66,6 Gew.-%	5xxx; 50 Gew.-%	6xxx; 50 Gew.-%	5xxx; 75 Gew.-%	6xxx; 25 Gew.-%
2 t/h	96,3%	95,4%	96,1%	96,1%	96,4%	96,5%	98,3%	94,3%
3,5 t/h	93,0%	95,7%	94,1%	95,7%	94,6%	95,9%	96,9%	95,7%
5 t/h	92,1%	94,9%	92,3%	95,5%	93,9%	95,5%	95,6%	88,3%

Eine Auswertung der Korngrößenverteilung zeigt über alle Versuche hinweg eine konstante Verteilung, die weder von den Durchsatzraten noch den Wertstoffmischungen signifikant beeinflusst wurde.

4 Ausblick

Bereits im Probetrieb konnten mit binären Aluminium-Neuschrottgemischen Produktreinheiten und Wertstoffausbringungen von über 95% erzielt werden. Dennoch ist festzuhalten, dass die dargestellten Ergebnisse nur für den aktuellen Stand der Sortieranlage gültig sind. Diese befindet sich im Probetrieb und wird kontinuierlich Optimierungen unterzogen. Zudem gelten die Ergebnisse ausschließlich für die spezifischen Modellmaterialien. Durch zukünftige Prozessoptimierungen, insbesondere durch die Feinabstimmung von Übergabeparametern an unternehmensübergreifenden Schnittstellen und Anlagenoptimierungen, ist zu erwarten, dass Reinheiten von über 95% bei weiterhin hoher Wertstoffausbringung erreicht werden können.

Darüber hinaus wurde, begleitend zu den Versuchen, die Leistungsaufnahme der Gesamtanlage (Förder- und Siebtechnik, Kompressor-Anlage, LIPS-Anlage) sowie der Volumenstrom des Kompressors, der die Luft für das zielgerichtete Ausblasen der Zielfraktion bereitstellt, erfasst. Diese Daten ermöglichen neben Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ebenfalls die Ermittlung umweltlicher Einsparpotenziale, die zusätzlich die Substitution des recycelten Sekundäraluminiums anstelle von Primäraluminium beinhalten. Nach erfolgreicher Implementierung der Prozesskette im Bereich der Aluminium-Neuschrottsortierung soll die Lösung auf weitere Neu- und Altschrotte, auch aus anderen Branchen wie die Luftfahrt-, Bau- oder Verpackungsbranche transferiert werden.

Literatur/Quellen

- Bookhagen, Britta; Eicke, Corinna; Elsner, Harald; Henning, Sören; Kern, Marius; Kresse, Carolin et al. (2022): Deutschland - Rohstoffsituation 2021. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 27.07.2023.
- DuckerFrontier (2019): Aluminum Content in European Passenger Cars. Online verfügbar unter https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/10/aluminum-content-in-european-cars_european-aluminium_public-summary_101019-1.pdf, zuletzt geprüft am 04.09.2024.

Vasters, Jürgen; Franken, Gudrun (2020): Aluminium. Informationen zur Nachhaltigkeit. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/aluminium.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 27.07.2023.

Wirtschaftsvereinigung Metalle (Hg.) (2021): Metallstatistik. Gemeinsam Aufbrechen 2020. Online verfügbar unter <https://www.wvmetalle.de/publikationen/metallstatistiken>, zuletzt geprüft am 04.09.2024.

Kontakt

Dr.-Ing., Jannick Schmidt, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Hochschule Pforzheim, Fakultät für Technik, Arbeitsgruppe Nachhaltige Produktentwicklung

Tel.-Nr. +49-7231-28-6119

E-Mail: Jannick.schmidt@hs-pforzheim.de

Scherensand als Beitrag zur Kreislaufwirtschaft in der Stahlindustrie

Abstract: Die Transformation der europäischen Stahlindustrie weg von der Hochofenroute hin zum Elektrolichtbogenofen stellt neben dem metallurgischen Technologiewechsel auch eine fundamentale Änderung in Bezug auf die benötigten Einsatzstoffe dar. Während bis dato auf bergbaulich gewonnene Primärrohstoffe zurückgegriffen wird, liegt die Zukunft in der Wiederverwendung von Sekundärrohstoffen. Es ist daher unerlässlich, vorhandene Schrottreserven möglichst effektiv zu nutzen und auch aus stark verunreinigten Fraktionen Eisenbestandteile möglichst effizient rückzugewinnen. Ein solcher Weg zur Rückgewinnung von Eisenschrotten aus Rückständen der Abfallbehandlung wurde im Zuge des Projektes Meteor am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben aufgezeigt.

1 Einleitung

Im Rahmen der globalen Klimaziele hat sich die europäische Eisen- und Stahlindustrie verpflichtet, ihre produktionsbedingten CO₂-Emissionen bis 2030 um mindestens 50 % gegenüber dem Jahr 1990 zu senken. Dies ist nur durch einen Technologiewechsel in der Herstellung und eine Abweichung von der Primärroute möglich. Stahlschrott ist dabei der wesentliche sekundäre Rohstoff. Er ermöglicht die Stahlerzeugung mit deutlich geringerem Ressourceneinsatz und macht damit sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile greifbar. Elementar für das Gelingen dieses ambitionierten Vorhabens ist es, die Versorgung mit Schrotten sowohl auf qualitativer als auch auf quantitativer Ebene zu sichern und sämtliche vorhandene Reserven möglichst effizient zu nutzen (Hackl et al. 2022). Die Europäische Schrottsortenliste klassifiziert Schrotte, die für das metallurgische Recycling geeignet sind, in insgesamt elf Kategorien. Drei dieser elf Kategorien werden aufgrund physikalischer Parameter als Scherenschrotte bezeichnet (E1, E2, E3). Dabei handelt es sich um Alt- oder Neuschrotte mit einer Materialstärke von mehr als 3 mm, bei deren chargierfähiger Aufbereitung hydraulische Schrottscheren als integraler Prozessschritt eingesetzt werden (BDSV Fassung 1995).

Hydraulische Schrottscheren, auch als Guillotinescheren bezeichnet, sind Zerkleinerungsaggregate für großstückige, dickwandige Stoffe mit Zähbruchverhalten (Stahl- und NE-Schrotte). Die Zerkleinerungsenergie wird in Form von Scherbeanspruchungen schneidend/scherend in das zu zerkleinernde Gut eingetragen. Dazu erfolgt die Aufgabe des Schrottes in eine Zuführmulde, von wo ein hydraulischer Zuführschieber das Material auf den Scherentisch befördert. Dort sorgt ein Niederhalter für eine Befestigung des Gutes im Scherenmaul. Die Zerkleinerungswirkung erfolgt durch das bewegliche Obermesser und das fest am Scherentisch verankerte Untermesser. Das zerkleinerte Gut fällt anschließend in einen direkt unter dem Scherenmaul befindlichen Bunker. Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau einer Guillotineschere (Nickel 1996).

Hydraulische Scheren können keine Fertigprodukte mit definierten Abmessungen erstellen. Aus diesem Grund erfolgt nach der Zerkleinerung üblicherweise eine Klassierung mittels Trommelsieb (Rudevskij und Kralja 1982). Der zerkleinerte Schrott wird dafür mittels Mehrschalengreifer aus dem Bunker entnommen

und dem Klassieraggregat aufgegeben. Sämtliche Partikel, die zu klein sind um mittels Mehrschalengreifer manipuliert zu werden, verbleiben daher im Bunker. Scherensande stellen somit ein unvermeidliches Beiprodukt in Scherenbetrieben dar. Gesicherte Verwertungswege für dieses Material sind bis dato nicht bekannt.

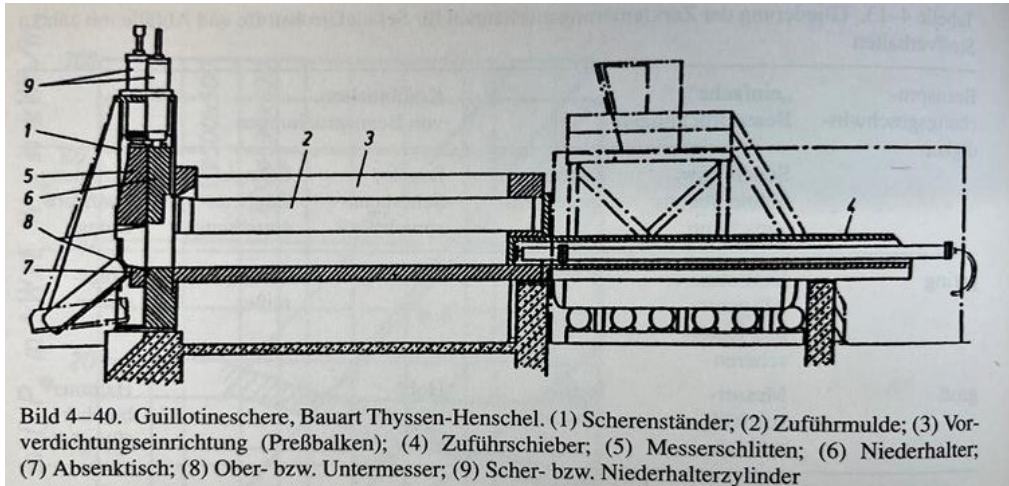


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Guillotineschere (Nickel 1996).

Am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben wurde im Zuge des Forschungsprojektes MeteOR das Wertstoffpotenzial von Scherensanden erhoben und zudem ein mechanisches Verfahren zur Wertstoffrückgewinnung entwickelt.

2 Methodik

2.1 Probenahme

Bei dem Probenmaterial handelt es sich um Scherensandproben aus den Bunkern zweier Österreichischer Scherenbetriebe. Da die Zusammensetzung des Scherensandes von den jeweils geschnittenen Schrotten abhängt, erfolgte eine Mischung der Betriebsproben, um möglichst repräsentative Ergebnisse zu generieren. Das massenbezogene Mischverhältnis betrug 59 % zu 41 %. Die Probenahme erfolgte betriebsseitig.

2.2 Aufbereitungstechnische Methoden

2.2.1 Waschversuche

Das Material wurde einem Waschbottich aufgegeben. Davor erfolgte eine Abtrennung der Korngrößenklasse (KG-Klasse) > 13 mm auf einem intensiv bebrauten Siebrost. Sämtliche Bestandteile < 13 mm wurden in einem diskontinuierlich betriebenen Rührkessel 10 min lang behandelt und im Anschluss über einen starren Rost mit einer Maschenweite von 1 mm abgeschlämmt.

2.2.2 Versuche zur Metallrückgewinnung

Das Material > 1 mm (also die KG-Klassen 0|13 mm und > 13 mm) aus den Waschversuchen wurde nach vollständiger Trocknung im Technikum der Firma IFE Aufbereitungstechnik GmbH einem Magnet- und einem Wirbelstromscheider aufgegeben, um metallische Anteile rückzugewinnen.

Die Auswertung sämtlicher Versuche erfolgte durch Verwiegung der jeweils erstellten Fraktionen und daraus der Berechnung von Massenverteilungen.

3 Ergebnisse

3.1 Makroskopische Materialcharakterisierung

Scherensande sind ein Gemisch von metallischen, mineralischen und organischen Bestandteilen. Beim Schneidprozess wirken extrem hohe Kräfte sowohl auf das zu schneidene Gut als auch auf das Messer selbst, sodass es beiderseits zu Abrieben kommt. Außerdem entstehen feine Metall- und Kunststoffpartikel, die in den Scherensand gehen. Sämtliche Bestandteile sind mit Ölen und Lacken verunreinigt. Zusätzlich werden durch die Mischung mit Schrottplatzkehricht Steine, Holz und Erde (mineralische und organische Komponenten) in den Sammelbunker eingebracht. Das Material wird üblicherweise im Freien gelagert und ist daher der Witterung ausgesetzt. Bedingt durch einen Feuchtegehalt von über 10 m% kommt es zu erheblicher Agglomerationsneigung zwischen sämtlichen Bestandteilen, und das Material liegt grobstückig (bis 400 mm große Brocken) vor. Daher ist es vor einer technischen Sortierung unumgänglich, diese Verwachsungen aufzuschließen und die Komponenten freizulegen.

3.2 Ergebnisse der Waschversuche

Die Waschung erfolgte in einem runden, unten zylindrisch zulaufenden Edelstahlkessel mit elektrischem Rührwerk. Das Material wurde über einen Siebrost mit einer Maschenweite von 13 mm in den Waschkessel eingeschlämmt. Es hat sich gezeigt, dass diese Vorgehensweise die direkte Abtrennung einer Schrottfraktion im Umfang von 7 m% ermöglicht. Die in den Scherensanden vorhandenen größten Einzelpartikel (keine Agglomerate) > 13 mm sind dementsprechend metallisch.

Das Material im Korngrößenbereich (KG-Bereich) 0|13 mm gelangte über den Unterlauf in den Waschbottich und wurde darin in einem Wasserbad mittels Rührwerks bei 80 Umdrehungen pro Minute für 10 Minuten behandelt. Das Material hat eine deutlich höhere Dichte als Wasser und sinkt direkt zu Boden, wo es eine dichte Schlammschicht bildet. Es war in den Versuchen auch durch Variation der Rührerdrehzahl nicht möglich, den Schlamm zu fluidisieren. Ein Ausschlämmen des Gutbettes aus dem Waschbottich ist lediglich durch Kippen des Edelstahlbehälters möglich. Der entstandene Schlamm wurde im Nachgang über ein intensiv bebraustes Sieb separiert. Dabei entsteht eine Trübe im KG-Bereich 0|1 mm (34 m%) und ein fester Rückstand im KG-Bereich 1|13 mm (59 m%) (Angaben in m% in Bezug auf die Originalsubstanz).

Die Waschsiebung auf einem intensiv bebrausten Siebdeck eignet sich sehr gut für den Aufschluss des Materials. Die Behandlung in einem Rührbottich hat sich aufgrund der im Vergleich zu Wasser hohen Dichte des Materials als unvorteilhaft erwiesen. Eine Läutertrommel wäre dazu besser geeignet, da diese zusätzliche mechanische Kräfte in das Material einleiten kann.

Das Waschwasser aus den Versuchen wurde beprobt und eine chemische Analyse beauftragt. Diese soll Informationen bezüglich der Löslichkeiten bestimmter Phasen sowie erforderlicher Nachreinigungen für die Einleitbarkeit des Wassers in die Kanalisation liefern.

3.3 Ergebnisse der Versuche zur Metallrückgewinnung

Die Waschversuche zeigten einen sehr guten Aufschlussenerfolg für das Material im KG-Bereich > 1 mm. Durch eine Klassierung des Materials nach mehrtägiger Trocknung an der Luft konnte das Material in vier gleichmäßig verteilte Dispersitätsklassen eingeteilt werden. Vor dem Aufschluss war dies nicht möglich.

Ziel der Waschversuche war es, Aufschlussverhältnisse einzustellen, die die Rückgewinnung von FE- und NE-Metallen durch Magnet- und Wirbelstromscheidung ermöglichen. Es zeigte sich, dass dafür eine erneute Siebung bei 1 mm notwendig ist. Es werden während der Trocknung ca. 7 m% Feinkorn im KG-Bereich 0|1 mm frei. Dieses Material ist durch die große Kraftwirkung im Schneideprozess derart stark magnetisiert, dass eine trennscharfe Metallrückgewinnung durch erhebliche Fehlkornausträge behindert wird. Im KG-Bereich > 1 mm ist diese problemlos möglich.

Es können 38 m% des Materials als FE-Fraktion und 2 m% als NE-Fraktion ausgebracht werden. Diese Fraktionen sind rein metallisch und können unmittelbar in den Wertstoffkreislauf rückgeführt werden (Angaben in m% in Bezug auf Trockensubstanz). Für die Restfraktion nach Magnet- und Wirbelstromscheidung sowie die beiden Fraktionen im KG-Bereich 0|1 mm (Waschschlamm und Unterkorn der Klassierung vor FE- und NE-Entfrachtung) sind aktuell chemische Analysen beauftragt. Für diese Fraktionen sind weitere aufbereitungstechnische Untersuchungen geplant, um mögliche Verwertungswege zu identifizieren.

Danksagung

Dieses Projekt wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG, www.ffg.at), FFG-Nr. FO999897764, im Rahmen der 2. Ausschreibung FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft gefördert. Die Autoren bedanken sich bei allen am Projekt beteiligten Partnern (Abbildung 2).



Abbildung 2: Logos der Konsortialpartner, der Förderagentur und des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie in zufälliger Reihenfolge

Literatur/Quellen

- BDSV (Fassung 1995): Europäische Schrottsortenliste. Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. Online verfügbar unter https://www.bdsv.org/fileadmin/service/gesetze_und_regelwerke/sortenliste_eu.pdf, zuletzt geprüft am 13.12.2024.
- Hackl, G.; Beermann, M.; Rieger, J.; Häuselmann, M.; Schenk, J.; Michelic, S. K. et al. (2022): IRONER–Potenziale für innovatives und nachhaltiges Recycling von Stahl. Leoben (Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 1/2023). Online verfügbar unter https://fti-ressourcenwende.at/resources/pdf/schriftenreihe_2023-01-ironer.pdf.
- Nickel, Werner (1996): Recycling-Handbuch. Strategien - Technologien - Produkte. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).

Rudevskij, S. J.; Kralja, L. G. (1982): Klassierung der in Guillotinescheren geschnittenen Stahlschrotte mittels Trommelsiebs. In: Rektor der Bergakademie Freiberg (Hg.): Aufbereitung metallischer und metallhaltiger Sekundärrohstoffe. Vorträge zum Berg- und Hüttenmännischen Tag 1981 in Freiberg. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (Freiberger Forschungshefte, A 664), S. 101–108.

Kontakt

Dipl.-Ing. Paul Demschar, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel.-Nr. +43 664/ 43 196 40

E-Mail: paul.demschar@unileoben.ac.at

Homepage: www.avaw-unileoben.at

Foundry Dust Recycling in Pilot Plant and Application – Resource Conservation, Substitution and Digitalization Towards 100% Efficiency

Abstract: Iron foundries generate foundry dust, which is rich in iron and silicon but remains underutilized, often relegated to landfills. The ForCYCLE II project introduced a method to recycle this dust into silicon carbide (SiC) briquettes, promoting resource efficiency in cast iron production. Building on this foundation, the ForCYCLE-Technikum (ForCYCLE-T) project refines these formulations to further reduce ecological and economic impacts. Briquette recipes incorporating quartz sand, foundry dust, Portland cement, and SiC are optimized with sustainable alternatives. These are cupola furnace slag; another residue from iron foundries; and electric arc furnace slag from steel plants that are explored as partial cement substitutes. Advanced chemical and mineralogical analyses, including X-ray diffraction (XRD), X-ray Fluorescence (XRF) and other complementary techniques, are employed to characterize the dust and its incorporation into briquettes. Initial testing has revealed that substituting Portland cement content with cupola furnace slag maintains compressive strength, while substituting quartz sand with foundry dust enhances strength by significant degrees. However, a complete sand and cement replacement increases basicity, negatively impacting furnace health. Variability in dust composition and the need for sufficient mechanical stability during handling and storage pose challenges, necessitating customized recipes to balance resource efficiency and operational feasibility. A digital tool is under development to integrate ecological and economic impact, providing foundries with a practical solution to assess the feasibility of recycling or land-filling dust based on its composition.

1 Introduction

The evidence of metal extraction from its ores suggests that the human civilization invented metallurgy as far as 5000 BC [1]. There has also been discoveries of adding different metals to form alloys during the Bronze Age around 2400 BC [2]. Fast forward to today, not only has the iron-carbon diagram helped us understand the alloying process of modern-age steel, but different furnaces have also been invented to mass produce and accommodate the global demand of steel [3]. This also brought forward the growing need to continuously redevelop metallurgical processes and produce cost-efficient alloys. Recently, the terms “sustainability” and “circular economy” also joined the topic of metallurgy to account for the rising landfilling of foundry waste in ecological and economical perspectives [4] [5]. In 2012 the Circular Economy Act (KrWG)

was passed, followed by EU's Circular Economy Action Plan of 2020, both aiming to promote resource conservation and protect the environment and people from the production and handling of waste.

As the need of joining sustainability with metallurgy has now become a demand, the Bavarian State Ministry for Environment and Consumer Protection (StmUV) created the ForCYCLE II Project Network. It consists of 11 projects to research and implement digitalization, material substitution and integration of product policies regarding efficient use of resources and recycling. Within this network, the Project 9 "*Securing and Preserving Raw Materials through Processing and Recycling of Foundry Dusts - Bavarian Consortium for Foundry Dust-Metal Recovery - BGMR*" [6] was conducted.

Foundries face challenges recycling dust generated during production due to its varying chemical and physical properties. Most dust, rich in metals and silicon dioxide, is currently landfilled or backfilled, incurring high disposal costs and requiring transport to other regions due to German legal restrictions. Within the BGMR project of the ForCYCLE II network a method was developed to incorporate foundry dust into silicon carbide [7]. This approach aims to reduce waste, improve resource efficiency, and minimize ecological impact. However, the heterogeneity of the dusts, the selection of viable alternative binders [8] [9] and the required upscaling of the briquetting process required a follow-up project, "*Foundry Dust Recycling in Pilot Scale and Application - Resource Efficiency, Substitution and Digitalization towards 100 % Efficiency (GiTe)*" which was conducted in the subsequent project network ForCYCLE-Technikum.

The research within GiTe focuses on three aspects: optimizing briquette recipes for sustainability, transportability and stability, analyzing dust composition to quantify recyclable elements, and developing a tool to evaluate recycling's economic viability.

2 Methodology

Due to compositional variability observed even within the same type of dust, the analysis of dust from any source remains crucial to understanding its behavior when incorporated into briquettes. Consequently, advanced analytical techniques such as inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES), XRD, and XRF were used for accurately determining the chemical and mineralogical composition of the dust. The project aims to develop briquettes incorporating foundry dust, where not only physical stability, but basicity as well, are critical factors for industrial feasibility. For this, mechanical tests and chemical composition analyses were conducted to assess the structural integrity and compositional suitability of the briquettes for industrial applications.

2.1 Formulation and Testing of SiC Briquettes

2.1.1 Recipe Formation

The briquette formulation must maintain an appropriate level of basicity to align with the specific requirements of the foundries using it. A mismatch between the basicity of a furnace's refractory lining and its charge can accelerate furnace degradation. The briquette composition includes Portland cement, sand, foundry dust, alternative binders such as granulated electric arc furnace slag or cupola furnace slag, and SiC, with SiC serving as a critical alloying component in steel production. Chemical composition analyses have confirmed that key contributors to basicity – CaO, MgO, and SiO₂ – are present in the foundry dust and other recipe materials. As the foundry dust has high probability of composition variations, unlike the rest of the recipe material, a balance is crucial to achieve in terms of basicity; there is need for a quantitative value that fits according to the requirements of every foundry.

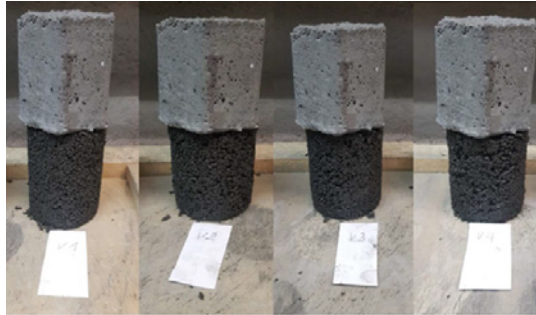


Figure 1: Load test of Briquettes containing Foundry Test

2.1.2 Mechanical Testing of Briquettes

Foundries require high-quality SiC briquettes; however, quality assessment predominantly relies on subjective methods based on empirical observations rather than standardized parameters. Key evaluations include a load test, where moldings must sustain their own weight after one hour (Fig. 1), and an impact resistance test, involving a drop from 1.5 meters to assess potential damage. Although hardness testing—rubbing moldings against each other—is traditionally conducted, it has been excluded in this research due to the lack of comparability and quantifiable metrics. Instead, compressive strength is analyzed at 48 hours and 21 days post-manufacture.

This timeframe is critical, as transportation of briquettes from production to storage and eventually to foundry partners typically begins 48 hours after curing. Briquettes are then transferred to foundry sites three to four weeks after production, requiring sufficient structural integrity to withstand handling and transit.

Thus, a briquette formulation must not only align with the basicity requirements of foundries but also ensure adequate structural stability for transportation and practical use.

2.2 Elemental and Phase Analyses of Foundry Dust

The high variations in chemical composition of foundry dust can also potentially have zero or negative impact on the economic part of the recycling of foundry dust. Additionally, there is an interest in investigating the composition of cupola furnace slag and electric arc furnace slag, which have the potential to partially replace cement in briquettes, contributing to a reduced carbon footprint. For this reason, 76 samples of foundry dust, sourced from different production stages, and 6 slag samples are planned for analysis.

Elemental composition analyses of the foundry dust samples were conducted via ICP-OES, performed by bifa Umweltinstitut. XRD analyses were used to identify the mineralogical bonding forms of these elements, enabling the detection of metallic iron and quartz, both of which are critical for recycling purposes. XRF was used to analyse the elemental composition of the dust and slag samples.



Figure 2: Cupola furnace slag to substitute the cement content in briquettes

2.3 User-Friendly Dust Recycling Tool

The cost effectiveness of the foundry dust recycling is also an important part of the project ForCYCLE-Technikum. ForCYCLE II already formed a digital tool to quantify the economics and ecological impact of dust landfilling to help foundries decide whether recycling or landfilling is a better option. However, this digital tool is currently under development for optimization and is linked with the final phase of the project.

Results

As of this writing, project outcomes are still being finalized and first arrival is expected weeks before the conference. Due to the length restrictions, only a brief overview of results available can be provided. The briquette formulation results will include a comparative analysis of various recipes based on compressive strength after 48 hr and 21 days, facilitating the selection of an optimal composition that incorporates recycled dust and furnace slag. Dust chemical characterization results will include data obtained through XRD, XRF and Mössbauer spectroscopy, complemented by chemical analyses using ICP-OES. This will enhance the mineralogical composition assessment. Ultimately, a digital tool will integrate these findings, providing a comprehensive solution to assist foundries in determining whether to recycle or landfill specific dust types based on their chemical and mineralogical properties, and the overall costs involved.



Figure 3: : Dust sample from a partner foundry taken from one of the dust filters

Acknowledgements

The project GiTe is part of the joint research project „ForCYCLE Technikum“ funded by the Bavarian State Ministry of the Environment and Consumer Protection and coordinated by the Centre for Basic Materials Efficiency (REZ).

References

- [1] M. Radivojević, T. Rehren, S. Farid, E. Pernicka, and D. Camurcuoğlu, “Repealing the Çatalhöyük extractive metallurgy: The green, the fire and the ‘slag’,” *Journal of Archaeological Science*, vol. 86, pp. 101–122, 2017. doi: 10.1016/j.jas.2017.07.001. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440317301024>
- [2] F. Habashi, “Extractive Metallurgy,” *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pp. 2828–2831, 2001, doi: 10.1016/B0-08-043152-6/00505-2.
- [3] M. Yellishetty, G. M. Mudd, and P. G. Ranjith, “The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue?,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 1, pp. 78–90, 2011. doi: 10.1016/j.jclepro.2010.08.020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652610003483>

- [4] M. F. Iqbal *et al.*, “Sustainable utilization of foundry waste: Forecasting mechanical properties of foundry sand based concrete using multi-expression programming,” *The Science of the total environment*, early access. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146524.
- [5] R. Alonso-Santurde, A. Coz, J. R. Viguri, and A. Andrés, “Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks,” *Construction and Building Materials*, vol. 27, no. 1, pp. 97–106, 2012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811004545>
- [6] “FORCYCLE II - GOALS, TOPICS, PROJECTS | Bavarian State Ministry for the Environment and Consumer Protection.” Accessed: 12/18/2024. [Online]. Available: <https://www.stmuv.bayern.de/themen/ressourcenschutz/forcycle/forcycle2/index.htm>
- [7] C. Strakos, E. Bauer, C. Marx, and R. Weihrich, “A new approach for quantifying ecological sustainability in waste management by using the method of modelling,” *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, early access. doi: 10.1177/0734242X231151601.
- [8] O. Y. Bayraktar, “The possibility of fly ash and blast furnace slag disposal by using these environmental wastes as substitutes in portland cement,” *Environmental monitoring and assessment*, early access. doi: 10.1007/s10661-019-7741-4.
- [9] S. Z. Carvalho, F. Vernilli, B. Almeida, M. D. Oliveira, and S. N. Silva, “Reducing environmental impacts: The use of basic oxygen furnace slag in portland cement,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 385–390, 2018. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.130. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617324307>
- [10] Christian Strakos *et al.*, „Rohstoffsicherung- und erhalt durch Aufbereitung und Verwertung von Gießerei-Stäuben – Bayerisches Konsortium für Gießereistaub-Metall-Rückgewinnung (BGMR): Projektverbund für mehr Ressourceneffizienz in der bayerischen Wirtschaft insbesondere für KMU und Handwerk – ForCYCLE II,“ (Abschlussbericht), early access.

Contact

Talha Waseem M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Michael Schmidt

Noah Schnurrenberger

Daniel Vollprecht

Universität Augsburg

Tel.-Nr.: +49 821 598-69140

E-Mail: talha.waseem@uni-a.de

Website: <https://www.uni-augsburg.de/de/fakultaet/mntf/mrm/prof/reseng/team/talha-waseem/>

Anita Gottlieb

Bifa Umweltinstitut GmbH

TEIL 4

Thermische Verfahren und Reststoffe

Leitung:

Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker

Minderung von N_2O -Emissionen durch primäre Maßnahmen und Agglomerationsüberwachung bei der Klärschlammverbrennung

Abstract: Seit der Novelle der Klärschlammverordnung im Jahr 2017 gewinnt die thermische Klärschlammbehandlung in Deutschland signifikant an Bedeutung. Durch die Phosphorrückgewinnungspflicht, den Wegfall von Mitverbrennungskapazitäten und die deutliche Einschränkung der landwirtschaftlichen Verwertung steigt der Bedarf an Klärschlamm-Monoverbrennungskapazitäten. Derzeit befinden sich ca. 40 Projekte für Neuanlagen der Klärschlamm-Monoverbrennung in Planung, Vorbereitung oder bereits im Bau. Ein Großteil dieser Anlagen wird als stationäre Wirbelschicht ausgeführt, die aufgrund der typischerweise niedrigen Betriebstemperaturen ein hohes Potenzial an Lachgasemissionen haben (Stark et al., 2023).

Im Projekt ProKlär-mission werden mögliche Minderungsmaßnahmen von N_2O -Emissionen bei der thermischen Klärschlammbehandlung untersucht. Innerhalb des Projekts erfolgt die Entwicklung und Erprobung eines Agglomerationswächters für Wirbelschichtfeuerungen zur Klärschlammverbrennung. Dadurch soll mittels kontinuierlicher Überwachung des Agglomerationszustandes eine Erhöhung des sicher einstellbaren Temperaturbereichs im Wirbelbett ermöglicht werden. Ziel des Projekts ist die Ermittlung eines Temperaturoptimums zur Verminderung klimaschädlicher N_2O -Emissionen unter Berücksichtigung der NO_x - und CO -Emissionen. Ein zweiter Schwerpunkt des Projekts ist die Verbesserung der Aschequalität für eine nachgeschaltete Phosphorrückgewinnung.

1 Problemstellung

Lachgas (N_2O) ist ein hochpotentes Klimagas mit einem Treibhausgaspotenzial, das 298-mal höher ist als das von Kohlenstoffdioxid (CO_2). Trotz der mengenmäßig geringeren Emissionen verursachte N_2O im Jahr 2022 etwa 3 % der Treibhausgas-Emissionen in Deutschland (ohne Berücksichtigung von Landnutzung und Forstwirtschaft (LULUCF)) und ist global für ca. 6 % des Treibhauseffekts verantwortlich. Mit Einführung der Novellierung der 17. BImSchV wurde daher ein verpflichtendes Monitoring für N_2O in Abfallverbrennungsanlagen mit Wirbelschichtöfen sowie SNCR-Systemen mit Harnstoff eingeführt: Die perspektivische Einführung eines N_2O -Grenzwerts wird infolgedessen erwartet. (Stocker, 2014, Umweltbundesamt, 2023, 17. BImSchV, 2024)

Klärschlamm ist als stickstoffreicher Brennstoff eine besonders potente Quelle für N_2O -Emissionen. Die Bildung von N_2O in Verbrennungsprozessen hängt maßgeblich von Stickstoffgehalt und -bindungsform

des Brennstoffs, der Sauerstoffkonzentration im Rauchgas und der Verbrennungstemperatur ab (Stöcklein et al., 2018). Weitere Untersuchungen zeigen darüber hinaus eine Verringerung der Lachgasemissionen durch Verlängerung der Verweilzeit in der Nachbrennzone (Hanßen und Niebuhr, 2023). Eine Erhöhung der Verbrennungstemperatur im Ofenkopf von 842 auf 895 °C führte in einer Klärschlammverbrennungsanlage mit stationärer Wirbelschichttechnik zu einer Absenkung der N_2O -Emissionen von 350 auf 30 mg/m^3 (Stöcklein et al., 2018). Daher muss ein optimaler Temperaturbereich identifiziert werden, in dem N_2O -, NO_x - und CO-Emissionen minimiert werden. Ein lokales Minimum für diese Schadstoffe liegt im Temperaturbereich zwischen 950 und 1.050 °C. (Svoboda et al., 2006, Stöcklein et al., 2018, Fernandez Gutierrez et al., 2005)

Die starke Verschlackungsneigung von Klärschlammaschen bei hohen Temperaturen ist dabei problematisch. Aufgrund niedriger Erweichungstemperaturen werden Klärschlammfeuerungen häufig bei niedrigeren Temperaturen von (750) 850-950 °C betrieben, um Verschlackungen zu vermeiden. Diese Temperaturen stehen jedoch der Minimierung von N_2O -Emissionen entgegen.

Klärschlamm – die Schadstoffsенke der Abwasserreinigung – enthält neben problematischen Stoffen wie Schwermetallen und organischen Schadstoffen auch wertvolle Nährstoffe wie Phosphor und Stickstoff. Aufgrund teilweise ungeklärter Umweltwirkungen besteht bei bodenbezogener Verwertung ein Risiko für Umwelt und Gesundheit. Daher wurde mit der Novelle der Klärschlammverordnung vom 27. September 2017 ein schrittweiser Ausstieg aus der bodenbezogenen Verwertung eingeführt, bei gleichzeitiger Pflicht zur Phosphorrückgewinnung ab einem Phosphorgehalt von > 20 g/kg TM. Die Rückgewinnung des Phosphors erfolgt bevorzugt aus der Klärschlammasche, wodurch eine Vorbehandlung in Monoverbrennungsanlagen erforderlich wird.

Das übergeordnete Ziel im Projekt ProKlär-mission ist die Ermittlung eines optimalen Temperaturbereichs, der minimale N_2O -Emissionen bei gleichzeitiger Minimierung weiterer Emissionen (NO_x , CO) sowie der Zerstörung persistenter organischer Schadstoffe ermöglicht und die besonderen Brennstoffeigenschaften von Klärschlamm berücksichtigt. Dazu werden zwei Lösungsansätze verfolgt, um die Temperaturen in Klärschlammverbrennungsanlagen kontrolliert erhöhen und somit Lachgas-Emissionen mindern zu können.

2 Lösungsansatz

2.1 Agglomerationsfrüherkennung

Die Verbrennung von Klärschlamm erfolgt vorwiegend in stationären Wirbelschichten. Im Rahmen des Projekts erfolgt die Entwicklung und Erprobung eines Agglomerationswächters zur Überwachung des Fluidisierungszustandes in der Wirbelschicht. Die erfolgreiche Umsetzung verspricht eine Agglomerationsfrüherkennung im laufenden Betrieb und somit eine Erhöhung des sicher einstellbaren Temperaturbereichs durch kontinuierliche Überwachung des Fluidisierungszustandes. Die Früherkennung von Agglomerationen in der Wirbelschicht ermöglicht ein frühzeitiges Eingreifen in den Feuerungsbetrieb oder das Ergreifen organisatorischer Maßnahmen, wie z. B. eine Vorverlegung geplanter Revisionszeiten.

2.2 Additiveinsatz

Ergänzend zur Überwachung des Fluidisierungszustandes in der Wirbelschicht wird im Projekt der Additiveinsatz zur gezielten Erhöhung der Ascheschmelztemperaturen untersucht. Damit soll gleichzeitig eine Verbesserung der Aschequalität, z. B. hinsichtlich der Abscheidung von Schwermetallen aus der Verbrennungasche oder zur Verbesserung der Pflanzenverfügbarkeit des enthaltenen Phosphors bzw. dessen

Löslichkeit in nachgeschalteten Prozessen erreicht werden. Hierzu finden im Projekt umfangreiche Versuche im Labormaßstab statt.

3 Praxistests des Agglomerationswächters

3.1 Methodik

Zur Früherkennung von Agglomerationen in Wirbelschichtverbrennungsprozessen werden Temperaturmessungen, akustische Messungen und die Messung von Druckschwankungen eingesetzt. Die Messung von Druckschwankungen ist besonders vielversprechend, da Änderungen in der Wirbelschicht den Druckverlust beeinflussen. Allerdings sind diese Änderungen oft marginal und schwer erkennbar. Methoden wie die Analyse der Varianz oder Standardabweichung des Drucksignals wurden im Labor erfolgreich getestet, sind in industriellen Anlagen aufgrund schwankender Prozessparameter bisher aber unzuverlässig. Die Anwendung der Fourier-Transformation auf das Drucksignal erzeugt ein Leistungsdichtespektrum zur Charakterisierung der Wirbelschicht. Die zeitliche Auswertung ist jedoch herausfordernd und die Detektion der dominanten Frequenz ist nicht immer repräsentativ für das gesamte Spektrum, was eine zuverlässige Früherkennung von Agglomerationen erschwert. (Bartels et al., 2010, Kage et al., 2000)

Eine am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik der FAU Erlangen-Nürnberg entwickelte Methode umgeht dieses Problem. Statt des Maximalwerts des Spektrums wird die Frequenz am Medianwert des Spektrums (charakteristische Frequenz) betrachtet. Erste Agglomerationsversuche im Labormaßstab zeigen, dass die Auswertung dieser charakteristischen Frequenz eine zuverlässige Methode zur Früherkennung darstellt. Die Methode ist weniger sensitiv gegenüber Änderungen der Prozessparameter, was eine erfolgreiche Anwendung im industriellen Maßstab verspricht.

3.2 Ergebnisse

Auf Basis der Voruntersuchungen zum Agglomerationswächter im Labormaßstab wurden im Rahmen des Projekts Drucksensoren in den Industrieanlagen der drei Projektpartner installiert. Die so gewonnenen Daten werden kontinuierlich ausgewertet und hinsichtlich Auffälligkeiten analysiert. In einer der Anlagen konnten während eines Agglomerationszwischenfalls um den Jahreswechsel 2023/24 bereits Daten gewonnen werden. Diese zeigen eine Agglomerationsfrüherkennung ca. 10 Tage vor dem durch Defluidisierung bedingten Abfahren der Anlage.

Im Projektverlauf werden umfassende Datensätze zum Agglomerationswächter gesammelt. Diese entstammen zum einen Technikumsanlagen aus dem Versuchsbetrieb und zum anderen dem realen Anlagenbetrieb in den Klärschlammverbrennungsanlagen der Projektpartner. Auf dieser Basis erfolgt die kontinuierliche Weiterentwicklung des Agglomerationswächters und Validierung des Konzepts.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Lachgas (N_2O) ist ein hochpotentes Treibhausgas, dessen Emissionen bei der unvermeidbaren Klärschlammverbrennung gemindert werden müssen. Die N_2O -Bildung hängt maßgeblich vom O_2 -Gehalt im Rauchgas und der Verbrennungstemperatur ab; insbesondere kann eine erhöhte Verbrennungstemperatur die Emissionen signifikant mindern. Die Agglomerationsfrüherkennung mittels Drucksensor bietet ein ein-

faches, nachrüstbares Werkzeug für die kontrollierte Temperaturerhöhung. Zudem lässt sich die niedrige Erweichungstemperatur von Klärschlammverbrennungssaschen durch den Einsatz von Additiven positiv beeinflussen.

Im weiteren Projektverlauf werden der Einfluss von Additiven auf Verbrennung, Ascheschmelzverhalten und Aschequalität sowie die Auswirkungen der Klärschlammzusammensetzung im Technikumsmaßstab untersucht. Parallel erfolgt die Weiterentwicklung und Validierung des Agglomerationswächters anhand von Labor- und Industriedaten. Zudem werden das Emissionsverhalten bei der Klärschlammverbrennung und der Fluidisierungszustand mittels Agglomerationswächter intensiv untersucht.

Die Untersuchungen finden an zwei Technikumsanlagen statt: einer 100 kW_{th}-Wirbelfeuerung und einer 45 kW_{th}-Wirbelschichtfeuerung, in denen hochfrequente Druck- und Emissionsdaten (insbesondere N₂O und NO_x) erhoben werden. So können der Proof of Concept des Agglomerationswächters erbracht und wichtige Daten zu Betriebsparametern und Emissionen gewonnen werden.

Im dritten Projektjahr werden auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse großtechnische Versuchsreihen in den Industrieanlagen der drei Projektpartner durchgeführt, um die Funktionalität des Konzepts zu demonstrieren. Übergeordnetes Ziel ist die Ermittlung eines Temperaturoptimums zur Vermeidung von N₂O-Emissionen und vollständiger Zerstörung organischer Schadstoffe bei gleichzeitiger Minimierung von NO_x und CO sowie Verbesserung der Aschequalität für die Phosphorrückgewinnung.

Danksagung

Das Projektteam bedankt sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, das das Projekt ProKlär-mission im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms unter dem Förderkennzeichen 03EI5460 fördert. Die Bearbeitung erfolgt durch den Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik der FAU Erlangen-Nürnberg sowie das Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft der RWTH Aachen. Assoziierte Partner des Projekts sind der Eigenbetrieb Stadtentwässerung Stuttgart, die Thermische Verwertung Mainz GmbH, die Gemeinschaftskläwerk Bitterfeld-Wolfen GmbH und die KMT GmbH. Das Projekt läuft noch bis zum 31.12.2025.

Literatur/Quellen

Hinweis: Der vorliegende Beitrag enthält teilweise inhaltsgleiche Passagen der Erstveröffentlichung:

Stark, K.; Schnell, M.; Quicker, P.; Sanyal, A.; Lukas, J.; Weitzer, M.; Leimbach, S.; Karl, J.: Minderung von N₂O-Emissionen durch primäre Maßnahmen und Agglomerationsüberwachung. In: Holm, O. et al. (Hrsg.) Verwertung von Klärschlamm 7. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 2024, ISBN 978-3-911006-82-8, S. 242-252

Bartels M, Nijenhuis J, Kapteijn F, van Ommen JR. Case studies for selective agglomeration detection in fluidized beds: Application of a new screening methodology. Powder Technol 2010;203:148–66. doi:10.1016/j.powtec.2010.05.003.

Fernandez Gutierrez, M. J., Baxter, D., Hunter, C., Svoboda, K.: Nitrous oxide (N₂O) emissions from waste and biomass to energy plants. Waste management & research the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA 2005;23(2):133–47

- Hanßen, H.; Niebuhr, J.: Minimierung der Stickstoffemissionen bei der Verbrennung von Klärschlamm in der Wirbelschichtfeuerung. In: Holm, O. et al. (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm 6. (Reihe: Verwertung von Klärschlamm. 6). 1. Auflage. Nietwerder: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 2023, S. 264–278
- IPCC, 2014: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kage H, Agari M, Ogura H, Matsuno Y. Frequency analysis of pressure fluctuation in fluidized bed plenum and its confidence limit for detection of various modes of fluidization. Adv Powder Technol 2000;11:459–75. doi:10.1163/156855200750172060.
- Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen). 17. BImSchV, 2024
- Stark, K.; Schnell, M.; Peters, E.; Quicker, P.: Thermische Klärschlammbehandlung in Deutschland. Bestand und Prognose. In: Holm, O. et al. (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm 6. (Reihe: Verwertung von Klärschlamm. 6). 1. Auflage. Nietwerder: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 2023, S. 124–136
- Stöcklein, F., Tebert, C., Töfge, K.: Evaluation und Minderung klimarelevanter Gase aus Abfallverbrennungsanlagen; 2018.
- Svoboda, K., Baxter, D., Martinec, J.: Nitrous oxide emissions from waste incineration. Chemical Papers 2006;60(1).
- Umweltbundesamt, Treibhausgas-Emissionen in Deutschland, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#entwicklung-der-treibhausgase-kohlendioxid-methan-distickstoffoxid> Stand: 13.12.2023

Kontakt

Kirsten Stark, M. Sc., Arbeitsgruppenleiterin Abfall

Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft (TEER) an der RWTH Aachen University

Tel.-Nr.: 0241/80-90718

E-Mail: stark@teer.rwth-aachen.de

Homepage: www.teer.rwth-aachen.de

Optimierung der mineralischen Fraktion von Hausmüllverbrennungsaschen zur Nutzung im Beton

Abstract: Hausmüllverbrennungsaschen (HMV-Aschen) können aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften potenziell in Betonprodukten verwendet werden. Derzeit werden HMV-Aschen in Deutschland überwiegend im Deponiebau genutzt und zum Teil direkt deponiert. Im Forschungsprojekt „HMV-Öko-Beton“ wurden ausgewählte Fraktionen der HMV-Aschen durch gezielte Aufbereitung optimiert und anschließend als Gesteinskörnungs- und Zementersatz in Betonpflastersteinen eingesetzt. Dadurch könnten 60 % der untersuchten HMV-Aschen einem qualitätsgesicherten Recycling zugeführt werden. Aus ökologischer Sicht erwies sich die Verwertung von HMV-Aschen in Betonprodukten als vorteilhaft: Der CO₂-Fußabdruck der hergestellten Betonpflastersteine konnte je nach Rezeptur um 4 % bis 12 % im Vergleich zu herkömmlichen Betonpflastersteinen reduziert werden, während gleichzeitig natürliche Rohstoffe geschont wurden. Nichtsdestotrotz zeigte sich im Rahmen der Studie aber auch weiterer Optimierungsbedarf, um produkt- und schadstoffbezogene Anforderungen gesichert einhalten zu können.

1 Einleitung

Die Herstellung von Beton, dem weltweit meistverwendeten Baustoff, geht mit einem hohen Verbrauch an Ressourcen und beträchtlichen Emissionen einher, die vor allem auf die Zementproduktion zurückzuführen sind (IBU, 2018). Die Produktionsmengen von Beton in Deutschland sind in den letzten zehn Jahren konstant geblieben oder leicht gestiegen (Statista, 2023). Weltweit wird jedoch ein Anstieg erwartet, bedingt durch das Wachstum der Weltbevölkerung. Daher ist es wichtig, Alternativen zur Substitution von natürlichen Rohstoffen, insbesondere Gesteinskörnungen, sowie herkömmlichen Portlandzementen für Betonprodukte zu erforschen. Gleichzeitig fallen in Deutschland jährlich etwa 6 Mio. t Rostaschen aus der Abfallverbrennung (HMV-Aschen) an (ITAD, 2023). Nach einer Aufbereitung werden die separierten Metalle wieder in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt. Die verbleibende vorwiegend mineralische Fraktion wurde 2020 zum Großteil im Deponiebau eingesetzt (64%) oder direkt deponiert (19%). Ein kleinerer Anteil (17 %) fand Anwendung im Straßenbau, zum Beispiel als Frostschuttschicht (ITAD, 2023). Mit Inkrafttreten der Ersatzbaustoffverordnung im August 2023 wurden die Grenzwerte für die Verwertung von HMV-Aschen verschärft (ErsatzbaustoffV, 2023), was voraussichtlich zu einer Verlagerung der Stoffströme in Richtung Deponie führen wird. Aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften sind HMV-Aschen jedoch auch für die Verwertung in Betonprodukten geeignet, wodurch einerseits Rohstoffe und Deponiekapazitäten geschont und andererseits CO₂-Emissionen eingespart werden können. Herausforderungen stellen in diesem Zusammenhang vor allem die hohen löslichen Salzgehalte sowie der Gehalt an metallischem Aluminium dar, die Schäden im Beton verursachen oder seine Eigenschaften negativ beeinflussen können. Vor diesem

Hintergrund war das Ziel der vorliegenden Arbeit, HMV-Aschen so aufzubereiten, dass sie als Ersatz für Gesteinskörnungen und Bindemittel in Betonfertigprodukten eingesetzt werden können.

2 Methodik

2.1 Korngrößenspezifische Aufbereitung der HMV-Aschen

Im Rahmen der Studie wurde die HMV-Asche aus dem Müllheizkraftwerk Kassel untersucht. Um die Eigenschaften der HMV-Asche für den Einsatz im Beton zu optimieren, wurde sie nach einer Lagerzeit von ca. 12 Monaten zunächst in einer mobilen Aufbereitungsanlage aufbereitet. Im nächsten Schritt wurden zwei ausgewählte Kornfraktionen gezielt weiteraufbereitet: die Feinfraktion (0–2 mm) zur Nutzung als teilweiser Bindemittlersatz und die Mittelfraktion (2–8 mm) zum vollständigen Ersatz der entsprechenden natürlichen Gesteinskörnung in Pflastersteinen. Die Feinfraktion wurde dabei mehrfach gemahlen und gesiebt, um eine Feinheit ähnlich von Zement zu erreichen und verbliebene Restmetalle durch die Siebung abzutrennen. Die mittlere Fraktion wurde mittels einer Nasssiebung gewaschen, um lösliche Salze und Schwermetalle zu reduzieren. Anschließend wurde eine zusätzliche Metallsortierung (Fe- und NEMetalle) durchgeführt, um die Metallgehalte weiter zu reduzieren.

2.2 Nutzung und Evaluation der aufbereiteten Fraktionen im Beton

Die aufbereitete Mittelfraktion wurde vollständig zur Substitution der natürlichen Gesteinskörnung im Korngrößenbereich von 2–8 mm in Betonpflastersteinen verwendet. Zusätzlich wurde in einer weiteren Mischung 11 % des Zements durch die aufbereitete Feinfraktion ersetzt. Die HMV-Pflastersteine wurden im Hinblick auf ihre Eigenschaften mit konventionellen Pflastersteinen verglichen, wobei insbesondere mechanische Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit gemäß den normativen Anforderungen der (DIN EN 1338, 2003) untersucht wurden. Weiter wurde das Elutionsverhalten der gebrochenen Pflastersteine analysiert, um die Mobilisierbarkeit von löslichen Schadstoffen zu bestimmen. Dies erfolgte durch Schüttelversuche nach (DIN 19529, 2015). Abschließend wurde die gesamte Aufbereitungs- und Verwertungskette mittels Ökobilanzen bewertet, um die Umweltauswirkungen zu quantifizieren und den ökologischen Nutzen der HMV-Pflastersteine im Vergleich zu konventionellen Pflastersteinen zu ermitteln. Details zu den Analysen und Bewertungen sind im Abschlussbericht des Projekts „HMV-Öko-Beton“ zu finden (Vateva et al., 2023).

3 Ergebnisse und Diskussion

Trotz der erweiterten Metallentfrachtung enthalten die aufbereiteten HMV-Aschefraktionen noch immer geringe Mengen an Metallen (insb. an metallischem Aluminium). Diese führen zu einer erhöhten Porosität in den Pflastersteinen, was wiederum eine geringere Druckfestigkeit zur Folge hat. Die Anforderungen an Abriebwiderstand und Spaltzugfestigkeit gemäß DIN EN 1338 (2003) wurden jedoch erfüllt. Allerdings konnten die Vorgaben für die Frostbeständigkeit nicht erfüllt werden. Pflastersteine ohne Zementsubstitution erfüllten hingegen auch diese Anforderung.

Die Analyse der gebrochenen Pflastersteine im Hinblick auf lösliche Salze zeigt, dass die Grenzwerte der Ersatzbaustoffverordnung sowohl für Recyclingbaustoffe als auch für Hausmüllverbrennungsaschen deutlich unterschritten werden (Abbildung 1b). Damit sind die HMV-Pflastersteine grundsätzlich recycelbar

und könnten nach ihrem Nutzungsende im Materialkreislauf verbleiben. Dennoch weisen die HMV-Pflastersteine höhere Konzentrationen an löslichen Salzen und Schwermetallen auf als die Referenzpflastersteine. Ein Vergleich mit den aufbereiteten HMV-Aschefractionen vor dem Einsatz im Beton zeigt jedoch deutlich niedrigere Konzentrationen als aufgrund des Feststoffanteils zu erwarten wäre (Abbildung 1a). Dies deutet darauf hin, dass ein Teil der potenziell löslichen Stoffe in der Zementmatrix gebunden und immobilisiert werden.

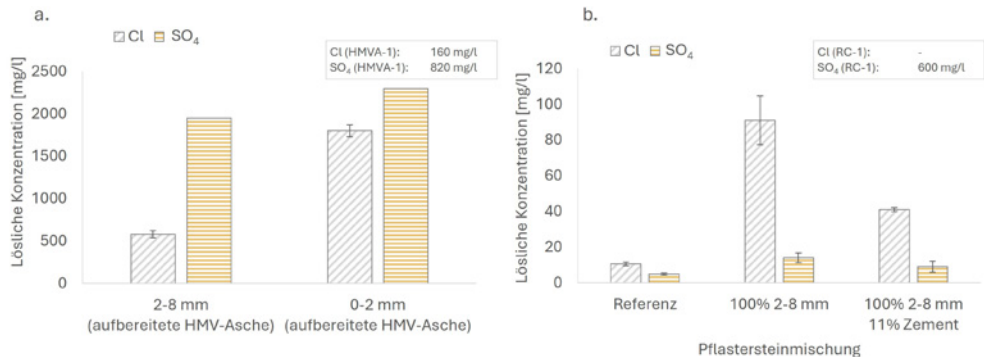


Abbildung 1: Chlorid und Sulfat im Eluat: a. in der aufbereiteten HMV-Asche; b. in den Pflastersteinen;
Grenzwerte für HMVA-1 und RC-1 nach der Ersatzbaustoffverordnung (ErsatzbaustoffV, 2023)

Abbildung 2 zeigt die Treibhausgasbilanz für den Referenzpflasterstein und zwei unterschiedliche HMV-Pflasterstein-Rezepturen (Mitte: vollständiger Ersatz der 2-8 mm Gesteinskörnung, rechts: vollständiger Ersatz der 2-8 mm Gesteinskörnung und Substitution von 11% Zement durch gemahlene Feinfraktion). Die Herstellung eines konventionellen Pflastersteins ist mit 0,41 kg CO₂-eq pro Stein verbunden. Für die HMV-Pflastersteine sinkt die spezifische Netto-CO₂-Belastung, wenn der Anteil substituierter Rohstoffe durch aufbereitete HMV-Asche steigt. Die Einsparungen resultieren dabei vor allem aus der zusätzlichen Metall-

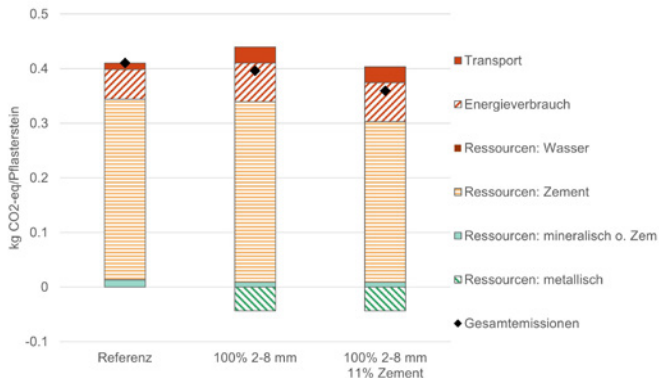


Abbildung 2: Treibhausgasbilanz der Pflastersteine

rückgewinnung sowie aus der Bindemittelsubstitution. Die Substitution natürlicher Gesteinskörnung trägt mit etwa 0,01 kg CO₂-eq pro Pflasterstein nur geringfügig zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bei. Der zusätzliche Transport- und Aufbereitungsaufwand der HMV-Asche kompensiert diese Einsparung teilweise, was im Rahmen der Fallstudie zu einer minimalen Netto-Belastung durch die Ersatzgesteinskörnung führt. Insgesamt konnte die Netto-Treibhausgasbilanz der HMV-Pflastersteine durch den Einsatz von aufbereiteter HMV-Asche im Vergleich zu konventionellen Pflastersteinen um 4% bzw. 12 % reduziert werden.

4 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine geeignete Aufbereitung die Eigenschaften von HMV-Aschen so optimiert werden können, dass ihr Einsatz in Betonpflastersteinen möglich ist. Grundsätzlich können auch die allgemeinen normativen Anforderungen für Pflastersteine bei Substitution von Gesteinskörnung und Bindemittelanteilen eingehalten werden. Allerdings sinken mit steigendem Anteil an HMV-Asche beispielsweise die Werte für die Spaltzugfestigkeit. In dieser Hinsicht besteht Optimierungspotential, das durch noch intensivere Aufbereitung der HMV-Aschen sowie durch Verbesserung der Betonrezepturen ausgeschöpft werden kann. Die Eluatanalysen zeigten, dass keine problematischen bzw. umweltgefährdenden Konzentrationen an löslichen Schadstoffen bei der Elution von gebrochenen HMV-Pflastersteinen auftreten. Dadurch könnten diese Pflastersteine nach ihrer Nutzungsdauer recycelt werden. Zukünftig sollen weitere Verbrennungsrostaschen hinsichtlich ihres Nutzungspotenzials in Beton untersucht werden, um eine breitere Basis für einen qualitätsgesicherten Einsatz von mineralischen Fraktionen der HMV-Asche in unterschiedlichen Betonanwendungen zu schaffen, damit natürliche Ressourcen und Deponiekapazitäten geschont sowie die Umweltauswirkungen von Betonprodukten reduziert werden können.

Danksagung

Das Verbundprojekt HMV-Öko-Beton: Ökologische Optimierung von Betonprodukten durch Nutzung mineralischer Fraktion von Hausmüllverbrennungs-Rostasche (Laufzeit: 01.09.2021 – 31.08.2023) wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert.

Literatur/Quellen

- DIN 19529, 2015. Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg 13.060.50, 27 pp.
- DIN EN 1338, 2003. Pflastersteine aus Beton: Anforderungen und Prüfverfahren, 66 pp.
- ErsatzbaustoffV, 2023. Verordnung der Bundesregierung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, Stand: 11.06.2021: ErsatzbaustoffV 2023, 340 pp.
- IBU, 2018. Umwelt-Produktdeklaration: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30, 11 pp. https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Wissen/Beton-Bautechnik/Nachhaltigkeit/Beton_der_Druckfestigkeitsklasse_C_2025.pdf (accessed 13 December 2021).

ITAD, 2023. ITAD Jahresbericht 2022/23, 56 pp.

Statista, 2023. Produktion von Transportbeton in Deutschland in den Jahren 2003 bis 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167013/umfrage/produktionsmenge-der-transportbetonindustrie-seit-2004/> (accessed 25 June 2024).

Vateva, I., Laabs, M., Laner, D., Middendorf, B., 2023. HMV-Öko-Beton: Ökologische Optimierung von Betonprodukten durch Nutzung mineralischer Fraktionen von Hausmüllverbrennungs-Rostasche: Abschlussbericht, 90 pp. https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-36064_01-Hauptbericht.pdf (accessed 26 June 2024).

Kontakt

Iveta Vateva, M.Sc., wissenschaftliche Mitarbeiterin

Universität Kassel, Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik

Tel.-Nr.: +49 561 804-3804

E-Mail: iveta.vateva@uni-kassel.de

Homepage: www.uni-kassel.de/go/RMAT/

Transforming Mineral Wool Waste into CO₂-Reduced Binding Agents

Abstract: Mineral wool waste, one of the most widespread insulation materials, reached significant production rates in recent years. Simultaneously, due to production specifications and the demolition of old buildings, the amount of mineral wool waste has steadily increased. Landfilling this material presents several issues, particularly regarding geotechnical aspects (Sattler et al., 2020) and health concerns. Furthermore, it is expected that, as of January 1, 2027, the landfilling of all man-made vitreous fibres will be prohibited in Austria. This situation emphasizes the need to find a recycling method for this waste, as no suitable solution is available on the market yet.

In addition to the waste management challenges, the cement industry is one of the most CO₂-emission-intensive industries, with clinker production being the most CO₂-emissive and energy-demanding process in the production cycle. Specifically, each ton of cement generates an average emissions reported as 0.58 tons of CO₂ in 2022 (IEA,2024). As part of ongoing efforts to reduce CO₂-emissions, ground granulated blast furnace slag (GGBFS) is used as a substitute for clinker. However, given the current trend toward decarbonization in the steel industry and the gradual shift from blast furnaces to direct reduced iron (DRI) and electric arc furnace (EAF) facilities, this approach may not be viable in the long term.

To address these interconnected challenges, the BitKOIN project aims to optimize the recycling of mineral wool waste. This research investigates the potential of thermochemical conversion of mineral wool, combined with other waste materials, to create an active binder material (Doschek-Held et al., 2024). The project is carried out in collaboration with TU Graz, Rohrdorfer Umwelttechnik, Holcim, Saint Gobain Austria and PORR Umwelttechnik.

Within the project, material quantity and characterization studies are conducted, establishing the chemical composition of the materials and guiding the future development of the binder. Moreover, a solution for the mechanical sorting and treatment of mineral wool waste are developed, providing a crucial step in preparing the material for thermochemical conversion. Following the completion of the thermochemical trials, a comprehensive Life Cycle Assessment (LCA) will be conducted to evaluate the environmental impact of the recycling process. This future LCA will assess the sustainability of the proposed method in comparison to conven-

tional waste disposal and cement production processes, aiming to quantify the environmental benefits and ensure the long-term viability of this recycling approach.

1 Introduction

The management of mineral wool waste (MWW), a residual product of construction and demolition (C&D) activities, presents a growing challenge in Europe. The total mass of C&D waste generated in the EU27 area in 2020 was estimated to be 808.2 million tonnes (Eurostat, 2024), including hazardous waste and soils, while the estimated mass of MWW for the same year was 2.5 million tonnes (Väntsi and Kärki, 2014). Currently, MWW is predominantly managed through mechanical treatment and subsequent landfilling. Its lightweight and fibrous nature complicates waste handling during transportation, treatment and disposal and requires additional measures to stabilize the material. With the European Union imposing stricter recycling targets and some countries, such as Austria, introducing landfill bans on specific waste streams (BGBl. II Nr. 144/2021, 2021), the viability of landfilling MWW is further decreasing. Furthermore, the rising costs associated with limited landfill space and the potential economic benefits of recycling highlight the need for alternative waste management strategies.

Previous research has indicated that recycling MWW to create new mineral wool products faces significant challenges, primarily due to certification requirements that focus on chemical composition (Sattler et al., 2024). These requirements are critical for determining the biosolubility of the material, which directly impacts its classification as carcinogenic or non-carcinogenic (Guldberg et al., 2002; Regulation (EC) No 1272/2008, 2008). Therefore, the project BitKOIN proposes an alternative pathway: the thermochemical conversion of MWW, combined with other waste materials, to create an active binder material (Doschek-Held et al., 2024). This process is shown in Figure 1.

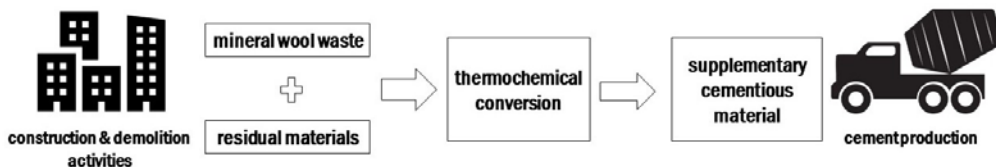


Figure 1: Scheme of proposed mineral wool waste transformation process

According to the current regulation, MWW must undergo preliminary mechanical processing (BGBl. II Nr. 144/2021, 2021). The shredding of MWW is already a common practice in the industry, serving as a basic preparation step (Schimek and Sattler, 2020). Shredding enhances landfill efficiency by increasing compactability and contributes to more stable landfill bodies. However, as landfilling becomes less viable and recycling options remain limited, alternative pathways for managing MWW are urgently needed. Among these, thermochemical conversion has a high potential to transform these residual materials into valuable materials. To achieve this, it is critical to address the highly heterogeneous composition of the waste stream. Based on the literature review, a wide range of contaminants are commonly present in C&D waste. Predominant impurities include excavated soil, packaging waste, and remains of building materials (e.g., metals, glass, wood, plastic, concrete, mortar, ceramics). In addition, less frequent but problematic contaminants, such as organic materials and hazardous waste (e.g., contaminated soil, asbestos, lead, zinc, paints, varnishes, batteries, fluorescent tubes, lubricants, oils, grease) (Llatas, 2013). The diverse physical and chemical

properties of these contaminants pose significant challenges for downstream thermal processing, as they can adversely affect material homogeneity, energy efficiency, and the quality of the final processed product.

2 Methodology

The MWW samples analysed in this study were sourced from a demolition site. The material was manually sorted into two fractions – stone wool and glass wool – based on distinct colour and structural characteristics. A sample of 1 kg was collected for each fraction to ensure sufficient material for subsequent sorting and characterization. The mechanical sorting process commenced with sampling and preliminary shredding, carried out in collaboration with PORR Umwelttechnik GmbH. The shredded MWW was manually sorted and analysed to identify key contaminants and their characteristics.

Based on this analysis, a literature review was conducted to explore mechanical sorting techniques commonly used for C&D waste (Bao et al., 2020). Several mechanisms were identified, with particular attention given to air separation systems. These systems utilize airflows to separate waste fractions based on material density differences (Ambrós et al., 2017), demonstrating potential for the effective handling of MWW. The workflow applied in the mechanical sorting experiments is depicted in Figure 2. The efficiency of sorting was evaluated using three key metrics: recovery, the percentage of mineral wool successfully recovered; purity, the proportion of the recovered fraction free from contaminants; and sorting efficiency, a combined metric considering both recovery and purity.

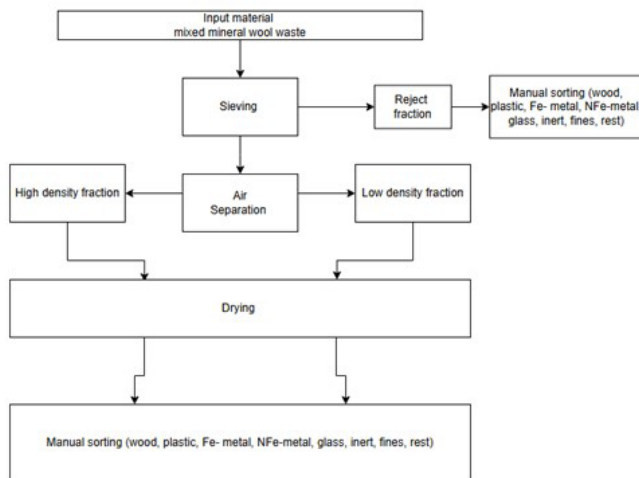


Figure 2: The experimental workflow of mechanical sorting tests

3 Results

The manual sorting process provided initial insights into the composition of the shredded MWW. Table 1 summarizes the proportions of key contaminants identified during manual analysis, categorized into 5

groups: metal, wood, plastic, brick and concrete residues and pure wool. The sorting process demonstrated the significant heterogeneity of the waste stream, with high impurity levels of plastics, mainly from shredded packaging material of MWW and brick and concrete residues. A visual representation of the sorted fractions is provided in Figure 3.

Table 1: The composition of glass wool and stone wool waste with four main contaminant categories identified during manual analysis.

	Glass wool waste	Stone wool waste
	w/%	w/%
Metal	1,7	0,3
Wood	2,1	0,3
Plastic	2,9	3,6
Brick and concrete residues	1,9	19,2
Wool	91,3	76,7



Figure 3: Post-sorting fractions

While manual sorting provided baseline data, air separation experiments are anticipated to improve both recovery and purity metrics significantly. The findings from manual sorting serve as a benchmark for assessing the performance of air separation systems, which will be evaluated using recovery, purity, and sorting efficiency as key metrics.

4 Conclusion

This study highlights the need for advanced mechanical sorting methods to improve the management of MWW. Future work will focus on optimizing air separation systems to enhance recovery and purity metrics while addressing the waste stream's heterogeneity. Additionally, the thermochemical conversion of purified MWW will be explored to produce active binder materials. Finally, a life cycle assessment (LCA) will be conducted to evaluate the environmental and economic benefits of the proposed solution.

Acknowledgements

This study was conducted as part of the ongoing research project "BitKOIN," funded by the Austrian Research Promotion Agency (FFG) under the "FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft" program (FFG project grant number: FO999897739). The author would like to express gratitude to the project partners for their contributions to this research.

References

- Ambrós WM, Sampaio CH, Cazacliu BG, Miltzarek GL, Miranda LR. Usage of air jigging for multi-component separation of construction and demolition waste. *Waste Manag* 2017; 60: 75–83.
- Bao Z, Lee WMW, Lu W. Implementing on-site construction waste recycling in Hong Kong: Barriers and facilitators. *Sci Total Environ* 2020; 747: 141091.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. BGBl. II Nr. 144/2021, 2021.
- Doschek-Held K, Krammer AC, Steindl FR, Sattler T, Juhart J. Recycling of mineral wool waste as supplementary cementitious material through thermochemical treatment. *Waste Manag Res* 2024; 42(9): 806–13.
- EUCB. The Chemical Range.
- Eurostat. Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity, https://doi.org/10.2908/ENV_WASGEN; 2024 [accessed January 22, 2025].
- Guldborg M, Jensen SL, Knudsen T, Steenberg T, Kamstrup O. High-alumina low-silica HT stone wool fibers: a chemical compositional range with high biosolubility. *Regul Toxicol Pharmacol* 2002; 35 (2 Pt 1): 217–26.
- International Energy Agency, cement, CO₂ emissions. URL: <https://www.iea.org/reports/cement>, accessed 01.10.2024.
- Llatas C. Methods for estimating construction and demolition (C&D) waste. In: . *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Elsevier; 2013. p. 25–52.

- Sattler T, Doschek-Held K, Krammer A, Pomberger R, Vollprecht D. Recycling of Potential Hazardous Stone Wool into a Non-hazardous New Stone Wool. *Detritus* 2024(26): 60–8.
- Sattler T, Sartori M, Galler R, Pomberger R, Krainz J, Schimek J, et al. Effects of cement addition and briquetting of rock wool on its geomechanical stability in landfills. *Waste Manag Res* 2020; 38(4): 408–14.
- Schimek J, Sattler TM. Aufbereitung von künstlichen Mineralfasern als Grundlage für die weitere Verwendung, 2020.
- The European Parliament. REGULATION (EC) No 1272/2008 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006.
- Väntsi O, Kärki T. Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. *J Mater Cycles Waste Manag* 2014; 16(1): 62–72.

Contact

M.Sc., Alena Vydrenkova, Research Assistant
Chair of Waste Processing Technology and Waste Management
Montanuniversitaet Leoben
Tel.-Nr.: +436768453865147
E-Mail: alena.vydrenkova@unileoben.at
Homepage: <https://www.avaw-unileoben.at/en/>

Glasrückgewinnung aus Müllverbrennungs-Bettaschen

Abstract: Glas, das in gemischtem Siedlungsabfall entsorgt wird, wird überwiegend verbrannt oder deponiert und geht so für ein Recycling in der Verpackungsglasindustrie verloren. Nach der Müllverbrennung verbleibt Glas in der Müllverbrennungssasche, aus der es aus technischer Sicht durch sensorgestützte Sortierung zurückgewonnen werden kann. Diese Glasrückgewinnung ist in Österreich für Bettaschen aus der Wirbelschichtfeuerung bereits teilweise in industrieller Anwendung. In einem Versuch wurde die Qualität von aus österreichischen Bettaschen rückgewonnenen Glasfraktionen analysiert. Zudem wurden zwei Glasfraktionen aus Bettaschen weiter aufbereitet, um Fremdstoffe wie Keramik, Steine, Porzellan, Metalle und Bleiglas zu entfernen. Dadurch sollte die Reinheit der Glasfraktion verbessert und ein Glasrecycling ermöglicht werden. Die Glasfraktionen aus industrieller Ascheaufbereitung enthalten Störstoffgehalte bis zu 13%. Nach vierstufiger Aufbereitung konnten die Störstoffe jedoch fast vollständig (>99%) entfernt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Glasrückgewinnung aus Bettaschen eine vielversprechende Möglichkeit darstellt, Glasrecycling zu steigern und deponierte Glasmengen zu verringern.

1 Einleitung

Wirbelschichtfeuerungen machen etwa ein Drittel der Müllverbrennungskapazität in Österreich aus (Kellner et al., 2022). Bettaschen, die groben Rückstände dieser Feuerungstechnologie, enthalten neben Metallen und mineralischen Stoffen auch beträchtliche Mengen an Glas (Mühl et al., 2023). Bei dem enthaltenen Glas handelt es sich vorwiegend um Verpackungsglas, welches nicht in der getrennten Sammlung erfasst wurde. Diese Glasmenge belief sich 2020 auf etwa 53.000 Tonnen bzw. 17% des österreichischen Verpackungsglases, welches im Restmüll entsorgt und nach der Verbrennung gemeinsam mit Müllverbrennungssaschen deponiert wurde (Lipp und Lederer, 2025). Während bisher vor allem die Metallrückgewinnung und die Verwertung der Mineralikfraktion aus Müllverbrennungssaschen untersucht wurden, wurde das Potenzial von Glas in Bettaschen kaum beachtet. Glas kann allerdings mittels sensorbasierter Abscheidung aus Bettaschen rückgewonnen werden, was in Österreich mittlerweile teils in industrieller Anwendung ist (Mühl et al., 2024). Der hochwertigste Verwertungspfad für dieses Glas stellt ein closed-loop Recycling in der Verpackungsglasindustrie dar. Dies ist in mehrfacher Hinsicht umwelttechnisch vorteilhaft: einerseits können Primärrohstoffe und Deponievolumen eingespart werden; zusätzlich führt der Scherbeneinsatz in der Glasindustrie zu Energieeinsparungen. Für diesen Verwertungsweg müssen jedoch strenge Qualitätsvorgaben eingehalten werden.

Welche Zusammensetzung aus der Bettasche rückgewonnene Glasfraktionen aufweisen, wurde bisher nicht untersucht und war daher Gegenstand eines Versuchs im CD Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft an der TU Wien. Ebenso wurde ermittelt, ob das rückgewonnene Glas in der Verpackungsglasin-

dustrie eingesetzt werden kann, beziehungsweise welche Nachreinigungsschritte erforderlich sind, um dies zu ermöglichen.

2 Methodik

Für die Untersuchung wurden Glasfraktionen aus zwei verschiedenen österreichischen Bettaschen verwendet, welche mittels sensorbasierter Abscheidung im Zuge einer industriellen Ascheaufbereitung gewonnen wurden. Die dabei erhaltenen Glasfraktionen enthalten noch Störstoffe, wie beispielsweise Keramik, Steine, Porzellan (KSP), Baumaterialien oder Metalle. Die Zusammensetzung der Glasfraktionen wurde mittels händischer Sortierung ermittelt. Für eine Verwertung des Glases in der Verpackungsglasindustrie gelten strenge Vorgaben bezüglich des Störstoffgehalts. Aus diesem Grund wurde mittels zusätzlicher sensorbasierter Aufbereitungsschritte das Glas weitergehend aufgereinigt und so von Störstoffen befreit. Neben den genannten Störstoffen konnte dabei auch Bleiglas abgetrennt werden. Um eine bestmögliche Aufbereitungskonstellation zu ermitteln, wurde eine vierstufige sensorbasierte Abscheidung durchgeführt sowie eine einstufige Abscheidung der bei 8 mm und 16 mm gesiebten Glasfraktion. Die Zusammensetzung der erhaltenen Glas- und Störstofffraktionen aus den Aufbereitungsdurchgängen wurde ebenfalls mittels händischer Sortierung bestimmt. Anhand der Massen der Aufbereitungsdurchgänge sowie der Zusammensetzungen der Fraktionen konnte mit Hilfe des Materialflussanalyse-Tools STAN außerdem die Zusammensetzung der ursprünglichen Glasfraktionen aus den Bettaschen berechnet werden.

3 Ergebnisse

Die Glasfraktionen aus der Aufbereitung der Bettaschen bestehen zu 85% – 89% aus Glas. Im Zuge der Aufbereitungsversuche konnte festgestellt werden, dass die zusätzlichen Aufbereitungsschritte maßgeblich zur Reduktion der in den Glasfraktionen enthaltenen Störstoffe beitragen. So konnte der Gehalt an KSP und anderen inerten Störstoffen in den beiden Glasfraktionen von 13% und 8% durch die vierstufige Aufbereitung auf jeweils unter 0,1% reduziert werden. Metalle waren in den Glasfraktionen vor weiterer Aufbereitung bereits in geringen Anteilen von 0,2% und 0,6% enthalten. Diese Werte konnten auf jeweils

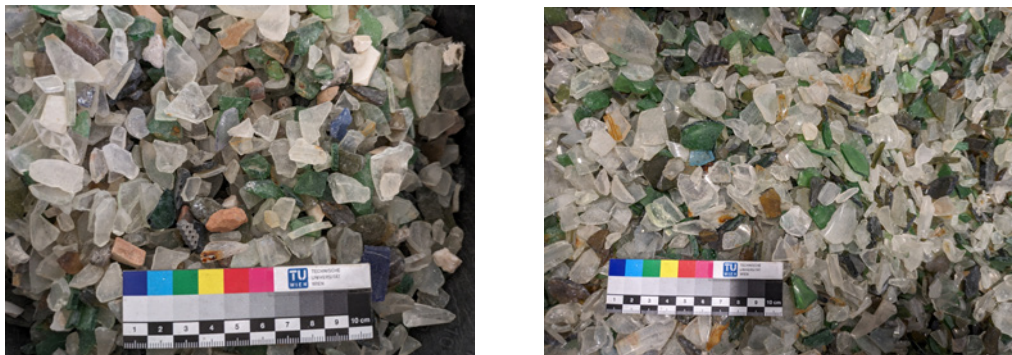


Abbildung 1: Glasfraktion einer Bettasche vor (links) und nach (rechts) vierstufiger Nachaufbereitung

0,01% reduziert werden. Die Glasfraktion einer Bettasche vor und nach vierstufiger Aufbereitung sind in Abbildung 1 dargestellt.

Die einstufige Aufbereitung der gesiebten und ungesiebten Glasfraktionen zeigt, dass zwar geringfügig höhere Glasreinheiten bei der gesiebten Glasfraktion erzielt werden können. Jedoch geht etwa ein Drittel des Glases bereits über die Siebung in den Fraktionen <8 mm und >16 mm verloren. Verglichen mit den Grenzwerten der Verpackungsglasindustrie, welche für KSP bei 0,002% und für Metalle unter 0,0005% liegen (BV Glas et al., 2014), ist die einstufige Aufbereitung jedoch unzureichend, da sowohl die ungesiebten als auch die gesiebten Glasfraktionen noch deutlich über 1% KSP enthalten. Auch die vierstufige Aufbereitung kann die vorgegebenen Richtwerte nicht erreichen. Hierzu ist generell anzumerken, dass derartig niedrige Gehalte, wie von den Grenzwerten gefordert werden, in der Forschung kaum valide ermittelt werden können. (Mühl et al., under review 2025)

4 Schlussfolgerungen

Die Zusammensetzung von Altglas, besonders im Restmüll, wurde bisher in der Wissenschaft kaum betrachtet. Ebenso finden sich bisher nur sehr wenige Daten zu Glas in Müllverbrennungsbettaschen und keine Informationen zu Glas in Wirbelschicht-Bettaschen sowie dessen Rückgewinnung. Die hier vorgestellten Untersuchungen sollen eine erste Potentialabschätzung ermöglichen und Optionen aufzeigen, wie die ungenutzte Deponierung des Rohstoffs Altglas verringert werden kann. Diese Forschungsergebnisse können insbesondere für Länder mit geringeren Raten an getrennter Sammlung und höheren Altglasanteilen im Restmüll relevant sein.

Allgemein konnte im durchgeführten Versuch festgestellt werden, dass ein sehr großes Glaspotential in den Bettaschen vorliegt. Um dieses im Sinne der Kreislaufwirtschaft nutzen zu können, ist neben moderner, mehrstufiger Aufbereitungstechnik jedoch auch ein geeigneter Verwertungsweg erforderlich. Bestehende Qualitätskriterien in der Verpackungsglasindustrie können voraussichtlich nur durch hohen aufbereitungs-technischen – und somit finanziellen – Aufwand eingehalten werden. Für die tatsächlichen Annahmebedingungen sind Abstimmungen mit der Glasindustrie erforderlich. Ebenso ist in weiteren Untersuchungen zu überprüfen, ob das Glas in der Schaum- oder Blähglasindustrie verwertet werden kann.

Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Weiters bedanken wir uns sehr herzlich für die finanzielle und inhaltliche Unterstützung durch unsere Unternehmenspartner, in alphabetischer Reihenfolge: Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoff Recycling Austria AG, Brantner Österreich GmbH, Holding Graz – Kommunale Dienstleistungen GmbH, Lenzing Aktiengesellschaft, Linz Service GmbH, MM Board & Paper, Wien Energie GmbH und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H.

Literatur/Quellen

- Bundesverband Glasindustrie e.V; BDE Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V; bvse-Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V., 2014. Leitlinie „Qualitätsanforderungen an Glasscherben zum Einsatz in der Behälterglasindustrie“: Standardblatt T 120.
- Kellner, M., Schindler, I., Jany, A., 2022. Statusbericht Abfallverbrennung: Berichtsjahr 2020. Report / Umweltbundesamt REP-0830, Wien, 159 pp. https://www.umweltbundesamt.at/studien-reports/publikationsdetail?pub_id=2450.
- Lipp, A.-M., Lederer, J., 2025. The circular economy of packaging waste in Austria: An evaluation based on statistical entropy and material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling* 217. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108193>.
- Mühl, J., Skutan, S., Stockinger, G., Blasenbauer, D., Lederer, J., 2023. Glass recovery and production of manufactured aggregate from MSWI bottom ashes from fluidized bed and grate incineration by means of enhanced treatment. *Waste Management* 168, 321–333. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.048>.
- Mühl, J., Hofer, S., Blasenbauer, D., Lederer, J., 2024. Recovery of aluminum, magnetic ferrous metals and glass through enhanced industrial-scale treatment of different MSWI bottom ashes. *Waste management* 190, 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.10.025>.
- Mühl, J., Mika, S., Tischberger-Aldrian, A., Lederer, J., 2025 (under review). Upgrading and Characterization of Glass recovered from MSWI Bottom Ashes from Fluidized Bed Combustion. *Recycling*.

Kontakt

DI Julia Mühl, wissenschaftliche Mitarbeiterin

CD Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, TU Wien

Getreidemarkt 9/166.1

A-1060 Wien

E-Mail: julia.muehl@tuwien.ac.at

Homepage: <https://www.tuwien.at/tch/icebe/e166-01/cd-labor-kreislaufwirtschaft>

TEIL 5

Charakterisierung und Analytik

Leitung:

Prof. Dr.-Ing. Vera Rotter

Einfluss der Struktur auf den thermischen Abbau von Carbonfasern – Grundlagenuntersuchungen und Übertrag auf die Abfallverwertung

Abstract: Die Struktur und damit verbunden die Eigenschaften von Carbonfasern (CF) können durch die Wahl des Ausgangsmaterials und die Bedingungen des Herstellungsprozesses gezielt auf die Anforderungen des späteren Einsatzgebiets angepasst werden. Aus Sicht der Abfallwirtschaft ergibt sich daraus die Frage, welchen Einfluss die Struktur- und Eigenschaftsunterschiede auf die Verwertung CF-haltiger Abfälle haben können. Dies betrifft maßgeblich nicht-rezyklierbare Abfallfraktionen wie Kurzfasern und Stäube, für die es aktuell keinen Verwertungsprozess gibt. Zur Klärung dieser Frage werden in diesem Promotionsvorhaben die Zusammenhänge zwischen Struktur sowie brennstofftechnischen und mechanischen Eigenschaften der CF und deren thermischem Abbauverhalten untersucht. Darüber hinaus werden die kinetischen Daten des CF-Abbaus in Luftatmosphäre genutzt, um die prinzipielle Eignung verschiedener thermischer Abfallbehandlungsprozesse zur Verwertung nicht-recyclingfähiger CF-haltiger Abfälle abzuschätzen.

1 Einleitung

Carbonfasern und damit verstärkte Kunststoffe sind ein wesentlicher Bestandteil im Hochleistungsleichtbau. Darüber hinaus werden sie vielfältig im Sport- und Freizeitbereich eingesetzt (Sauer und Schüppel 2023; Stockschröder 2022). Durch die Variation von Ausgangsmaterial und Herstellungsbedingungen können die Struktur und die daraus folgenden Eigenschaften der CF gezielt auf die Anforderungen des späteren Einsatzbereichs angepasst werden (Frank et al. 2014; Park 2015). Daraus ergeben sich aktuell etwa 200 kommerziell verfügbare CF.

CF auf Basis von Polyacrylnitril (PAN) machen mehr als 96 % des Markts aus (Das et al. 2016) und sie werden hauptsächlich für industrielle Anwendungen, die Luftfahrt und im Sport- und Freizeitbereich eingesetzt (Park 2015). CF aus Mesophasenpech (MPP) sind charakterisiert durch ein sehr hohes E-Modul und werden in der Raumfahrt und für Spezialanwendungen in der Industrie eingesetzt (Park 2015).

Bei allen Weiter- und Verarbeitungsschritten der CF zu (meist) carbonfaserverstärkten Kunststoffen, der Bauteil- und Produktfertigung sowie am Ende der Produktlebensdauer fallen CF-haltige Abfälle an. Zur Verwertung dieser Abfälle kann unterschieden werden zwischen Prozessen, deren Ziel der Erhalt der CF ist, und solchen, bei denen der hohe Kohlenstoffanteil der CF genutzt wird, um andere Kohlenstoffträger beispielsweise als Energieträger substituieren zu können. Mit der Pyrolyse ist im europäischen Raum ein Prozess zum werkstofferhaltenden Recycling CF-haltiger Abfälle industriell etabliert (Kühne et al. 2022).

Für nicht rezyklierbare CF-Fractionen, darunter Kurzfasern und Stäube, gibt es aktuell jedoch keinen Verwertungsprozess. Die Prozessbedingungen in Hausmüll- und Sonderabfallverbrennungsanlagen sind für eine vollständige Verbrennung von CF nicht geeignet (Quicker et al. 2021).

Ziel des hier vorgestellten Promotionsvorhabens ist es, ein grundlegendes Verständnis des Einflusses wichtiger CF-Materialeigenschaften und unterschiedlicher Oxidationsmittel auf das Abbauverhalten von CF zu erlangen und einen Beitrag zur Identifikation eines geeigneten, nachhaltigen und tragfähigen Konzepts zur Verwertung nicht-recyclingfähiger CF-haltiger Abfälle zu leisten.

2 Methodik

Zur Erreichung dieser Ziele werden zunächst CF ausgewählt, die den aktuellen CF-Markt in Bezug auf Ausgangsmaterial, mechanische Eigenschaften und Anwendungsgebiete abdecken. Die CF werden im Labormaßstab mechanisch so behandelt, dass sie den nicht-rezyklierbaren Kurzfasern und Stäuben ähneln. Die kinetischen Daten des Abbaus in Luft werden aus thermogravimetrischen Analysen berechnet.

Die Charakterisierung der CF erfolgt bildgebend mittels digitaler Lichtmikroskopie, Laserscanning-Mikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie zur Bestimmung von Geometrie und Oberflächeneigenschaften, sowie mittels Raman-Spektroskopie und Röntgendiffraktometrie zur Strukturaufklärung. Darüber hinaus werden in externen Prüflaboratorien die brennstofftechnischen Eigenschaften mittels Immediat- und Elementaranalyse, sowie die BET-Oberfläche bestimmt.

Die kinetischen Daten werden nachfolgend einerseits den Ergebnissen der Materialanalysen und andererseits den Herstellerangaben zu den mechanischen Eigenschaften gegenübergestellt. Dabei soll mittels statistischer Datenanalyse geprüft werden, ob signifikante Korrelationen existieren, anhand derer Prognosen zum Abbauverhalten verschiedener CF bzw. CF-Typen möglich sind.

Darüber hinaus wird anhand der ermittelten kinetischen Daten das theoretische Abbauverhalten der Materialien in verschiedenen Hochtemperaturprozessen betrachtet.

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden exemplarische Ergebnisse anhand von drei CF dargestellt. Die kinetischen Daten, ermittelt mit dem modellfreien Ansatz nach Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) (Vyazovkin et al. 2011) zeigen, dass Aktivierungsenergie und präexponentieller Faktor und damit verbunden der oxidative Widerstand MPP-basierter CF im Allgemeinen höher sind als die der PAN-basierten CF (Abbildung 1, links).

Dies kann beispielsweise durch den höheren Graphitisierungsgrad I_D/I_G der MPP-basierten CF erklärt werden. Dieser ist durch ein geringes Flächenverhältnis der D-Bande (Raman-Shift bei ca. 1350 1/cm) zur G-Bande bei ca. 1600 1/cm definiert (Abbildung 1, rechts). Dabei ist die G-Bande charakteristisch für graphitische Kohlenstoffstrukturen, die D-Bande für Defektstellen in der Kristallstruktur und amorphen Kohlenstoff. Unter Berücksichtigung des Reaktionsmodells zeigt sich, dass der Abbau dieser CF maßgeblich über deren Mantelfläche erfolgt und die Reaktion somit einer zweidimensionalen Phasengrenzreaktion (Khawam und Flanagan 2006) entspricht.

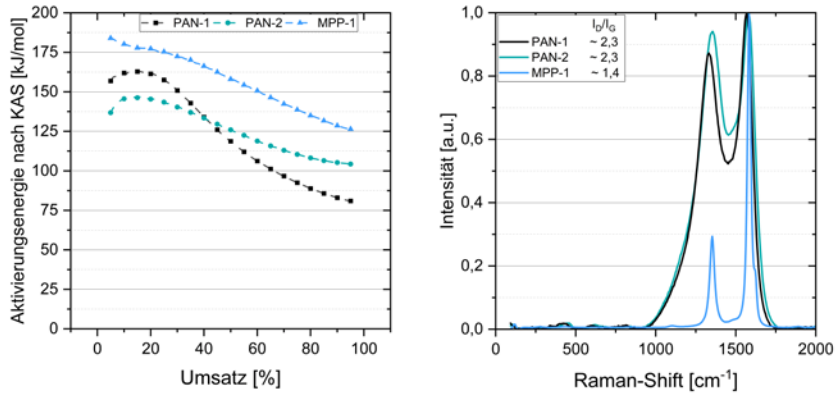


Abbildung 1: Links: Umsatzabhängiger Verlauf der Aktivierungsenergie berechnet nach KAS exemplarisch für zwei PAN-basierte CF, sowie eine MPP-basierte CF. Rechts: Raman-Spektren 1. Ordnung dieser CF

Übertragen auf die Bedingungen einer Abfallverbrennungsanlage im Technikumsmaßstab (Frey et al. 2003) bedeutet dies, dass die beiden PAN-basierten CF bei einer Verweilzeit von 15 min und einer maximalen Rosttemperatur von etwa 800 °C bei idealer Durchmischung theoretisch vollständig abgebaut werden könnten. Für die MPP-basierte CF reicht die Verweilzeit in der heißen Zone (1,6 – 2,4 m) lediglich für eine Oxidation von etwa 45 Ma.-% der Faser aus.

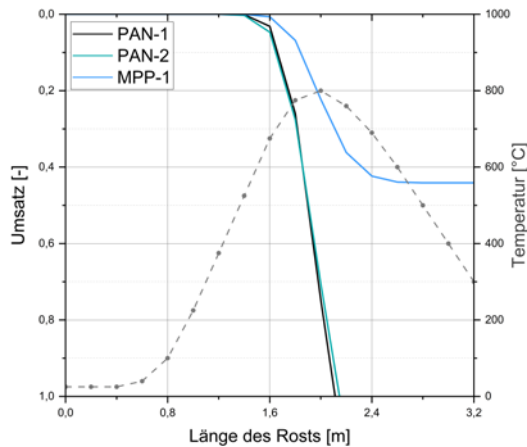


Abbildung 2: Theoretischer Verlauf des Abbaus der untersuchten CF in einer Rostfeuerung im Technikumsmaßstab bei einer angenommenen Verweilzeit von 15 min. Kinetische Parameter berechnet nach dem Modell des Abbaus über die Mantelfläche

Ausgehend vom Ausgangsdurchmesser und unter der Annahme eines idealen Abbaus über die Mantelfläche ergibt sich für diese MPP-basierte CF ein Restdurchmesser von 5,2 μm . Eine kritische Geometrie nach den Kriterien der World Health Organisation ($D \leq 3 \mu\text{m}$) würde bei einer Verweilzeit von etwa 30 min erreicht. Diese theoretische Betrachtung zeigt, dass neben den Bedingungen der Abfallverbrennung nicht nur die Abbaukinetik der CF entscheidend für den Umsatz und die Entstehung kritischer Faserfragmente sind, sondern auch deren Materialeigenschaften. Unter realen Prozessbedingungen und bei der Verwertung gemischter CF-haltiger Abfälle kann von der Ausbildung auch lungengängiger Faserfragmente ausgegangen werden (Quicker et al. 2021).

Um das Spektrum potentieller Verwertungsprozesse zu erweitern, wird in dieser Arbeit weiterhin der Einfluss der Zusammensetzung der sauerstoffhaltigen Gasatmosphäre auf das Abbauverhalten ausgewählter CF untersucht. Ergänzend werden die kinetischen Daten der CF denen konventioneller Kohlenstoffträger gegenübergestellt, um die Plausibilität der Ergebnisse zu prüfen.

Danksagung

Das Promotionsvorhaben wird durch die HELMHOLTZ-Gemeinschaft im Rahmen des Programms „Materials and Technologies for the Energy Transition“ (MTET) gefördert.

Literatur/Quellen

- Das, S.; Warren, J.; West, D.; Schexnayder, S. M. (2016): Global Carbon Fiber Composites Supply Chain Competitiveness Analysis. University of Tennessee, Knoxville. Online verfügbar unter <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66071.pdf>, zuletzt geprüft am 01.10.2024.
- Frank, Erik; Steudle, Lisa M.; Ingildeev, Denis; Spörl, Johanna M.; Buchmeiser, Michael R. (2014): Carbonfasern: Präkursor-Systeme, Verarbeitung, Struktur und Eigenschaften. In: *Angew. Chem.* 126 (21), S. 5364–5403. DOI: 10.1002/ange.201306129.
- Frey, Hans Heinz; Peters, Bernhard; Hunsinger, Hans; Vehlow, Jürgen (2003): Characterization of municipal solid waste combustion in a grate furnace. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 23 (8), S. 689–701. DOI: 10.1016/S0956-053X(02)00070-3.
- Khawam, Ammar; Flanagan, Douglas R. (2006): Solid-state kinetic models: basics and mathematical fundamentals. In: *The journal of physical chemistry. B* 110 (35), S. 17315–17328. DOI: 10.1021/jp062746a.
- Kühne, Christian.; Stapf, Dieter; Holz, Philipp.; Baumann, Werner; Mülhopt, Sonja; Wexler, Manuela et al. (2022): Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (Texte, 92/2022). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_92-2022_entwicklung_von_rueckbau-_und_recyclingstandards_fuer_rotorblaetter_0.pdf, zuletzt geprüft am 01.10.2024.
- Park, Soo-Jin (2015): Carbon Fibers. Dordrecht: Springer (Springer Series in Materials Science, 210).
- Quicker, Peter; Stockschläder, Jan; Stapf, Dieter; Baumann, Werner; Wexler, Manuela; Beckmann, Michael et al. (2021): Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung carbonfaserverstärkter Kunststoffabfälle in thermischen Prozessen. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) (Texte, 131/2021). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/>

texte_131-2021_moeglichkeiten_und_grenzen_der_entsorgung_carbonfaserverstaerkter_kunststoffabfaelle_in_thermischen_prozessen.pdf, zuletzt geprüft am 01.10.2024.

Sauer, Michael; Schüppel, Denny (2023): Marktbericht 2022 - Der globale Markt für Carbonfasern und Carbon Composites. Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen. frei zugängliche Kurzfassung. Composites United. Online verfügbar unter https://composites-united.com/wp-content/uploads/2023/04/CU-Marktbericht_2022_GER_Kurzfassung.pdf, zuletzt geprüft am 19.04.2023.

Stockschläder, Jan (2022): Beitrag zur Verwertung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen in Hochtemperaturprozessen. Dissertation. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen. Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik. Online verfügbar unter <https://publications.rwth-aachen.de/record/952921/files/952921.pdf>, zuletzt geprüft am 04.07.2023.

Vyazovkin, Sergey; Burnham, Alan K.; Criado, José M.; Pérez-Maqueda, Luis A.; Popescu, Crisan; Sbirrazzuoli, Nicolas (2011): ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. In: Thermochimica Acta 520 (1-2), S. 1–19. DOI: 10.1016/j.tca.2011.03.034.

Kontakt

M.Sc. Manuela Wexler, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Karlsruher Institut für Technologie / Institut für Technische Chemie

Tel.-Nr.: 0721 608 23832

E-Mail: manuela.wexler@kit.edu

Homepage: www.itc.kit.edu

Detektion gealterter PE Proben mittels Nahinfrarot Hyperspektralkamera

Abstract: Die Qualität von Kunststoffrezyklaten ist ein entscheidender Faktor für die Menge und Art ihrer Verwendung. Es gibt jedoch viele Einflussfaktoren, die die Qualität mindern und den Einsatz von Rezyklaten einschränken. Einer dieser Faktoren ist die Degradation, die in verschiedenen Phasen des Lebenszyklus eines Kunststoffes auftreten kann. Um die Qualität der Rezyklate zu erhöhen, wäre es daher von Vorteil, stark gealterte Kunststoffe vor der weiteren Verarbeitung auszusortieren. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Möglichkeit, stark gealtertes Polyethylen (PE) von ungealtertem oder weniger gealtertem PE mittels Nahinfrarot (NIR)-Spektroskopie zu trennen. Dazu wurden PE-Proben mit zwei Methoden künstlich gealtert. Ihr Alterungszustand wurde mittels Werkstoffprüfung (FTIR-Spektroskopie und Zugversuchen) bewertet und ihre NIR-Spektren auf einem NIR-Laborsortierer aufgenommen. Die Fähigkeit, stark gealterte von weniger/nicht gealterten Proben zu trennen, wurde dann mittels multivariater Datenanalyse und Algorithmen des maschinellen Lernens an den NIR-Spektren untersucht. Diese zeigten vielversprechende Ergebnisse für die Trennung der unterschiedlichen Alterungsgrade.

1 Einleitung

Einer der weltweit am häufigsten verwendeten und bedeutendsten Kunststoffe für Verpackungsanwendungen ist Polyethylen (PlasticsEurope 2023). Seine breite Anwendung führt jedoch auch zur Entstehung erheblicher Mengen an Verpackungsabfällen. Aus diesem Grund nimmt das Recycling von Polyethylen eine zentrale Rolle in der Kreislaufwirtschaft der Kunststoffindustrie ein. Damit recyceltes PE in neuen Produkten genutzt werden kann, muss jedoch eine bestimmte Materialqualität gewährleistet sein. Diese Qualität kann durch verschiedene Faktoren beeinträchtigt werden, insbesondere durch Verunreinigungen mit anderen Kunststoffen oder Fremdmaterialien sowie durch die Materialalterung.

Während des Lebenszyklus eines PE-Produkts ist es verschiedenen Einflüssen wie UV-Strahlung und thermischer bzw. thermo-mechanischer Belastung ausgesetzt. Diese Faktoren können während der Nutzung, der Lagerung als Abfall oder im Recyclingprozess auftreten und führen zur Alterung des Materials. Die Alterung bewirkt eine Veränderung der Eigenschaften, z.B. kann es zu Kettenspaltungen oder Vernetzungen kommen, die zu Versprödung und Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führen. Zwar kann die Zugabe von Additiven und Stabilisatoren die weitere Degradation von Rezyklaten verhindern, jedoch lassen sich bereits verlorene mechanische Eigenschaften oft nicht wiederherstellen (Vilaplana und Karlsson 2008). Zudem wurde gezeigt, dass die Einmischung von geringen Mengen gealtertem PE in neues Material die Qualität und Lebensdauer des Endprodukts bereits erheblich beeinflussen kann (Craig und

White 2006). Daher ist das Aussortieren stark gealterter Materialien ein essenzieller Schritt, um Rezyklate von höherer Qualität und längerer Lebensdauer herzustellen.

Die Sortierung mittels NIR-Spektroskopie ist eine weit verbreitete Methode zur automatischen Sortierung von Kunststoffabfällen (Ragaert et al. 2017). Mit dieser Technik können bereits verschiedene Kunststoffarten wie PE, Polypropylen (PP), Polyethylenterephthalat (PET) und Polystyrol (PS) erkannt und sortiert werden (Serranti et al. 2011; Yang et al. 2023). Weitere Unterscheidungen wie nach Dichte, beispielsweise zwischen PE hoher Dichte (HDPE) und PE niedriger Dichte (LDPE), sind bereits möglich (Bonifazi et al. 2018; Bredács et al. 2023; Bredács et al. 2021). Industrielle NIR-Sortiersysteme unterscheiden jedoch noch nicht zwischen gealterten und ungealterten Kunststoffen. Solche Systeme könnten jedoch eine vielversprechende Methode zur Bestimmung des Alterungsgrades und damit zur Aussortierung stark gealterter Materialien darstellen.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Möglichkeit aufzuzeigen, mit Hilfe einer NIR-Hyperspektralkamera stark gealterte von nicht oder nur gering gealterten PE-Proben zu unterscheiden. Zu diesem Zweck wurden PE-Proben mit zwei verschiedenen Methoden künstlich gealtert. Die Proben wurden nach einer Reihe von Alterungsperioden entnommen und der Alterungszustand mittels Werkstoffprüfung bewertet. Die für die Analyse und Klassifizierung erforderlichen NIR-Spektren wurden mit einer NIR-Hyperspektralkamera auf einem Laborsortierer aufgenommen. Basierend auf einer multivariaten Datenanalyse (PCA) wurde die Trennung nach Alterungszeit untersucht und Klassifizierungsmodelle wurden erstellt, um die Trennfähigkeit basierend auf der Änderung der Bruchdehnung aus den Zugversuchen zu bestimmen.

2 Methodik

2.1 Material und Alterungsprogramm

Für die Untersuchung wurde ein handelsübliches HDPE für Blasformanwendungen verwendet. Dieses wurde zu 1 mm dicken Platten gepresst, aus denen dann Prüfkörper mit Geometrien gemäß ISO 18488 ausgestanzt wurden. Die Prüfkörper wurden mit zwei verschiedenen Alterungsmethoden gealtert: (i) mittels Bestrahlung mit UV-Licht und (ii) mittels Auslagerung in wässriger Chlordioxidlösung (ClO_2).

2.2 Werkstoffprüfung und NIR Spektroskopie

Zur Bestimmung des Alterungszustandes der Prüfkörper wurden FTIR-Spektroskopie und Zugversuche durchgeführt. Die FTIR-Messungen sollten Aufschluss über die Bildung von Oxidationsprodukten und die Art der Alterung geben, während die Zugversuche Informationen über die Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch die Alterung liefern sollten. Die Bruchdehnung aus den Zugversuchen wurde dann verwendet, um die Proben in zwei Klassen einzuteilen, da sie eine entscheidende Eigenschaft für die Anwendbarkeit von PE ist. Außerdem ist die Bruchdehnung eine der Eigenschaften, die am empfindlichsten auf Alterung und Versprödung reagiert.

Für die Aufnahmen der NIR-Spektren wurde ein Laborsortierer verwendet. Dieser Sortierer besteht aus einem Vibrationsförderer, einer Rutsche, über die das aufgebracht Material gleitet, Halogenstrahlern und NIR Hyperspektralkamera. Die verwendete Hyperspektralkamera nimmt NIR Spektren im Wellenlängenbereich von 900 bis 1700 nm auf.

2.3 Multivariate Datenanalyse und Klassifikation

Die erhaltenen NIR-Spektren wurden einer spektralen Vorbehandlung unterzogen und mit einem Savitzky-Golay-Filter abgeleitet. Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analyse, PCA) wurde verwendet, um einen ersten Überblick über die Trennbarkeit der verschiedenen Alterungsstufen zu erhalten. Um die Trennbarkeit besser bestimmen zu können, wurden anschließend Klassifikationsmodelle erstellt. Dazu wurden die Proben anhand ihrer Bruchdehnung in zwei Klassen eingeteilt. Proben mit einer Bruchdehnung > 50% der Bruchdehnung der Referenzprobe wurden als „ok“ deklariert, Proben mit geringerer Bruchdehnung als „nicht ok“. Für die Erstellung der Klassifikationsmodelle wurden zwei verschiedene Algorithmen des maschinellen Lernens verwendet, Random Forest und Support Vector Machine Algorithmus.

3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden beispielhaft Ergebnisse der UV-gealterten Prüfkörper gezeigt. Abbildung 1 zeigt die Bruchdehnung aus den Zugversuchen. Es ist ein starker Abfall der Bruchdehnung nach 150 h UV-Alterung zu erkennen. In Abbildung 2 ist der PCA Scatter Plot der UV-gealterten Proben zu sehen. Es ist ein deutlicher Trend von der ungealterten Referenzprobe zur stark gealterten Probe erkennbar, was bereits einen ersten Hinweis auf die Machbarkeit der Aussortierung stark gealterter Proben ist. Mit Hilfe eines erstellten Klassifikationsmodells auf Basis des Support Vector Machine Algorithmus mit einem Radial Basis Function Kernel konnten die beiden Klassen „Bruchdehnung ok“ und „Bruchdehnung nicht ok“ mit einer Genauigkeit von 93% unterschieden werden.

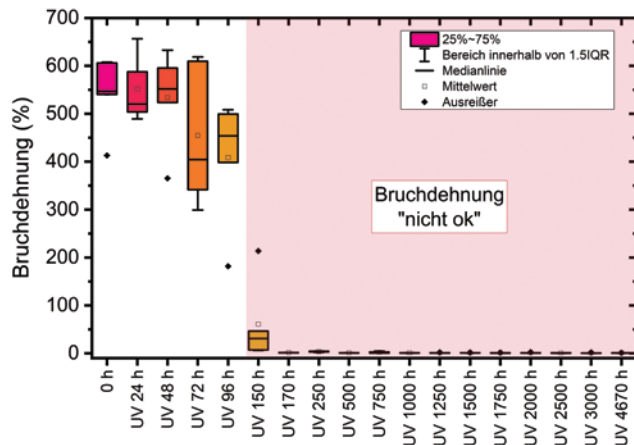


Abbildung 1: Bruchdehnung der durch UV-Strahlung gealterten PE-Prüfkörper

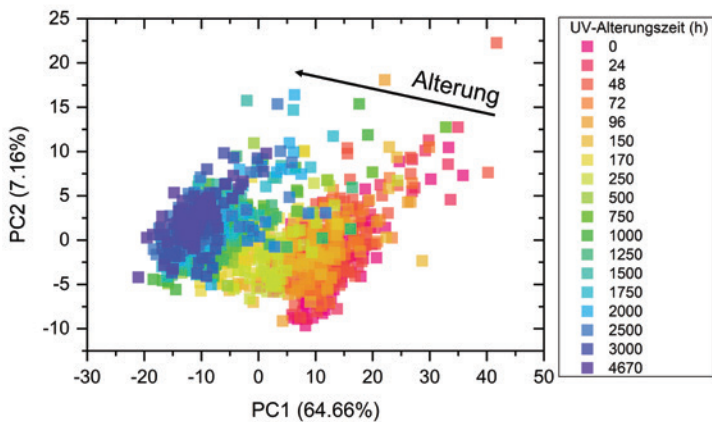


Abbildung 2: PCA Scatter Plot der UV-gealterten Prüfkörper

Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen, dass NIR-Hyperspektralkameras in Kombination mit den richtigen Kalibrierdaten und -modellen geeignet sind, stark gealterte PE-Proben, deren mechanische Eigenschaften durch die Alterung stark reduziert sind, zu klassifizieren und auszusortieren. Die Abtrennung degradierter Kunststoffe aus dem Abfallstrom kann dazu beitragen, die Qualität der recycelten Kunststoffe zu verbessern und den Bedarf an Additiven oder Stabilisatoren zu reduzieren. Dadurch kann der Einsatzbereich der Rezyklate erweitert und der Ressourcenverbrauch verringert werden.

Danksagung

The research work was performed at the Polymer Competence Center Leoben GmbH (PCCL, Austria) within the framework of the COMET-program of the Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology and the Federal Ministry for Labor and Economy with contributions by Montanuniversität Leoben (Chair of Material Science and Testing of Polymers, Chair of Waste Processing Technology and Waste Management) and Transfercenter für Kunststofftechnik GmbH (TCKT). The PCCL is funded by the Austrian Government and the State Governments of Styria, Lower Austria and Upper Austria.

Literatur/Quellen

- Bonifazi, Giuseppe; Capobianco, Giuseppe; Serranti, Silvia (2018): A hierarchical classification approach for recognition of low-density (LDPE) and high-density polyethylene (HDPE) in mixed plastic waste based on short-wave infrared (SWIR) hyperspectral imaging. In: *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy* 198, S. 115–122. DOI: 10.1016/j.saa.2018.03.006.
- Bredács, M.; Barretta, C.; Castillon, L. F.; Frank, A.; Oreski, G.; Pinter, G.; Gergely, S. (2021): Prediction of polyethylene density from FTIR and Raman spectroscopy using multivariate data analysis. In: *Polymer Testing* 104, S. 107406. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107406.
- Bredács, M.; Geier, J.; Barretta, C.; Horvath, R.; Geiser, M.; Ander, K. et al. (2023): Towards circular plastics: Density and MFR prediction of PE with IR spectroscopic techniques. In: *Polymer Testing* 124, S. 108094. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2023.108094.
- Craig, I. H.; White, J. R. (2006): Mechanical properties of photo-degraded recycled photo-degraded polyolefins. In: *J Mater Sci* 41 (3), S. 993–1006. DOI: 10.1007/s10853-006-6596-6.
- PlasticsEurope (2023): *Plastics - the fast Facts 2023*. Online verfügbar unter <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>, zuletzt geprüft am July 2024.
- Ragaert, Kim; Delva, Laurens; van Geem, Kevin (2017): Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. In: *Waste management* (New York, N.Y.) 69, S. 24–58. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.
- Serranti, Silvia; Gargiulo, Aldo; Bonifazi, Giuseppe (2011): Characterization of post-consumer polyolefin wastes by hyperspectral imaging for quality control in recycling processes. In: *Waste management* (New York, N.Y.) 31 (11), S. 2217–2227. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.06.007.
- Vilaplana, Francisco; Karlsson, Sigbritt (2008): Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review. In: *Macromol. Mater. Eng.* 293 (4), S. 274–297. DOI: 10.1002/mame.200700393.
- Yang, Jian; Xu, Yu-Peng; Chen, Pu; Li, Jing-Yan; Liu, Dan; Chu, Xiao-Li (2023): Combining spectroscopy and machine learning for rapid identification of plastic waste: Recent developments and future prospects. In: *Journal of Cleaner Production* 431, S. 139771. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139771.

Kontakt

Dipl.-Ing. Jutta Geier, Researcher
 Polymer Competence Center Leoben GmbH
 Tel.-Nr. +43 3842 42962-711
 E-Mail: jutta.geier@pccl.at
 Homepage: www.pccl.at

Qualitativer und Semi-Quantitativer Nachweis verschiedener bromierter Flammschutzmittel in Kunststoffen des Bausektors

Abstract: Der Bausektor bildet mit einem Anteil von rund 31% das zweitgrößte Marktsegment für bromierte Flammschutzmittel. Durch die hohen Lebensdauern der Bauteile ist davon auszugehen, dass es nach wie vor ein großes Lager an so genannten ‚Legacy Flame Retardants‘ in diesem Sektor gibt. Diese Chemikalien wurden mehrere Jahrzehnte in großen Volumina für Kunststoffe verschiedener Sektoren eingesetzt und von Seiten des Umweltprogramms der Vereinten Nationen als sehr toxisch, bioakkumulativ und persistent in der Umwelt eingestuft, sodass die Produktion verboten und sukzessive eingestellt wurde. Da derzeit keine Methode existiert, um belastete Materialien zu identifizieren, können diese bei Abbrüchen oder Umbauten nicht aussortiert werden und enden derzeit in der Verbrennung, auf Deponien oder werden rezykliert. So wurde im Zuge dieses Projekts getestet, ob es Kunststoffanwendungen im Bausektor gibt, für die eine Methode basierend auf einem mobilem Röntgenfluoreszenzapparat (h-XRF) als kostengünstige und praxistaugliche Lösung für dieses Problem dienen kann. Dazu war es notwendig, sicher zu stellen, dass für einzelne Anwendungen ausschließlich nicht brombasierte Flammschutzmittel als Substitute eingesetzt werden und so der Bromgehalt ausschließlich auf ‚Legacy Flame Retardants‘ zurückzuführen ist.

Zu diesem Zwecke haben wir rund 1400 Kunststoffproben aus dem Bausektor entnommen. Diese lassen sich in 10 Anwendungsbereiche und 10 häufig anzutreffende Polymertypen unterteilen. Anschließend haben wir die Proben mittels h-XRF auf ihren Bromgehalt untersucht, Proben mit hohem Bromanteil (>0,5M%) aussortiert und mittels Gaschromatographie – Massenspektroskopie (GC-MS) sowie Gaschromatographie Atom Emissions Spektroskopie (GC-AED) qualitativ und semi-quantitativ auf ihren Flammschutzmittelgehalt untersucht.

1 Einleitung

Flammschutzmittel (FSM) zählen mit einem Marktanteil von etwa 15%, bemessen an der gesamten Kunststoffadditivproduktion zu den wichtigsten Additiven überhaupt. Davon machen bromierte Flammschutzmittel (BFSM) etwa 18% des Bedarfs aus (Maddela et al. 2023). Die Projektionen und Extrapolationen für die Produktion von bromierten Flammschutzmitteln variieren zwar stark, jedoch stimmen Studien im Allgemeinen darin überein, dass bis 2034 ein starkes Wachstum zwischen 4 und 6% pro Jahr erwartet wird (Future

Market Insights Inc. 2024; Maximize Market Research 2024; Reports and Data 2023). In absoluten Zahlen entspricht dies mehr als 472.000 Tonnen Brom, die im Jahr 2024 zu bromierten Flammschutzmitteln verarbeitet wurden (Statista 2024).

Anfang 2000 wurde der BFSM-Markt von Tetra Bromo Bisphenol A (TBBPA) mit 40%, Poly Bromierten Diphenyl Ethern (PBDEs) mit 27% und Hexabromocyclododecan (HBCD) mit 8% Marktanteil dominiert (BSEF 2003; OECD 1995). PBDEs und HBCD wurden jedoch zwischen 2004 und 2019 wegen ihrer toxischen, bioakkumulativen und persistenten Eigenschaften in die Stockholm Konvention aufgenommen und ihre Produktion verboten. So mussten rund 35% des BFSM-Marktes substituiert werden. Aufgrund dessen kam es zu einer Diversifizierung der Flammschutzmittelzulassung und Anwendung. Heute können mehr als 34 verschiedene BFSM in Staub von Büroräumlichkeiten nachgewiesen werden, die vermutlich aus Elektronikprodukten diffundiert und in den Staub gelangt sind (Zuiderveen et al. 2020). Jedoch gelten derzeit lediglich 3 der 85 BFSM, die am Markt verfügbar sind, als toxikologisch unbedenklich. Bei den übrigen 82 Verbindungen werden negative toxikologische Effekte entweder vermutet oder wurden bereits nachgewiesen. Die jeweiligen toxikologischen Endpunkte können in ECHA Annex Inventar III nachgelesen werden. (ECHA 2025)

Obwohl Elektro- und Elektronikgeräte die größte Menge an Flammschutzmitteln verbrauchen, wird davon ausgegangen, dass der umfangreichste Bestand an so genannten „*Legacy Flame Retardants*“ derzeit im Bausektor zu finden ist, da die durchschnittliche Lebensdauer der Materialien mehr als 40 Jahre beträgt (APME 1995; SPFA 2012; PIPA 2018). So zeigen Hochrechnungen, dass in Europa jährlich 10 000- 60.000t PBDE kontaminierter Kunststoff ($\geq 200\text{mg/kg}$) aus Bau- und Abbruchquellen in End-of-Life-Anlagen gelangen (Vencovsky et al. 2021).

Aufgrund des leichten Zugangs und der Relevanz konzentrierten sich die meisten verfügbaren praktischen Studien auf BFSM in Konsumgütern, Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) sowie Staub in Innenräumen. Diese Studien zeigten eine Diversifizierung der BFSM hin zu neuen, nicht regulierten Chemikalien auf. Dabei erreichten neuartige BFSM bis zu 75 % des gesamten nachweisbaren Broms (Zuiderveen et al. 2020; Zennegg M. 2011). Im Bausektor wurden Dämmstoffen auf PS-Basis viel Aufmerksamkeit gewidmet. Für die meisten anderen Kunststoffe liegen jedoch kaum Studien vor (Norwegian EPA 2021; Drage et al. 2018; Vojta et al. 2017; Turner and Filella 2017). Nur sehr wenige Studien befassten sich mit verschiedenen Anwendungsbereichen, konnten aber aufgrund der geringen Stichprobengröße keine neuen Erkenntnisse gewinnen (Norwegian EPA 2021; Ahkola et al. 2024).

Das Ziel dieser Arbeit war es daher die Stichprobengröße und das betrachtete Anwendungsspektrum von Kunststoffen im Bausektor zu erhöhen, sodass neue Erkenntnisse zur Diversifizierung von bromierten Flammschutzmitteln im Bausektor gewonnen werden können. Sollte sich herausstellen, dass für einzelne Anwendungen lediglich nicht brombasierte Substitute eingesetzt werden, könnte eine Methode basierend auf einem mobilen Röntgenfluoreszenzspektrometer eine Erkennung und damit sachgerechte Entsorgung kontaminierter Materialien ermöglichen.

2 Methodik

2.1 Probenahmekampagnen

Zwischen Februar 2023 und Jänner 2024 wurden im Großraum Wien 25 Probenahmekampagnen durchgeführt. Insgesamt wurden rund 1400 Kunststoffproben aus Bau- und Abbruchabfällen gesammelt. Durch

Rücksprache mit den Entsorgungsunternehmen bzw. der Durchsicht der Begleitscheine konnte ermittelt werden, dass die entnommenen Proben aus mindestens 300 verschiedenen Gebäuden stammten.

Die betrachteten Produktkategorien umfassen PU-Hartschaum, PU-Weichschaum, PIR-Schaum, Polyolefinschaum, Folien, Rohre, Dichtungen, Kabel, Rohre und EPDM. Die Proben wurden mit einem tragbaren h-XRF auf ihren Bromgehalt untersucht und Materialien mit einem hohen Bromgehalt ($\geq 0,5\text{M}\%$) für weitere Analysen bei Seite gelegt. Die Proben mit hohem Bromgehalt wurden nach Polymertyp und Bromgehalt in 15 Mischproben unterteilt und mittels GC-AED und GC-MS analysiert.

2.2 Probenaufarbeitung und Messung

Aufarbeitung I: Die Mischproben wurden mit einer Ultrazentrifugalmühle (UZM) (Retsch – ZM 200) bei 12 000 Rotierungen pro Minute mit flüssigem Stickstoff zu 0,2mm Partikel vermahlen. Im nächsten Schritt wurden die Proben mit einem beschleunigten Lösungsmittelextraktionsgerät (Dionex 200) extrahiert. Je Extraktion wurden 2 Zyklen zu je 45 Minuten statische Temperatur und Druck bei 100bar und 90°C durchgeführt. Alle Proben wurden in einer 1:1 Mischung aus Toluol und 1-Propanol extrahiert. Lediglich PUR und PIR-Schäume wurden in 100% Toluol extrahiert. Die festen Rückstände der Extraktionen wurden abermals mittels h-XRF auf ihren Bromgehalt untersucht, um die Extraktionsausbeute beurteilen zu können.

Aufarbeitung II: Im letzten Schritt der Aufarbeitung wurden die Extrakte auf 0,5ml mit einem Turbo Vap II der Firma Biotage eingeeengt und mit 0,45 μm sowie 0,2 μm Spritzenfilter aufgereinigt. Die aufgereinigte Lösung wurde in zwei GC Vials mit Inserts verfüllt und bis zur Messung bei 6°C gelagert.

Chromatographische Messungen: Für die gaschromatographischen Messungen wurde zunächst eine 20 Meter lange DB-5 GC-Säule der Firma Agilent erworben (Dimensionen: 20m, 0,1mm, 0,1 μm – Artikelnummer AG127-5022). Diese wurde in zwei 10m Stücke geteilt und mit Ferrules für die Anforderungen der GC-Geräte mit Kapillarsäulen desselben Durchmessers verlängert. Im Anschluss wurden die präparierten Säulen in die GC-Geräte eingebaut und unter Inertgasatmosphäre ausgeheizt.

Für die GC-MS Messungen wurde ein GC2010 Gerät, gekoppelt mit einem GCMS-QP2010 Plus Detektor der Firma Shimadzu, verwendet. Die GC-AED Messungen wurden mit einem Agilent 7890A Gerät, gekoppelt mit einem Atomemissionsdetektor JAS G2350A durchgeführt.

3 Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt die gemittelten Bromkonzentrationen der einzelnen Mischproben, deren Anwendung, Polymertyp und die Extraktionsausbeute. Alle Proben bis auf PUR und PIR-Schäume zeigten zufriedenstellende Extraktionsausbeuten von $\geq 86\%$. Die Vermutung liegt nahe, dass für die schlechter extrahierbaren PIR und PUR Schäume PolyFR verantwortlich ist. Dabei handelt es sich um ein brombasiertes Polymer, das direkt in die Matrix eingebaut wird und dementsprechend nicht extrahierbar ist.

Tabelle 1: Gemittelte Bromkonzentrationen der Mischproben vor und nach ASE-Extraktion im Feststoff sowie im Extrakt. Einheiten in Milligramm, referenziert auf 1 Gramm Probenmaterial

Mischprobe	Anwendung	Polymertyp	[Br] n. Extr.	[Br] v. Extr.	Ausbeute [%]	[Br] in Extrakt
MP1	Kabelkanäle	PP	0,21	75,0	99,7	74,8
MP2	Rohr	PP	0,40	81,4	99,5	81,0
MP3	PIR-Schaum	PIR	135	190,4	29,1	55,4
MP4	PO-Schaum	PE/EVA	18,9	428,8	95,6	409,9
MP5	PO-Schaum	PE	6,20	136,0	95,4	129,8
MP6	PO-Schaum	PE	8,81	133,1	93,4	124,3
MP7	PO-Schaum	PE	5,80	184,0	96,8	178,2
MP8	PO-Schaum	PE	12,0	236,2	94,9	224,2
MP9	PO-Schaum	PE	20,5	289,3	92,9	268,8
MP10	PO-Schaum	PE	11,3	137,0	91,8	125,7
MP11	PU-Schaum	PUR	81,2	147,6	45,0	66,4
MP12	PU-Schaum	PUR	148,0	204,6	27,7	56,7
MP13	PU-Schaum	PUR	11,0	349,9	68,6	239,9
MP14	Folien	HDPE	0,68	153,1	99,6	152,5
MP15	Folien	Mix	20,8	154,9	86,6	134,1

Aus der Tabelle lassen sich ebenfalls die gemittelten Bromkonzentrationen je Mischprobe in Milligramm pro Gramm ($=*10^{-2}\text{M}\%$) ablesen, sowie die Menge des gelösten Broms. Das gelöste Brom wiederum sollte mit der Wiederfindungsrate der Bromverbindungen korrelieren. Dieses Ergebnis ist rein quantitativer Natur. Die qualitativen Ergebnisse werden im Vortrag deutlich detaillierter diskutiert werden, da diese den Umfang dieses Konferenzbeitrags übersteigen würden.

Danksagung

Ich bedanke mich sehr herzlich bei meinen Dissertationsbetreuern für ihre Beratung, ihr Feedback und die schnellen Rückmeldungen, die ich zu meinen Fragen erhalten habe.

Literatur/Quellen

Ahkola, Heidi; Junttila, Ville; Kauppi, Sari (2024): Do hazardous substances in demolition waste hinder circular economy? In *Journal of environmental management* 364, p. 121362. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121362.

APME (1995): A Material of Choice in Building and Construction. Plastics Consumption and Recovery in Western Europe. Association of Plastics Manufacturers in Europe. Available online at <https://www.yumpu.com/en/document/read/46766868/plastics-a-material-of-choice-in-building-and-construction-plastics->, checked on 10/17/2024.

- BSEF (2003): Major Brominated Flame Retardants Volume Estimates Total Market Demand By Region in 2001. BSEF – Bromine Science and Environmental Forum. Available online at file:///C:/Users/f.mattersberger/Downloads/EPA-HQ-OPPT-2004-0085-0030_content-1.pdf, checked on 5/7/2024.
- Drage, Daniel S.; Sharkey, Martin; Abdallah, Mohamed Abou-Elwafa; Berresheim, Harald; Harrad, Stuart (2018): Brominated flame retardants in Irish waste polymers: Concentrations, legislative compliance, and treatment options. In *The Science of the total environment* 625, pp. 1535–1543. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.076.
- ECHA (2025): Search for Chemicals. Available online at <https://echa.europa.eu/>, checked on 1/11/2025.
- Future Market Insights Inc. (2024): Bromine Flame Retardant (BFR) Market Outlook from 2024 to 2034. Available online at <https://www.futuremarketinsights.com/reports/bromine-flame-retardant-market>, checked on 5/22/2024.
- Maddela, Naga Raju; Kakarla, Dhatri; Venkateswarlu, Kadiyala; Megharaj, Mallavarapu (2023): Additives of plastics: Entry into the environment and potential risks to human and ecological health. In *Journal of environmental management* 348, p. 119364. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119364.
- Maximize Market Research (2024): Brominated Flame Retardants Market: Green Building Initiatives to boost Market growth. Available online at <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-brominated-flame-retardants-market/111271/>, checked on 5/22/2024.
- Norwegian EPA (2021): Environmental Pollutants in Post-Consumer Plastics. Case Number M-2059|2021. With assistance of Ramboll Fraunhofer IVV. Available online at <https://www.miljodirektoratet.no/sharepoint/downloaditem?id=01FM3LD2RGJ3TG4CATRFEKDGVMULDQ27X7>, checked on 11/12/2024.
- OECD (1995): RISK REDUCTION MONOGRAPH NO.3: SELECTED BROMINATED FLAME RETARDANTS BACKGROUND AND NATIONAL EXPERIENCE WITH REDUCING RISK. With assistance of ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. Available online at [https://one.oecd.org/document/ocde/gd\(94\)96/en/pdf](https://one.oecd.org/document/ocde/gd(94)96/en/pdf), checked on 5/21/2024.
- PIPA (2018): Life Expectancy for Plastics Pipes. Plastics Industry Pipe Association of Australia Limited. Available online at <https://www.pipa.com.au/wp-content/uploads/2018/09/tn013.pdf>, checked on 10/17/2024.
- Reports and Data (2023): Materials and Chemicals - Brominated Flame Retardant (BFR) Market. Available online at <https://www.reportsanddata.com/report-detail/brominated-flame-retardant-market>, checked on 5/22/2024.
- SPFA (2012): Life Cycle Assessment of Spray Polyurethane Foam Insulation. for Residential & Commercial Building Applications. Spray Poly Urethane Foam Alliance. Available online at <https://polo14.com/wp-content/uploads/2020/03/SPFA-LCA-Details.pdf>, checked on 10/17/2024.
- Statista (2024): Market volume of bromine worldwide from 2015 to 2022, with a forecast for 2023 to 2030. Available online at <https://www.statista.com/statistics/1245240/bromine-market-volume-worldwide/>, checked on 5/7/2020.
- Turner, Andrew; Filella, Montserrat (2017): Bromine in plastic consumer products - Evidence for the widespread recycling of electronic waste. In *The Science of the total environment* 601-602, pp. 374–379. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.173.
- Vencovsky, Daniel; Shapland, Imogen; Vencovska, Jana; Garrett, Sophie; Sam Webb, Sam; Upson, Sophie et al. (2021): Study to support the assessment of impacts associated with the review of limit values in waste for POPs listed in Annexes IV and V of Regulation (EU) 2019/1021. Final report for DG Environment. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

- Vojta, Šimon; Bečanová, Jitka; Melymuk, Lisa; Komprdová, Klára; Kohoutek, Jiří; Kukučka, Petr; Klánová, Jana (2017): Screening for halogenated flame retardants in European consumer products, building materials and wastes. In *Chemosphere* 168, pp. 457–466. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.032.
- Zennegg M. (2011): IDENTIFICATION OF “NOVEL” BROMINATED FLAME RETARDANTS IN NEW PRODUCTS OF THE SWISS MARKET. Available online at <https://www.semanticscholar.org/paper/IDENTIFICATION-OF-%22NOVEL%22-BROMINATED-FLAME-IN-NEW-Zennegg/b37b0644d3eaf12b9c4a-0dece24933a78ee1bd2f>, checked on 10/28/2024.
- Zuiderveen, Emma A. R.; Slootweg, J. Chris; Boer, Jacob de (2020): Novel brominated flame retardants - A review of their occurrence in indoor air, dust, consumer goods and food. In *Chemosphere* 255, p. 126816. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126816.

Kontakt

Fabian Mattersberger, Universitätsassistent und wissenschaftlicher Mitarbeiter

TU Wien, Institut für Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement

Tel.-Nr.: +43 1 58 801 226 47

E-Mail: fabian.mattersberger@tuwien.ac.at

Homepage: <https://www.tuwien.at/cee/iwr/ressourcen/team/fabian-mattersberger>

Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens fluorhaltiger Abfälle in einem Festbettreaktor

Abstract: Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) finden sich aufgrund ihrer wasser-, fett- und schmutzabweisenden Fähigkeiten in vielerlei Branchen und auch in vielen Konsumprodukten wieder. Beschichtete Pfannen, Textilien oder Einwegverpackungen gelangen am Ende ihres Lebenszyklus über den Hausmüll oftmals in die thermische Abfallbehandlung einer Müllverbrennungsanlage. Dort werden sie nach den Vorgaben der 17. BImSchV bei mind. 850 °C für 2 s verbrannt. Beim vollständigen Umsatz setzen sich die perfluorierten Substanzen in Fluorwasserstoff (HF) und Kohlenstoffdioxid um. Diverse (kurzkettige) PFAS können vor allem als Produkte des unvollständigen Abbaus freigesetzt werden. In dieser Arbeit soll am Festbettreaktor KLEAA des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) bei eben genannten Bedingungen das Verbrennungsverhalten von fluorhaltigen (Modell-) Brennstoffen untersucht und charakterisiert werden. Hierfür werden neben Fluorwasserstoff auch die Konzentration an extrahierbaren organischen Fluor (EOF), die einen Rückschluss auf freigesetzte PFAS geben, ermittelt.

1 Einleitung

Seit der Entdeckung des Polytetrafluorethylens (PTFE), welches unter dem Markennamen Teflon® bekannt ist, sind polymere und nichtpolymere PFAS (Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen) sowohl aus dem Alltag als auch aus der Industrie und Technik nicht mehr wegzudenken. PFAS finden aufgrund ihrer chemischen und thermischen Stabilität oftmals in der Halbleitertechnik, Medizintechnik aber auch in der Luft- und Raumfahrt Anwendung. Gleichzeitig werden sie wegen ihrer hohen Wasser-, Fett- und Schmutzabweisung oft in Konsumgütern wie Kochgeschirr, Textilien, To-Go-Verpackungen und Kosmetika verwendet. Am Ende der Lebenszeit solcher Produkte steht aufgrund nicht ausgeschöpfter Möglichkeiten des Recyclings die thermische Verwertung, z.B. im Hausmüll. Dieser wird in den Müllverbrennungsanlagen in Europa nach geltendem Recht bei mindestens 850 °C und 2 s Verweilzeit verbrannt. Dabei besteht die Fragestellung, ob sich PFAS durch die thermische Behandlung vollständig abbauen lassen.

Das Institut für Technische Chemie (ITC) des KIT beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der thermischen Behandlung von Abfällen. Seit einigen Jahren zählt dazu auch der thermische Abbau fluorhaltiger Abfälle. An der Pilotanlage BRENDA (Brennkammer mit Dampfkessel) wurden zu diesem Thema bereits zwei Studien zur Verbrennung von Fluorpolymeren von Aleksandrov et al., 2019 und Gehrman et al., 2024 veröffentlicht. Die Karlsruher Laboranlage zur Ermittlung des Abbrandverhaltens von Abfällen (KLEAA) des

ITC ist ein Festbettreaktor mit 40 kW thermischer Leistung. Dieser Reaktor ermöglicht Untersuchungen des thermischen Abbaus von PFAS im Labormaßstab.

In einem vom Umweltbundesamt (UBA) geförderten Projekt sollen in Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Grundlagenuntersuchungen zum thermischen Abbau von PFAS den Sachverhalt zum thermischen Abbau von fluorhaltigen Modellbrennstoffen sowie auch von kommunalem Klärschlamm genauer untersuchen. Entscheidend ist dabei der Einsatz einer geeigneten Probenahmemethodik, die eine Analyse von PFAS sowohl als Einzelsubstanzen (target) als auch als Summenparameter für organisches Fluor (EOF) erlaubt.

Deshalb werden in diesem Beitrag eine Reihe von unterschiedlichen fluorhaltigen Brennstoffen bzw. Brennstoffmischungen auf ihr Verbrennungsverhalten und den thermischen Abbau untersucht. Fluorwasserstoff (HF) als Hauptkomponente der Umsetzung fluorhaltiger Brennstoffe wird dabei sowohl mittels Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskops (FTIR) als auch durch Ionenchromatographie (IC) vergleichend analysiert. Ein weiteres zentrales Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der EOF-Konzentration an verschiedenen Stellen der Anlage, um eine Aussage über Veränderungen in den PFAS-Konzentrationen entlang des Abgasweges treffen zu können.

2 Methodik

Um den Einfluss unterschiedlicher fluorhaltiger Stoffe mit verschiedenen Fluorgehalten hinsichtlich des Freisetzungs- und Abbrandverhaltens miteinander vergleichen zu können, werden die Versuche mit Holzhackschnitzeln als Trägermaterial durchgeführt. In das Trägermaterial wird je einmal ein Fluorpolymer (PTFE) und einmal eine bekannte PFAS, die Perfluorooctansäure (PFOA), zudosiert. Zusätzlich wird ein getrockneter kommunaler Klärschlamm zur Verbrennung eingesetzt.

2.1 Versuchsanlage: Festbettreaktor KLEAA

Der Festbettreaktor KLEAA ist ähnlich einer Hausmüllverbrennungsanlage aufgebaut. Der elektrisch beheizten Brennkammer mit dem Brennstofftopf folgt die Nachbrennkammer zur Nachverbrennung der Abgase. Im Anschluss an die Verbrennung findet die Abgasreinigung durch einen Gewebefilter statt. Nach dem Aktivkohleabsorber kann das gereinigte Abgas über den Kamin in die Umwelt entlassen werden.

Die eingesetzten Brennstoffe (Holz und kommunaler Klärschlamm) sind durch Elementar- und Immediatanalysen sowie die bekannte Reinheit der Fluoradditive (PFOA und PTFE) jeweils ausreichend charakterisiert.

Für die Durchführung der Versuche wird die Primär- und Sekundärluftzufuhr, die Temperatur in der Nachbrennkammer (NBK) und die Verweilzeit nahezu konstant gehalten. Dabei liegt die Luftzufuhr bei $11 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ primär und $13 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ sekundär. Die Temperatur der Nachbrennkammer beträgt mind. 850°C und die Verweilzeit rund 2 s.

An der KLEAA sind für die Charakterisierung der Abgaszusammensetzung entlang des Rauchgasweges vier Probenahmestellen installiert worden. Die Positionen sind in Abbildung 1 gezeigt. Dabei entspricht die erste Probenahme einem Waschflaschenaufbau zur Analyse des EOF im Rohgas. Die Probenahmestelle zwei ist die Position, an der das FTIR mit und ohne Einheit zur Auskondensation angeschlossen wird. Die dritte Stelle zur Probenahme liegt der Probenahmestelle zwei gegenüber, dort ist ein Aufbau nach der „Other Test Method 45“ (OTM 45) angeschlossen (Merrill et al., 2021). Diese Proben dienen zum einen der Analyse des EOF in der Nachbrennkammer und zum anderen der Analyse auf HF mittels IC. An den Stel-

len zwei und drei sind die Bedingungen der 850 °C und 2 s Verweilzeit erfüllt. Die letzte Probenahmestelle befindet sich im Anschluss an die Reingasanalytik und beinhaltet ebenfalls einen Waschflaschenaufbau, mit dem nochmals das Abgas auf organisches Fluor analysiert wird.

Als Probenahmezeitraum wird die Dauer des quasistationären Abbrands definiert. Dieser beschreibt die Verbrennung ab Zeitpunkt der Zündung bis zum Beginn des Koksabbrands. Die verbrennungstechnischen Kennzahlen, die zum Vergleich der Verbrennung verschiedener Brennstoffe dienen, werden auf den gesamten Versuchszeitraum bezogen (Kolb et al., 2008). Sie beschreiben die Zündung sowie den Massenumsatz.

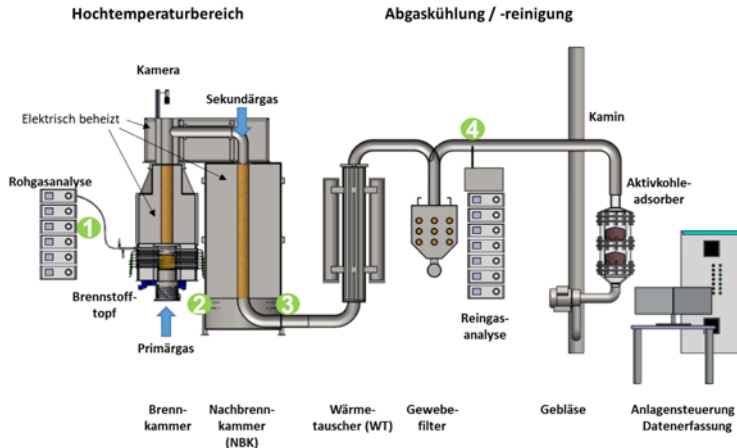


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der KLEAA mit eingezeichneten Probenahmeorten

2.2 Messung mittels FTIR

Die Messungen mittels FTIR finden nach ausgewählten Infrarotspektren einiger kurzkettiger PFAS statt. Nur kurzkettige PFAS lassen sich durch die IR-Spektroskopie nachweisen, da die langkettigen Verbindungen kein Dipolmoment besitzen. Eine Induktion des Dipolmoments ist bei langkettigen PFAS ebenso nicht möglich. Tabelle 1 zeigt die Liste der Namen und Summenformeln von den untersuchten Substanzen. Zusätzlich wird mit dem FTIR Fluorwasserstoff (HF) untersucht.

Tabelle 1: Liste der im FTIR gemessenen PFAS

PFAS	Summenformel	Andere Bezeichnungen
Tetrafluormethan	CF_4	Freon 14
Hexafluorethan	C_2F_6	Freon 116
Octafluorpropan	C_3F_8	Freon 218
Octafluorocyclobutan	C_4F_8	Freon 318
Trifluormethan	CHF_3	Fluoroform, Freon F-23
Fluormethan	CH_3F	Freon 41

2.3 Messung mittels Hochauflösender GF-AAS

Die Messungen durch die Hochauflösende Continuum-Source Graphitrohr MolekülabSORptionsspektroskopie (HS-CS-GF-MAS) werden für ausgewählte Proben von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) durchgeführt. Die hier verwendete Methode bestimmt den Gehalt des extrahierbaren organischen Fluors (EOF). Das EOF ist den PFAS nahezu gleichzusetzen, da in der Natur meist keine organischen fluorhaltigen Verbindungen vorkommen. In der Umwelt liegt Fluor natürlich gebunden in Salzen wie z.B. Flussspat (CaF_2) vor. Demnach kann der EOF auch als PFAS-Summenparameter genutzt und bezeichnet werden (Metzger et al., 2019).

Die Messung des EOF mittels HS-CS-GF-MAS ist eine empfindliche und präzise Methode zur Bestimmung des organischen Fluorgehalts in wässrigen Proben (nach geeigneter Probenvorbereitung). Es können Nachweis- und Bestimmungsgrenzen von wenigen $\mu\text{g/L}$ erreicht werden. Die Analyse der Proben erfolgt bei dieser Methode schneller als bei anderen gängigen Methoden wie z.B. der Combustion-IC (AOF). Dadurch kann eine Vielzahl an Ergebnissen in kurzer Zeit generiert werden. Die Ergebnisse sind dennoch mit anderen Methoden vergleichbar (Gehrenkemper et al., 2021).

Danksagung

Das Projekt „Grundlagenuntersuchungen zum thermochemischen Abbau von PFAS in Labor- und Technikumsanlagen zur Ermittlung optimaler Verbrennungsbedingungen bei der thermischen Behandlung von PFAS-haltigen Abfallstoffen“ wird vom Umweltbundesamt gefördert unter dem Kennzeichen 3722 36 302 2.

Literatur

- K. Aleksandrov u. a., „Waste incineration of Polytetrafluoroethylene (PTFE) to evaluate potential formation of per- and Poly-Fluorinated Alkyl Substances (PFAS) in flue gas“, *Chemosphere*, Nr. 226, S. 898–906, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.03.191.
- L. Gehrenkemper u. a., „Determination of organically bound fluorine sum parameters in river water samples—comparison of combustion ion chromatography (CIC) and high resolution-continuum source-graphite furnace molecular absorption spectrometry (HR-CS-GFMAS)“, *Anal. Bioanal. Chem.*, Bd. 413, Nr. 1, S. 103–115, Jan. 2021, doi: 10.1007/s00216-020-03010-y.
- H.-J. Gehrmann u. a., „Mineralization of fluoropolymers from combustion in a pilot plant under representative european municipal and hazardous waste combustor conditions“, *Chemosphere*, Bd. 365, S. 143403, Okt. 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.143403
- T. Kolb u. a., „Characterisation of combustion behaviour of refuse derived fuel“, *J. Energy Inst.*, Bd. 81, Nr. 1, S. 1–6, März 2008, doi: 10.1179/174602208X269526.
- R. Merrill u. a., „Other Test Method 45 (OTM-45): Measurement of Selected Per- and Polyfluorinated Alkyl Substances from Stationary Sources“, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Jan. 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/otm_45_semi-volatile_pfas_1-13-21.pdf
- M. Metzger u. a., Screening method for extractable organically bound fluorine (EOF) in river water samples by means of high-resolution-continuum source graphite furnace molecular absorption spectrometry

(HR-CS GF MAS)[®], Anal. Bioanal. Chem., Bd. 411, Nr. 19, S. 4647–4660, Jan. 2019, doi: 10.1007/s00216-019-01698-1.

Kontakt

Vanessa Nuredin, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Karlsruher Institut für Technologie – Institut für Technische Chemie

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Telefon: +49 721 608 28944

E-Mail: vanessa.nuredin@kit.edu

Homepage: itc.kit.edu

TEIL 6

Internationale Abfallwirtschaft

Leitung:

Prof. Dr. Michael Nelles

Was tun mit dem Rest? – Erhebung des Verwertungspotentials der Siebreste zweier Siedlungsabfallbehandlungsanlagen in Uganda

Abstract: In Uganda wurden im Rahmen des UN Clean Development Mechanism 12 Kompostierungsanlagen errichtet, um die von der Abfallwirtschaft verursachten Treibhausgase zu verringern und Dünger für die Landwirtschaft herzustellen. Da eine getrennte Abfallsammlung nicht etabliert ist, landet ein erheblicher Teil nicht-kompostierbarer Materialien in diesen Anlagen. Zurzeit werden diese Reststoffe deponiert oder in der Umwelt abgelagert. Um das zu verhindern, könnten sie einerseits als Ersatzbrennstoffe in der Zementindustrie eingesetzt und der recyclingfähige Anteil andererseits recycelt werden. Im Rahmen der Studie wurde das Ersatzbrennstoff- und Recyclingpotenzial der Reststoffe erhoben. Der potenzielle EBS-Anteil wurde analysiert und Szenarien beschrieben, die sich je nach potenziellen Recyclinganteil unterscheiden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schwermetall- und Chlorgehalte sowie der Heizwert der brennbaren Fraktionen für die Verwendung als Ersatzbrennstoffe sprechen. Der Anteil recyclingfähiger Materialien liegt bei bis zu 21%.

1 Einleitung

Im Rahmen des UN Clean Development Mechanism (CDM) wurden 12 Kompostierungsanlagen in Uganda errichtet. Ziel war es, mittels dieser Anlagen den Ausstoß von Treibhausgasen, verursacht von der Abfallwirtschaft, zu verringern und gleichzeitig Dünger in Form von Kompost für die Landwirtschaft bereitzustellen (Kabasiita et al., 2022). Da eine getrennte Abfallsammlung in Uganda nicht etabliert ist und immer mehr Kunststoff- und Verbundprodukte im Abfallstrom landen, erreichen beträchtliche Mengen nicht kompostierbarer Abfälle diese Anlagen (Castellani et al., 2022). Zurzeit werden die Reststoffe der Kompostierung im Umfeld der Anlagen abgelagert oder zu einer Deponie gebracht. Neben den schädlichen Auswirkungen auf die Umwelt gehen dadurch auch wichtige potenzielle Rohstoffe verloren.

Eine Möglichkeit für die Verwertung der Siebreste ist deren Einsatz als Ersatzbrennstoffe (EBS) in Ugandas Zementindustrie. Der Einsatz von aus gemischtem Siedlungsabfall hergestellten EBS kann zur Reduktion der fossilen Kohlenstoffdioxid- (CO_2) Emissionen der Zementindustrie beitragen, da die EBS auch biogene Anteile enthalten, und dadurch fossile Energieträger eingespart werden (Beguedou et al., 2023).

In den Siebresten der CDM-Kompostierungsanlagen finden sich jedoch nicht nur gut brennbare Materialien, der Anteil an potenziell recyclingfähigen Stoffen ist ebenso beträchtlich. Die Wiederverwertung dieser Materialien kann zur Steigerung der Zirkularität von Ugandas Abfallwirtschaft und damit ebenfalls zur Reduktion von CO_2 -Emissionen beitragen.

Im Rahmen dieser Studie soll die qualitative Eignung der Reststoffe als EBS sowie der Einfluss auf die fossilen CO₂-Emissionen der Zementindustrie durch den Einsatz von EBS durch die Erhebung fossiler CO₂-Emissionsfaktoren ermittelt werden. Weiters sollen verschiedene Szenarien zur Zusammensetzung der potenziellen EBS verglichen werden.

2 Methodik

2.1 Probennahme und -vorbereitung

Die nach dem letzten Siebschritt anfallenden Siebreste von zwei Kompostierungsanlagen in Uganda (Mukono und Masindi) wurden für eine Woche während der Regenzeit (September 2023) beprobt. Für die Probennahme wurden jeden Tag für 6 bis 8 Stunden zwei Schubkarren pro Stunde mit in etwa 20 kg Siebresten gefüllt, gesammelt und gemischt; am Ende des Tages wurden von der Tagesprobe 30 Stichproben genommen und zu einer Tagesmischprobe von 45 bis 79 kg vereint. Diese Tagesmischprobe wurde in 23 Fraktionen sortiert, die wiederum den Kategorien i) potenzielle Recyclingfraktion, ii) potenzielle EBS Fraktion, iii) Restfraktion, zugeteilt wurden: Kunststoffsäcke (i), Folien (i), PVC (iii), PET (i), Flaschenverschlüsse (i), Hartplastik (i), geschäumte Kunststoffe (ii), Andere Kunststoffe (ii), Textilien (ii), Haare (ii), Glas (i), Organik (iii), Metalle (i), Komposite (ii), gefährliche/medizinische Abfälle (iii), Flüssigkeiten (iii), Gummi (ii), Papier/Karton (i), Batterien (iii), elektronische und elektrische Geräte (iii), Holz (ii), Steine (iii), Andere (iii).

Nach der Sortierung wurden die Proben getrocknet und für die Analyse auf eine Korngröße von <0,5 mm gemahlen.

2.2 Analyse

2.2.1 Schwermetalle

Der Schwermetallgehalt der Proben wurde, mit Ausnahme des Quecksilbergehalts (Hg), der mittels eines Hg-Analysegeräts bestimmt wurde, mittels RFA-Messungen bestimmt (Niton XL3t). Falls die gemessenen Werte die Hälfte der Grenzwerte in Anlage 8, Absatz 1.1 der österreichischen Abfallverbrennungsverordnung (AVV) überschritten, wurden noch zusätzlich Analysen mittels ICP-OES (PerkinElmer Optima 8300) durchgeführt.

2.2.2 Elementare Zusammensetzung

Der Kohlenstoff- (C), Wasserstoff- (H), Stickstoff- (N) und Schwefel- (S) Gehalt der gemahlenen und getrockneten Proben sowie deren Asche wurde mittels Elementar Vario Macro analysiert, der Sauerstoff- (O) Gehalt wurde mittels Pyrolyse im Elementar Rapid Oxy Cube ermittelt.

2.2.3 Heizwertbestimmungen

Der Heizwert der trockenen potenziellen EBS-Fraktion wurde auf Basis der elementaren Zusammensetzung abgeschätzt. Dafür wurde die Formel nach Boie (Kost, 2001) angewandt:

$$LHV = 34.834 * C + 93.868 * H - 10.802 * O + 6.280 * N + 10.467 * S - 2.449 * W$$

2.2.4 Chlorgehalt

Der Chlorgehalt (Cl) der potenziellen EBS-Fraktion wurde einerseits mittels dem PVC-Anteil der Sortierfraktion „Andere Kunststoffe“ berechnet und andererseits wurden die Cl-Messwerte der RFA-Messungen von allen EBS-Proben mitberücksichtigt.

2.2.5 Adaptierte Bilanzenmethode (aBM)

Die adaptierten Bilanzenmethode (aBM) wurde angewandt, um die fossilen und organischen Anteile der CO₂-Emissionen zu berechnen (Schwarzboeck et al., 2018). Bei der aBM werden Daten zur elementaren Zusammensetzung der EBS mit Daten der elementaren Zusammensetzung von fossilen und biogenen Materialien kombiniert. Für die Elemente C, H, N, S und O wird jeweils eine Massenbilanz erstellt, die jeweils als unbekannte Variablen den fossilen und den biogenen Anteil beinhaltet. Da sich die elementare Zusammensetzung von fossilen und biogenen Materialien wesentlich unterscheidet, kann dann der biogene und fossile Massenanteil der EBS mittels einer nichtlinearen Ausgleichsrechnung erörtert werden (Schwarzboeck et al., 2018; Spacek et al., 2020).

2.3 Szenarien

Drei Szenarien wurden definiert, um die CO₂-Einsparung in Zementwerken abzuschätzen. Für alle Szenarien wird angenommen, dass Störstoffe wie elektronische und elektrische Geräte, Steine und Batterien bei der EBS Produktion abgetrennt werden. In Tabelle 1 werden die Szenarien beschrieben.

Tabelle 1: Szenarien mit unterschiedlichen Recyclinganteilen

Szenario 1	Szenario 2 (aktuelle Situation)	Szenario 3
<ul style="list-style-type: none"> • Recycling der potenziellen Recyclingfraktionen (i) • Verbrennung der potenziellen EBS-Fraktionen (ii) 	<ul style="list-style-type: none"> • Recycling nur von PET Flaschen und Papier/Karton • Verbrennung aller anderen potenziellen Recyclingfraktionen (i) und der EBS-Fraktionen (ii) 	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Recycling • Verbrennung aller brennbaren Fraktionen (i und ii)

3 Resultate und Diskussion

3.1 Schwermetalle

Die gewichteten durchschnittlichen Schwermetallgehalte der potenziellen EBS sind in Tabelle 2 dargestellt.

*Tabelle 2: Schwermetallgehalte der potenziellen EBS verglichen zu den Grenzwerten in der AVV
(Anlage 8 Absatz 1.1 AVV)*

	Anlage 1 [mg/MJ]	Anlage 2 [mg/MJ]	Grenzwert [mg/MJ]
Cr	12,2	15,7	25
Pb	3,7	4,3	20
Co	0,3	0,4	1,5
Sb	0,7	1,3	7
Cd	0,2	0,1	0,23
As	0,2	0,4	2
Ni	3,4	4,5	10
Hg	0,002	0,001	0,075

Bei dem auf Basis der elementaren Zusammensetzung errechnetem Heizwert liegen alle Werte unter den Grenzwerten der österreichischen Abfallverbrennungsverordnung (Grenzwerte für Uganda gibt es aktuell nicht).

3.2 Heizwert

Der mit Boie berechnete Heizwert für die trockenen EBS von Anlage 1 beträgt 21 MJ/kg und der für Anlage 2 beträgt 22 MJ/kg. Damit wäre sogar ein Einsatz im Hauptbrenner eines Zementwerkes denkbar (Rotter, 2010).

3.3 Chlorgehalt

Der Cl-Gehalt der EBS von Anlage 1 wurde mit 0,5% abgeschätzt, der Cl-Gehalt der EBS aus Anlage 2 mit 1,1%. Der Großteil des Cl befindet sich im PVC-Anteil der Fraktion „Andere Kunststoffe“ (PVC-Anteil wurde mit 1 bis 25% abgeschätzt), welche daher möglichst abgetrennt werden sollten.

3.4 Fossile- und Recyclinganteile

Die Ergebnisse der aBM zeigen, dass je nach Szenario 76-99% des vorhandenen Kohlenstoffs fossilen Ursprungs sind. Der Einsatz der EBS kann, im Vergleich zu fossilen Energieträgern, zu einer Einsparung fossiler CO₂-Emissionen beitragen.

Der Anteil potenziell recyclingfähiger Materialien in den Siebresten liegt bei bis zu 21%.

Danksagung

Diese Studie wurde durch das Austrian Partnership Programme in Higher Education and Research for Development – APPEAR, ein Programm der Austrian Development Corporation (ADC) finanziert und implementiert vom österreichischen Austauschdienst (OeAD). Die Studie ist Teil des Projekts Clean and Pro-

sperous Uganda – Fecal Sludge and Solid Waste Management for Improved Livelihoods (CPUg) (Projekt #256, 2022).

Literatur/Quellen

- Beguedou, E., Narra, S., Afrakoma Armoo, E., Agboka, K., & Damgou, M. K. (2023). Alternative Fuels Substitution in Cement Industries for Improved Energy Efficiency and Sustainability [Article]. *Energies (Basel)*, 16(8), 3533. <https://doi.org/10.3390/en16083533>
- Castellani, P., Ferronato, N., & Torretta, V. (2022). Setting priorities to achieve Sustainable Development Goals through appropriate waste management systems in Uganda [Article]. *Environmental Development*, 44, 100764. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100764>
- Kabasiita, J. K., Opolot, E., & Malinga, G. M. (2022). Quality and Fertility Assessments of Municipal Solid Waste Compost Produced from Cleaner Development Mechanism Compost Projects: A Case Study from Uganda. *Agriculture (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE12050582>
- Kost, T. (2001). *Brennstofftechnische Charakterisierung von Haushaltsabfällen* (B. Bilitewski, D. Weltin, & P. Werner, Eds.; 1. Aufl.).
- Rotter, S. (2010). Incineration: RDF and SRF – Solid Fuels from Waste [Bookitem]. In *Solid Waste Technology & Management* (Vol. 1, pp. 486–501). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470666883.ch32>
- Schwarzboeck, T., Aschenbrenner, P., Muehlbacher, S., Szidat, S., Spacek, S., & Fellner, J. (2018). Determining the climate relevance of refuse-derived fuels-validity of literature-derived values in comparison to analysis-derived values [Article]. *Detritus*, 2(June), 120–132. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2018.13649>
- Spacek, S., Mallow, O., Schwarzböck, T., Fellner, J., & Rechberger, H. (2020). Eine neue Methode für die Bestimmung des Mikroplastik-Massenanteils in Umweltproben [Article]. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 72(9–10), 403–409. <https://doi.org/10.1007/s00506-020-00697-2>

Kontakt

Dipl.-Ing.ⁱⁿ Sara Neuburg, Universitätsassistentin

TU Wien, Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement

+43 1 58801 22659

E-Mail: sara.neuburg@tuwien.ac.at

Homepage: <https://www.tuwien.at/cee/iwr/ressourcen>

The environmental potential of smartphone repair: case study Vientiane Capital, Laos

Abstract: *Despite its prevalence, the repair industry faces significant challenges. These include issues related to the quality and accessibility of spare parts, the lack of standardized repair guidelines, insufficient technical expertise among repair technicians, increasingly complex product designs, and limited consumer awareness regarding the benefits and feasibility of repair. These obstacles hinder the broader adoption of repair practices and the development of a more sustainable circular economy. However, this case study highlights the substantial environmental advantages of smartphone repair. Over a 7-year observation period, repair practices were found to reduce greenhouse gas (GHG) emissions by 44% compared to the conventional approach of replacing damaged smartphones with new ones. These findings underscore the critical role of repair services in mitigating environmental impacts, emphasizing the need for improved support for repair industries through better policies, training, and awareness campaigns to maximize environmental and economic benefits.*

1 Introduction

The European „Circular Economy“ (CE) action plan seeks to promote sustainable production and consumption by prolonging product lifespan through measures including sharing, renting, repairing, refurbishing and recycling (Bressanelli, G. et al., 2020). Nonetheless, most circular economy studies primarily focus on the environmental impact and economic advantages of recycling and reduction strategies, while the substantial opportunities for mitigating environmental impacts and resource consumption through reuse, repair, and remanufacturing remain underexplored (Wieser and Tröger, 2018). Increasing evidence indicates that new policies are being implemented in many regions around the globe to support the right to repair. The European Commission adopted a Right to Repair Directive (Directive (EU) 2024/1799). The goal is to prioritize mending over replacement and allow consumers to have damaged products repaired by producers. The EU is proposing a mandatory digital product passport as part of the Eco-design for Sustainable Products Regulation (Directive 2009/125/EC) (European Commission, 2023). Several states in the United States of America have commenced the process of formulating meticulous legislative measures. In 2023, New York became the first state to pass legislation on digital gadget repairs, which prescribes that manufacturers must provide repair manuals (NCSL, 2023). As of early 2023, the global mobile phone user count was 5.44 billion, accounting for 68 percent of the total global population, with projections indicating it will exceed 7.5 billion by 2026 (Statista, 2024). The percentage of people in Germany who have had their phones repaired is only 23%, while in the United States, it is 28%. In comparison, the rates are significantly higher in China at 66% and South Korea at 64% (Greenpeace, 2016). Analysing the environmental advantages of smartphone re-

pair provides insight into the promotion of reuse and repair, hence enhancing user awareness. This research focuses on a localized case study of smartphone repair practices in Vientiane Capital, Laos.

2 Methodology

2.1 Life cycle Inventory

The common repair procedures in Vientiane Capital are derived from a field survey of 16 repair shops and online surveys of 52 households conducted in Vientiane Capital as part of the 'E-waste in Laos' project, funded by ASEA UNINET. To evaluate the repair potential of the smart phone, a life cycle approach is selected and existing LCA data for components and processes were used. Within this, the life cycle stages of smartphones (the Apple iPhone 14 Pro, with a storage capacity of 128 GB) such as manufacturing of smartphones, manufacturing of spare parts, the use phase, and repair are considered in the model. The impact category is exclusively applicable to greenhouse gases (GHG) – Global warming potential (GWP) emissions, for which the majority of data is available, and it has a substantial impact on environmental discourse. The absence of specific data necessitated excluding the processes of landfill disposal and recycling in this model.

To ensure a reliable evaluation of repair performance, various intervention scenarios are essential. This study examines five scenarios that demonstrate the effects of differing maintenance frequencies, predicated on essential assumptions on parts replacement (Dalasee & Xayavong 2023; Öko-institut, 2020) the repair success rate (Wieser and Tröger, 2018): Baseline Scenario, No Repair Scenario, 1x Repair Scenario, 2x Repair Scenario, and 3x Repair Scenario. The GWP derived from all scenarios were evaluated and compared throughout the entire evaluation period of seven years (Öko-institut, 2020). The subsequent sections describe these scenarios in detail:

- **Baseline Scenario:** This represents the status quo (usual behavior of smartphone users) with the assumption that minor repairs take place to maintain the average lifespan of 2.5 years for smartphones (Wieser and Tröger, 2018; Proske et al., 2016; Maheswari et al., 2020); 50% of devices need 1 battery replacement after 2 years (Proske et al., 2016), while 30% of devices need display replacement (Öko-institut, 2020). Therefore, to reach the 7-year observation period, 2.8 smartphones need to be manufactured.
- **No Repair Scenario:** It is assumed that the user focuses solely on replacing the smartphone with a new one when the battery has significantly impacted on the smartphone performance; therefore, users will replace their smartphones after two years due to battery quality (Proske et al., 2016) (Öko-institut, 2020), despite the average device lifespan of 2.5 years. Therefore, 3.5 new smartphones need to be manufactured.
- **1x Repair Scenario:** It represents the repair strategy to extend the lifespan of a smartphone to 7 years with the assumptions that about 50% of devices need 2 batteries replacement, 50% of devices need 3 batteries replacement, 70% of devices need 1 display replacement, and 30% of devices need 1 camera/ audio/speaker replacement (Öko-institut, 2020). Additionally, a success rate of 30% (Wieser and Tröger, 2018) is considered. Therefore, 1.7 new smartphones need to be manufactured.
- **2x Repair Scenario:** This is similar to the 1x Repair Scenario but assumes that every second repair attempts to increase the success rate to 60%. Therefore, 1.4 new smartphones need to be manufactured.

- **3x Repair Scenario:** This is similar to 1x Repair, but three repair attempts are executed, enhancing the repair success rate to 90%, to achieve the targeted lifespan of 7 years. Therefore, 1.1 new smartphones need to be manufactured.

3 Result

Field surveys in the case study indicate that around 71% of smartphones received from customers require hardware repair, signifying the need for component replacement. The remaining 29% of devices pertains to software repairs, indicating updates for the phones and applications. The hardware repair is the main focus of the study, where it was reported that the display has the highest rate at 38% followed by battery at 17%, chip/core at 7%, camera at 6% and the speaker (Dalasee & Xayavong 2023). Comparable results regarding the shared components for smartphone repairs are also observed in Proske et al., 2016 and Schischke et al. 2021. The spare parts were primarily imported from China and Thailand. Upon completion of the repair service, approximately 75% of repair shops sell their wasted components to junk shops, while 25% retain their replacement parts for reuse, resale, or disposal alongside municipal solid waste.

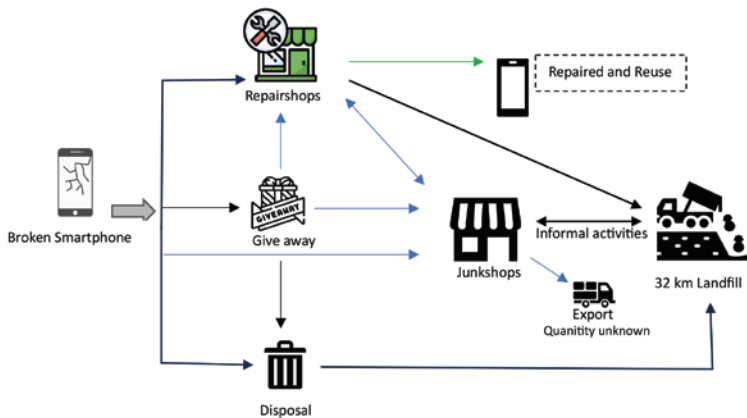


Figure 1: Smartphone repair practices in Vientiane Capital, Laos

A comparison of the Baseline Scenario (current status quo) and the 3x Repair Scenario demonstrate the significant environmental advantages of prolonging the lifespan of smartphones throughout the observation period. Over seven years, the rate at which smartphones are repaired instead of being replaced leads to a decrease of 59 kg CO₂ equivalent per user. This represents a 34% decrease in CO₂ equivalent emissions. The findings demonstrate that no repair option exhibits the largest GWP, as the manufacturing of new equipment substantially elevates CO₂ emissions. However, when repair initiatives were tripled, the environmental benefits were more pronounced, as fewer smartphones needed replacement over the observation period, potentially saving up to 89 kg of CO₂ equivalent per user, or nearly 44%.

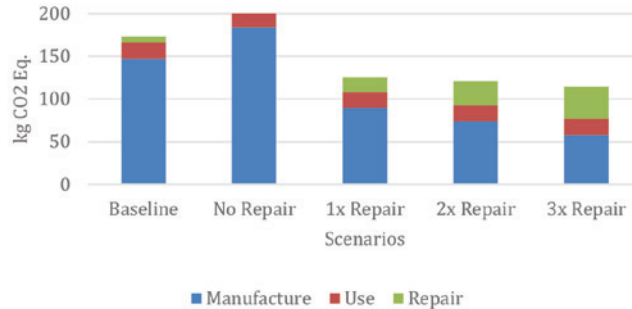


Figure 2: The comparison of Global Warming Potential of smartphone repair in different scenarios

A related investigation by Benton et al., 2015, estimated that extending the smartphone lifespan by one year might yield a 31% decrease in CO₂ emissions. When owners must decide regarding broken smartphones, the repair option should be first, followed by refurbished or manufactured (Pamminger et al., 2021). Nevertheless, numerous obstacles limit the extensive support for smartphone repairs. According to Dalasee and Xayavong, repairers reported that newer smartphones are more difficult to repair due to the complex design and the often required authorized spare parts. For Apple iPhone models, the repairability score ranges from 4 to 6 out of 10, which means that smartphones are repairable but require a professional repair shop due to the extensive part coupling, proprietary screws, and persistent warnings when not using the authorized spare parts (Suovanen, 2023). Enhancing repair capabilities and services is important for reducing environmental impacts; to optimize the economic and environmental benefits of repair practices, stronger policies, training, and awareness campaigns are essential.

Danksagung

This research is based on the results obtained from project E-waste in Laos, which is funded by ASEA-UNINET, with a grant number AESA 2022-2023/BOKU/5.

Literatur/Quellen

- Benton, D.C., E.; Hazell, J (2015). A Circular Economy for Smart Devices: Opportunities in the US, UK, and India; Green Alliance: 2015.
- Bressanelli, G.; Sacconi, N.; Pigosso, D.C.A.; Perona, M. (2020). Circular Economy in the WEEE industry: a systematic literature review and a research agenda. Sustainable Production and Consumption 2020, 23, 174-188, doi:10.1016/j.spc.2020.05.007.
- Dalasee, B.; Xayavong, C (2023). Smartphone Repair in Vientiane Capital, Lao PDR. National University of Laos, 2023.
- European Commission (2023). Right to Repair: Commission Introduces New Consumer Rights for Easy and Attractive Repairs.

- Greenpeace (2016). Greenpeace Umfrage Smartphone.
- Maheswari, H.; Yudoko, G.; Adhiutama, A. (2017). Stakeholder engagement in quattro helix model for mobile phone reverse logistics in Indonesia: a conceptual framework. In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Montreal, Canada, 2017.
- NCSL. (2023). Right to Repair 2023 Legislation.
- Öko-Institut (2020). Economic and Ecological Effects of Extending the Useful Life of Electrical and Electronic Devices Using the Example of Smartphones, Notebooks, Washing Machines, Televisions, and E-Bikes/ Pedelecs.; 2020.
- Pamminger, R.; Glaser, S.; Wimmer, W. (2021). Modelling of different circular end-of-use scenarios for smartphones. The International Journal of Life Cycle Assessment 2021, 26, 470-482, doi:10.1007/s11367-021-01869-2.
- Proske, M.C., C.; Richter, N (2016). Life Cycle Assessment of the Fairphone 2. Final Report; Fraunhofer IZM: 2016.
- Statista (2024). Number of Mobile Phone Users Worldwide from 2010 to 2025.
- Suovanen, J. How iFixit Repairability Ratings Are Created. 2023
- Wieser, H.; Tröger, N. (2018). Exploring the inner loops of the circular economy: Replacement, repair, and reuse of mobile phones in Austria. Journal of Cleaner Production 2018, 172, 3042-3055, doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.106.

Kontakt

Dipl.-Ing. Souphaphone Soudachanh, wissenschaftliche MitarbeiterIn

University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, Institute of Waste Management and Circularity

Tel.-Nr.: +43 1 47654-81340

E-Mail: souphaphone.soudachan@boku.ac.at

Homepage: <https://boku.ac.at/wau/abf>

MSW to RDF Conversation for Cement Plant in Indonesia Through Pilot Project and Modeling

Abstract: *This study investigates MSW management and its application in the cement industry through the conversion of MSW into RDF in four Indonesian regions: Jakarta, Bogor Regency, Depok, and Bekasi. Collectively, these areas produce 14,500 Mg/day of MSW. Samples totaling 1,265 Mg of this MSW were analyzed to determine their physical and chemical properties, particle size distribution, and fraction. Results indicated LHV of 5.4 MJ/kg and a high moisture content of 55%, underscoring the need for improved MSW treatment processes. The most common particle size was 50-80 mm, accounting for 31.6% of the MSW. The organic fraction was predominant at 43%, followed by plastics at 24% and paper at 13%. In a pilot project involving 10 trials with 1,000 Mg of MSW, processing through a series of pre-shredder, trommel, magnetic separator, wind-shifter, and fine shredder produced RDF with an LHV of 8.7 MJ/kg and 47% moisture, along with a lower-grade RDF with an LHV of 3.0 MJ/kg and 61% moisture. This effort resulted in 441 Mg of low-grade RDF and 423 Mg of higher-grade RDF, resulting in an estimated reduction of 217 Mg of CO₂ emissions. Further modeling suggested that using hot gases at the cement plant could produce drier RDF. To meet the cement plant's demands, thirteen RDF production units processing 6,500 Mg/day of MSW would be required. This would generate 3,100 Mg/day of RDF, achieving a 51% fuel substitution rate at the cement plant, reducing CO₂ emissions by 24%, and cutting MSW by 45% across the regions.*

1 Introduction

Cement is a crucial building material known for its durability and versatility, playing a significant role in infrastructure development. In 2022, global cement production capacity reached 4.3 billion Mg and is expected to rise, posing challenges in reducing CO₂ emissions (Cembureau, 2023). The cement industry faces three main issues: reducing CO₂ emissions, improving production efficiency, and implementing economic circularity. Previous research has shown that reducing CO₂ emissions can lead to cost savings in material purchases (Rootzén & Johnsson, 2017). The industry is responsible for climate protection, focusing on CO₂ reduction and resource preservation (Salamanova et al., 2020; Schneider, 2019). In Indonesia, the cement industry faces similar challenges, contributing 28% of the country's CO₂ emissions (Kemenperin, 2022). Indocement, a leading company, aims to become more sustainable by reducing greenhouse emissions, managing waste through a circular economy, and improving water and energy efficiency. They target a 50% coal substitution rate with alternative fuels by 2030 (Indocement, 2022).

Municipal solid waste (MSW) management is a pressing issue in Indonesia, generating nearly 69 million Mg annually. The densely populated Jabodebek region contributes significantly to this waste (BPS Jakarta, 2023; KLHK, 2023). Despite regulations, waste management remains inefficient (Fatimah et al., 2020). Converting MSW to refuse-derived fuel (RDF) offers a solution, aligning with government policies and supporting sustainable practices in the cement industry. RDF, derived from MSW, has a high calorific value and low production costs but faces challenges like heterogeneity and moisture content (Paszowski et al., 2020). Optimizing RDF production through pilot projects is essential. In Europe, legal frameworks promote waste valorization, and cement manufacturers use RDF to replace coal, reducing fuel costs (Brás, 2017). Utilizing RDF addresses both cement production and MSW management challenges, presenting a collaborative solution between cement producers and the government. This research examines RDF's feasibility as an alternative fuel in Indocement, proposing a model that harmonizes resource optimization with industrial sustainability (Mateus et al., 2023).

2 Methodology

2.1 Study Area Description and MSW Collection

The study was conducted in four regions near Indocement, a cement plant in Bogor, Indonesia: Jakarta, Bogor Regency, Depok, and Bekasi (Jabodebek). MSW was collected from local intermediate storage facilities within 50 km of the cement plant. The collection period spanned from December 2022 to June 2023, covering both rainy and summer seasons. The samples were transported to the cement plant using trucks with a capacity of 6-8 m³, averaging 2-3 Mg per truck. MSW analysis and RDF production were conducted at the cement plant.

Table 1. MSW Sample Collection.

		Urban Area				
Item	Unit	Jakarta City	Bogor Regency	Depok City	Bekasi City	Total
Sample collection duration	days	8	8	8	8	32
Sampling in summer						
Sampling schedule	N/A	8-15 May 2023	22-29 May 2023	5-12 Jun 2023	19-26 Jun 2023	N/A
Trucks sample count	unit	56	56	56	56	224
Rainfall	mm/month	50-100				N/A
Sampling in rainy						
Sampling schedule	N/A	12-19 Dec 2022	9-16 Jan 2023	28 Nov - 5 Dec 2022	23-30 Jan 2023	N/A
Trucks sample count	unit	56	56	56	56	224
Rainfall	mm/month	250-400				N/A
Total trucks sample count	unit	112	112	112	112	448
Samples taken per truck	Mg	2.84	2.79	2.78	2.88	2.82
Total samples taken	Mg	318	313	312	323	1,265
Daily waste generation	Mg/day	8527	2688	1400	1830	14,445

2.2 Experimental Design

The research comprised three phases: MSW analysis, pilot-scale RDF production, and RDF production modeling.

2.2.1 MSW Characterization

The collected MSW was mixed to ensure homogeneity. Chemical and physical properties, particle size distribution, and MSW fraction were analyzed. Moisture content, lower heating value (LHV), and ash content were determined according to EN standards. Total carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur, and chlorine contents were assessed using XRF analysis (Wirosoedarmo et al., 2021; Zhang et al., 2019; Dharmendra, 2022).

2.2.2 Pilot Project of RDF Production

Ten trial runs were conducted, each processing around 100 Mg of MSW. The MSW was pre-shredded, trommel-screened, and further processed to produce RDF. Two types of RDF were produced: high-grade (50x50 mm) and low-grade (80 mm). The RDF was analyzed for quality and fed into the cement plant's calciner to determine CO₂ emissions and energy generation (Oladejo et al., 2020; Paszkowski et al., 2020).

2.2.3 RDF Production Modeling

The pilot project results were used to model RDF production. The pre-drying process occurred in urban settings, while the drying process used hot gases at the cement plant. The model aimed to achieve a 50% fuel substitution rate at the cement plant, reducing CO₂ emissions and MSW volume (Alfè et al., 2022).

Acknowledgements

This study was conducted with the assistance of the local governments of Jakarta, Bogor Regency, Depok, and Bekasi, which provided coordination for MSW sampling. This study was supported by PT Indocement Tungal Prakarsa Tbk, which provided the laboratory and equipment for the pilot project.

References

- Alfè, M., Gargiulo, V., Porto, M., Migliaccio, R., Le Pera, A., Sellaro, M., Pellegrino, C., Abe, A. A., Urciuolo, M., Caputo, P., Calandra, P., Loise, V., Rossi, C. O., & Ruoppolo, G. (2022). Pyrolysis and Gasification of a Real Refuse-Derived Fuel (RDF): The Potential Use of the Products under a Circular Economy Vision. *Molecules*, 27(23), 8114. <https://doi.org/10.3390/molecules27238114>
- BPS Jakarta. (2023). Jakarta City Statistic. Badan Pusat Statistik Kota Jakarta (Central Statistics Bureau of Jakarta City). <https://jakarta.bps.go.id/indicator/12/1270/1/jumlah-penduduk-menurut-kabupaten-kota-di-provinsi-dki-jakarta-.html>
- Brás, I., Silva, M. E., Lobo, G., Cordeiro, A., Faria, M., & de Lemos, L. T. (2017). Refuse derived fuel from municipal solid waste rejected fractions-a case study. *Energy Procedia*, 120, 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.227>
- Cembureau. (2023). Reaching Climate Neutrality Along The Cement And Concrete Value Chain By 2050 Cementing The European Green Deal. European Cement Association. https://cembureau.eu/media/w0lbouva/cembureau-2050-roadmap_executive-summary_final-version_web.pdf

- Dharmendra. (2022). Organic waste: generation, composition and valorisation. In C. Hussain and S. Hait (Eds.), *Advanced Organic Waste Management: Sustainable Practices and Approaches* (pp. 3-15). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-02931-2>
- Fatimah, Y. A., Govindan, K., Murniningsih, R., & Setiawan, A. (2020). Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: A case study of Indonesia. *J. Clean. Prod.*, 269, 122263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122263>
- Indocement. (2022). 2022 Sustainability Report [White paper]. PT Indocement Tunggul Prakarsa Tbk. <https://www.indocement.co.id/resource/03.%20Investor/3.8.2%20Laporan%20Keberlanjutan/2022-Laporan%20Keberlanjutan-INTP.pdf>
- Kemenperin. (2022). Industrial Green House Gases in Indonesia. Kementerian Perindustrian Republik Indonesia (Ministry of Industry of Republic Indonesia). http://bskji.kemenperin.go.id/wp-content/uploads/2023/03/LAPTRI-I-2022_PIH.pdf
- KLHK. (2023). Waste Figure in Indonesia. Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia (Ministry of Environment & Forestry Republic of Indonesia). <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>
- Mateus, M. M., Cecilio, D., Fernandes, M. C., & Neiva Correia, M. J. (2023). Refuse derived fuels as an immediate strategy for the energy transition, circular economy, and sustainability. *Bus. Strategy Environ.*, 32(6), 3915-3926. <https://doi.org/10.1002/bse.3345>
- Oladejo, A. E., Manuwa, S. I., & Onifade, T. B. (2020). Design and fabrication of a shredder. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 445(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/445/1/012001>
- Paszkowski, J., Domański, M., Caban, J., Zarajczyk, J., Pristavka, M., & Findura, P. (2020). The Use of Refuse Derived Fuel (RDF) in the Power Industry. *Agric. Eng.*, 24(3), 83–90. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2020-0029>
- Rootzén, J., & Johnsson, F. (2017). Managing the costs of CO₂ abatement in the cement industry. *Clim. Policy*, 17(6), 781–800. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1191007>
- Salamanova, M. S., Aliev, S. A., Murtazaev, S. A. U., Saidumov, M. S., & Gabazov, I. A. (2020). Possible solutions to problems in the cement industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 905(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/905/1/012058>
- Schneider, M. (2019). The cement industry on the way to a low-carbon future. *Cement and Concrete Research*, 124, 105792. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884619301632>
- Wirosoedarmo, R., Haji, A. T. S., & Hidayati, E. A. (2018). Pengaruh konsentrasi dan waktu kontak pada pengolahan limbah domestik menggunakan karbon aktif tongkol jagung untuk menurunkan BOD dan COD. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 3(2), 31-38.
- Zhang, Y., Kusch-Brandt, S., Gu, S., & Heaven, S. (2019). Particle size distribution in municipal solid waste pre-treated for bioprocessing. *Resources*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/resources8040166>

Contact

Mr, Muhammad Angga, Kusuma, PhD Candidate

Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, Rostock University, Rostock, Germany

Phone: +628567184480

E-Mail: m.angga.kusuma@gmail.com

KAPITEL II – POSTER

Die Rolle der Abfallwirtschaft im Klimaschutz: Kohlenstoffflüsse und Potenziale zur Treibhausgasreduktion

Abstract: Das Klimaschutzgesetz zielt darauf ab, bis zum Jahr 2045 Treibhausgasneutralität in Deutschland zu erreichen. Die Abfallwirtschaft spielt hierbei eine zentrale Rolle, da sie sowohl Treibhausgasemissionen verursacht als auch Potenziale zur Kohlenstoffrückgewinnung bietet. Ziel der zugrundeliegenden Masterarbeit war es, biogene und fossile Kohlenstoffströme in der deutschen Abfallwirtschaft für das Jahr 2021 zu bilanzieren und Abfallströme und Behandlungsprozesse zu identifizieren, aufgrund derer relevante Menge an Kohlenstoff freigesetzt werden. Die Ergebnisse zeigten, dass der Abfall in Deutschland im Jahr 2021 33 Millionen Tonnen Kohlenstoff enthielt, davon ein Drittel fossiler Kohlenstoff. Anhand von Szenarioanalysen wurde deutlich, dass die Substitution fossiler Kunststoffe durch Biokunststoffe sowie der Einsatz von Carbon Capture and Utilization (CCU)-Technologien zukünftig einen relevanten Beitrag zur Reduktion fossiler Kohlenstoffemissionen leisten können. Die Arbeit lieferte eine Grundlage für weitere Untersuchungen zur Emissionsreduktion und zur Schließung von Kohlenstoffkreisläufen in der deutschen Abfallwirtschaft.

1 Einleitung

Die Abfallwirtschaft spielt eine bedeutsame Rolle im globalen Klimaschutz, da Abfallmengen insgesamt steigen und je nach Bewirtschaftung damit mehr oder weniger Treibhausgasemissionen verbunden sind. Die Abfallwirtschaft umfasst die Sammlung, Behandlung und Verwertung von Abfällen, um Mensch und Umwelt zu schützen und natürliche Ressourcen zu schonen. In Bezug auf kohlenstoffhaltige Abfälle und die daraus entstehenden Emissionen lassen sich erhebliche Potenziale zur Reduktion von Treibhausgasemissionen ableiten. Die Auswirkungen der Abfallwirtschaft auf den Klimaschutz wurden bereits in früheren Studien (wie BMUV, 2023; bvse, 2020; Samadi, 2023; Umweltbundesamt, 2011) untersucht, allerdings fehlte bislang eine bilanzielle Auswertung der Kohlenstoffströme innerhalb dieses Sektors. Die vorliegende Arbeit verfolgt daher das Ziel, eine detaillierte Übersicht über die biogenen und fossilen Kohlenstoffströme in der deutschen Abfallwirtschaft zu erstellen. Zudem werden relevante Abfallströme sowie Behandlungsprozesse identifiziert, bei denen Kohlenstoff freigesetzt wird und Minderungspotenziale aufgezeigt.

2 Methodik

Zur Erstellung der Kohlenstoffbilanz der Abfallwirtschaft in Deutschland wurde eine Materialflussanalyse (MFA) auf Güter- und Kohlenstoffebene durchgeführt, im Rahmen derer Daten aus der Literatur erfasst und

aufbereitet wurden, um den Status quo für das Jahr 2021 abzubilden und eine Analyse unterschiedlicher Bewirtschaftungsszenarien zu ermöglichen.

Die Datengrundlage dieser Studie wurde aus dem Abfallwirtschaftsbericht 2017 sowie der Abfallbilanz 2021 des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS) gewonnen. Diese Quellen enthalten detaillierte Daten zu den Abfallströmen in Deutschland und bieten die Basis für die Analysen in der vorliegenden Studie. Sie umfassen insbesondere Informationen zu den abfallwirtschaftlichen Mengen, der Zusammensetzung und den Behandlungspfaden der Abfälle. Zusätzlich wurden die Kohlenstoffgehalte diverser im Abfall enthaltener Materialien aus wissenschaftlichen Quellen und Berichten extrahiert, wobei zwischen biogenem und fossilem Kohlenstoff unterschieden wurde.

Die gesammelten Daten wurden in einer strukturierten Form aufbereitet, um eine effiziente Modellierung und Analyse zu ermöglichen. Dies beinhaltete die Kategorisierung der Abfälle in die fünf Hauptgruppen Siedlungsabfälle, Abfälle aus der Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen, Bau- und Abbruchabfälle, Übrige Abfälle und Sekundärabfälle. Innerhalb dieser Kategorien wurden die Kohlenstoffgehalte differenziert nach biogenem und fossilem Kohlenstoff ermittelt. Die Daten wurden auf ihre Vollständigkeit und Konsistenz überprüft, um potenzielle systematische Fehler in der Analyse zu vermeiden.

Material- oder Stoffflussanalysen dienen zur systematischen Untersuchung des Zustands und Änderungen von Lagern und Flüssen in einem zeitlich und räumlich definierten System (Brunner und Rechberger, 2017). Im Rahmen der Abfallwirtschaft werden Materialflussanalysen beispielsweise eingesetzt, um Informationen über die Verteilung von Materialien zu gewinnen, die im weiteren Verlauf als Grundlage zur Optimierung des Abfallwirtschaftssystems genutzt werden können (Allesch und Brunner, 2017). In der vorliegenden Studie wurde die Software STAN (<https://www.stan2web.net/>; Cencic, 2016) zur Modellierung der Abfall- und Kohlenstoffströme in der deutschen Abfallwirtschaft verwendet. Die Analyse erfasste die Güterflüsse innerhalb der Abfallwirtschaft als Basis zur Ermittlung der darin enthaltenen Kohlenstoffflüsse, wobei auf der Stoffebene zwischen fossilem und biogenem Kohlenstoff unterschieden wurde. Als Eingabedaten ins Materialflussmodell wurden Flussdaten, Transferkoeffizienten und Massenanteile genutzt. Dieses Vorgehen ermöglichte eine detaillierte Bilanzierung der Materialflüsse in der deutschen Abfallwirtschaft.

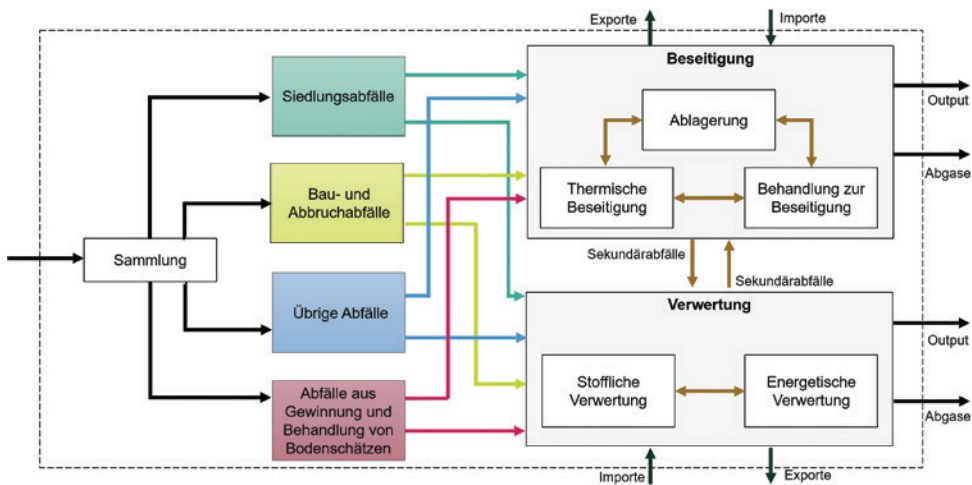


Abbildung 1: Vereinfachtes qualitatives Materialflussdiagramm der Abfallwirtschaft in Deutschland

Mittels einer auf vereinfachenden Annahmen beruhenden Szenarioanalyse wurden zudem die Effekte der Substitution fossiler Kunststoffe durch biobasierte Materialien sowie der Einsatz von Carbon Capture and Utilization (CCU-)Technologien in der thermischen Abfallbehandlung untersucht und die daraus resultierenden Emissionsminderungspotenziale abgeschätzt.

3 Ergebnisse

Im Jahr 2021 betrug der durchschnittliche Kohlenstoffgehalt der Primärabfälle in Deutschland 9,2 %, was einer Menge von 32,8 Millionen Tonnen Kohlenstoff entspricht. Davon entfielen knapp zwei Drittel auf biogenen Kohlenstoff. Die wichtigsten Abfallströme für biogenen Kohlenstoff waren Siedlungsabfälle und übrige Abfälle mit jeweils über 9 Millionen Tonnen. Diese stammten vor allem aus organischen Abfällen, Papier-, Pappe- und Kartonabfällen (PPK) sowie Holzabfällen. Die Hauptquelle für fossilen Kohlenstoff im Abfall waren Kunststoffe, die über verschiedene Abfallströme zu einer Gesamtmenge von 12,2 Millionen Tonnen beitrugen.

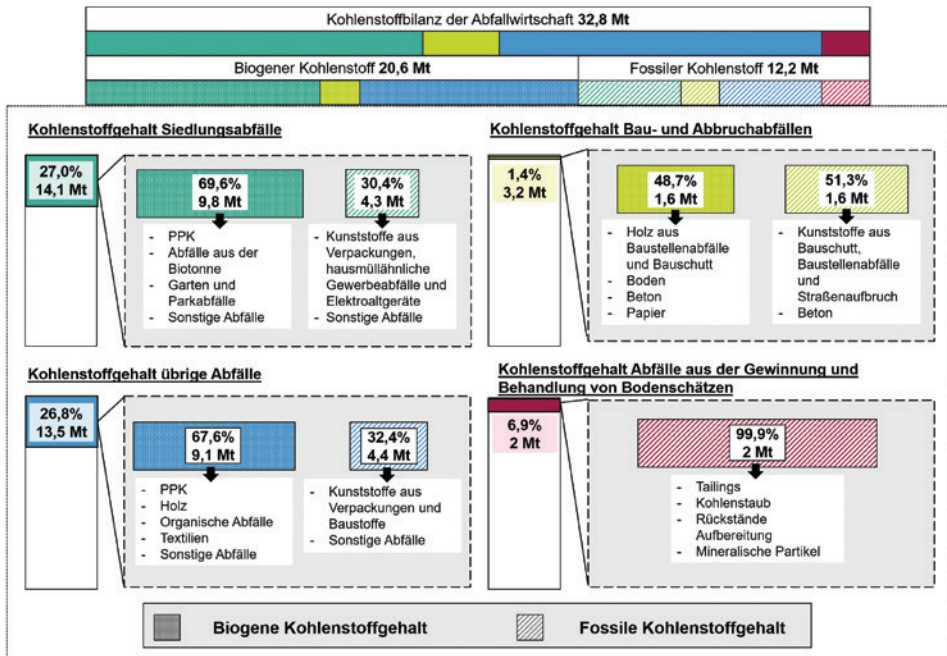


Abbildung 2: Kohlenstoffgehalte diverser Abfallgruppen, unterteilt in fossil und biogen

Direkte Kohlendioxidemissionen der Abfallwirtschaft stammten hauptsächlich aus der energetischen Verwertung, insbesondere in thermischen Abfallbehandlungsanlagen, und erreichten etwa 40 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr. Zusätzlich entstanden andere relevante Treibhausgase wie Methan, vor allem durch die biologische Behandlung und die Deponierung von Abfällen.

Die Szenarioanalysen zeigten, dass sowohl die Substitution fossiler Kunststoffe durch Biokunststoffe als auch der Einsatz von CCU-Technologien das Potenzial besitzen, einen relevanten Beitrag zur Reduktion fossiler Kohlenstoffemissionen in der Abfallwirtschaft zu reduzieren.

4 Fazit

Die vorliegende Masterarbeit liefert einen detaillierten Einblick in die fossilen und biogenen Kohlenstoffströme der deutschen Abfallwirtschaft. Die Ergebnisse zeigen relevante Kohlenstoffquellen und -senken sowie Potenziale zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und zur Schließung von Kohlenstoffkreisläufen auf. Damit bildet die Arbeit eine Grundlage für weitere Untersuchungen zur effektiven Minderung klimaschädlicher Emissionen innerhalb der Abfallwirtschaft.

Literatur/Quellen

- Allesch, A., Brunner, P.H., 2015. Material Flow Analysis as a Decision Support Tool for Waste Management: A Literature Review. *Journal of Industrial Ecology* 19, 753–764. <https://doi.org/10.1111/jiec.12354>.
- Brunner, P.H., Rechberger, H., 2017. *Handbook of material flow analysis: For environmental, resource, and waste engineers*. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, 435 Seiten.
- Bundesministerium für Umwelt; Naturschutz; nukleare Sicherheit (BMUV); www.bmuv.de (2023): Abfallwirtschaft in Deutschland 2023. Fakten, Daten, Grafiken.
- Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft (2020): *Statusbericht_der_deutschen_Kreislaufwirtschaft_2020*.
- Cencic, O., 2016. Nonlinear data reconciliation in material flow analysis with software STAN. *Sustainable Environment Research* 26, 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.06.002>.
- Samadi, Sascha; Larissa, Doré; Manfred, Fishedick; Andreas, Fischer; Thomas, Hanke; Georg, Holtz et al. (2023): Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2045. Ein Szenario aus dem Projekt SCI4climate. NRW.
- Umweltbundesamt (2011): Klimarelevanz der Abfallwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4061.pdf>.

Kontakt

Lucia Aguirre Molina, M.Sc.

Universität Kassel

E-Mail: abfalltechnik@uni-kassel.de

Homepage: www.uni-kassel.de/go/RMAT/

Verpackungsstudie 2024: Detail-Charakterisierung des deutschen Leichtverpackungsabfalls

Abstract: Zur Untersuchung des Abfallaufkommens von Leichtverpackungen (LVP) wurde im Jahr 2024 bereits zum zweiten Mal eine deutschlandweite Feldstudie durchgeführt. Innerhalb eines zweiwöchigen Zeitraums sammelten 350 Haushalte ihre LVP-Abfälle und sendeten diese zur Charakterisierung an die Hochschule Pforzheim. Erste Zwischenergebnisse basieren auf der detaillierten Analyse von 100 Haushalten mit 98,4 kg bzw. 10.300 Einzelteilen durch die Erfassung u. a. von LVP-Gewicht, Werkstoff, Packstoff-Farben, Füllgütern, Etiketten oder Verschlüssen. Die Kunststoffe PP (10,6%) und PET (8,3%) werden in LVP am häufigsten eingesetzt. Rund 70% der Verpackungen werden für Lebensmittel verwendet, die restlichen 30% für Nicht-Lebensmittel-Verpackungen. Trotz des Inkrafttretens der erweiterten Pfandpflicht sind 1,9% potenziell pfandpflichtige Verpackungstypen im LVP-Strom vorhanden. Im Vergleich zur ersten Verpackungsstudie 2019 (4,6%) sind dies rund 2,7 Prozentpunkte weniger.

1 Einleitung

Im Jahr 2021 wurden in Deutschland 19,7 Millionen Tonnen an Verpackungsabfällen verursacht, was einem Anstieg von 4,9% im Vergleich zum Vorjahr entspricht. Obgleich die Gesamtrecyclingquote mit 67,9% hoch erscheint, können nicht alle Werkstoffe gleichermaßen wiederverwertet werden. Glas, Papier und Eisenmetalle werden zu über 80% recycelt, während der Wert bei Kunststoffverpackungen knapp unter 50% liegt [1]. Insbesondere im Hinblick auf Kunststoffverpackungen besteht noch immer Handlungsbedarf, um die Kreislaufführung zu verbessern. Die Gründe hierfür sind zum einen die starken jährlichen Mengenzuwächse in diesem Bereich und zum anderen die verschärften Vorgaben der Recyclingquoten, da das Verpackungsgesetz seit 2022 eine mechanische Recyclingquote von 70% für Kunststoffe fordert [2].

Die unzureichende Datengrundlage über die detaillierte Zusammensetzung des Leichtverpackung (LVP)-Abfallstroms stellt ein Hemmnis für eine bessere Kreislaufführung dar. Die Zentrale Stelle Verpackungsregister beispielsweise verfügt zwar über detaillierte Informationen hinsichtlich der innerhalb Deutschlands in Verkehr gebrachten Kunststoffverpackungen, publiziert sie jedoch nicht. Auch die üblichen industriellen Abfallanalysen der Entsorgungs- und Recyclingbetriebe erreichen diesen hohen Detaillierungsgrad hinsichtlich der Kunststoff-Verpackungsabfälle nicht.

An dieser Stelle setzt die an der Hochschule Pforzheim durchgeführte Verpackungsstudie 2024 an: Zum zweiten Mal nach 2019 verfolgt sie das Ziel der detaillierten Untersuchung der Zusammensetzung des deutschen Leichtverpackungsabfalls auf Basis einer Stichprobe von 350 deutschen Haushalten. Das geht über das bisherige Maß einschlägiger Studien [3–5] hinaus und ermöglicht nicht nur eine deskriptive Beschreibung der Zusammensetzung, sondern auch die Quantifizierung des tatsächlichen werkstofflichen Recyclingpotenzials in diesem Stoffstrom.

Ziel des hier vorliegenden Beitrages ist es, die Auswirkungen der seit Januar 2022 schrittweise erweiterten Pfandpflicht auf die LVP-Zusammensetzung zu quantifizieren. Hierzu werden Produkte, welche unter die erweiterte Pfandpflicht fallen, identifiziert und die Datensätze aus der Verpackungsstudie 2019 mit einer vorläufigen Auswertung (erste 100 Haushalte) der Verpackungsstudie 2024 verglichen. Zur Quantifizierung der Effekte aus der Pfandpflicht werden die Charakteristiken der Verpackungsart und des Lebensmittel-Füllguts dargestellt und ausgewertet.

2 Erweiterte Pfandpflicht

Wein-, Frucht- und Milch-Getränke in Einwegkunststoffflaschen wurden bisher als Teil der LVP über die Dualen Systeme entsorgt. Dies führt in der Regel zu einer unzureichenden Rückgewinnung der enthaltenen Materialien oder zur thermischen Verwertung. Um dem entgegenzuwirken, gilt seit dem 1. Januar 2022 im Rahmen des Verpackungsgesetzes die erweiterte Pfandpflicht in Deutschland auf Sekt, Wein, alkoholhaltige Mischgetränke und Frucht- und Gemüsesäfte in Einwegkunststoffflaschen und Getränkedosen. Diese Pfandpflicht wurde zum 1. Januar 2024 auf Milch, Milchmischgetränke und Milchprodukte ausgeweitet [2]. Das Ziel der erweiterten Pfandpflicht ist die Schließung eines weiteren Stoffkreislaufes, um diese Rohstoffe einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft zuzuführen [6]. Pfandflaschen weisen eine sehr hohe Rückgabequote auf und setzen somit die Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling und eine Reduktion der Umweltbelastung durch Kunststoffabfälle [7].

3 Methodik

Im Rahmen des durch das Land Baden-Württemberg geförderten Forschungsprojekts „präziSort“ wurde die Primärdatenerhebung zur haushaltsnahen Sammlung von LVPs konzipiert und durchgeführt. Aus den insgesamt 700 Teilnehmern einer deutschlandweiten Onlineumfrage im Jahr 2024 wurden auf Basis des jeweiligen lokalen Sammelsystems, der Haushaltgröße sowie der Gemeindegröße 350 Teilnehmer für die weitere Studie ausgewählt. Sie wurden gebeten alle anfallenden LVP in einem flexiblen, zweiwöchigen Zeitraum, der im September 2024 begann, zu sammeln und anschließend an die Hochschule zurückzusenden. Da die Teilnehmer unterschiedliche Sammelssysteme nutzen, war die Anforderung, dass sie den zur Verpackungssammlung zugesandten „Wissenschaftssack“ so nutzen, wie sie ihr normales Sammelssystem im Normalfall auch nutzen würden. Dies beinhaltet ggf. auch die Entsorgung stoffgleicher Nichtverpackungen. Die weitere Tiefencharakterisierung jeden einzelnen Packmittels an der Hochschule umfasst u. a. Gewicht, Werkstoff (Recyclingcode und NIR-Analyse), Packstoff-Farbe, Füllgüter, Etiketten und Verschlüsse. Ergänzend wird eine Bilddatenbank mit sämtlichen Einzelobjekten erstellt. Die Methodik zur Primärdatenerhebung orientierte sich dabei weitestmöglich an der Verpackungsstudie von 2019 [8].

4 Ergebnisse

Insgesamt wurden 277 Wissenschaftssäcke postalisch an die Hochschule zurückgesendet. Die teilnehmenden Haushalte umfassten eine Gesamt-Haushaltsmitgliederzahl von 664, welche insgesamt 398,3 kg an LVP-Abfällen generiert haben. Durchschnittlich entspricht dies 1,4 kg je Haushalt und 0,6 kg je Haushaltsmitglied oder hochgerechnet rund 16,2 kg/Jahr und Person und beträgt somit knapp die Hälfte des 2023 an-

gefallenen LVP-Abfalls je Person [5]. Dies kann unter anderem mit dem gesteigerten Interesse der Studienteilnehmer begründet werden, sodass vergleichsweise weniger Abfälle generiert werden, und dass weniger Fehlwürfe stattgefunden haben. Dieser Effekt wurde bereits in der Verpackungsstudie 2019 beobachtet [8].

Die vorläufigen Ergebnisse basieren auf einer Auswertung der ersten 100 Wissenschaftssäcke mit insgesamt 10.300 Einzelteilen und einer Gesamtmasse von 98,4 kg. Basierend auf dem Recyclingcode bzw. den optischen Eigenschaften besteht diese Stichprobe aus 51,0% Kunststoffen, 16,6% Metallen, 15,7% Verbundwerkstoffen, 6,2% Papier und 10,5% anderen Werkstoffen (Abbildung 1). Die relevantesten Kunststoffe sind mit 10,6% PP und 8,3% PET. Über 21% der Kunststoffe hatten keine Kennzeichnung und 1,6% der Kunststoffverpackungen sind als Multilayer-Kunststoff (mehr als 2 Kunststoffarten) gekennzeichnet.

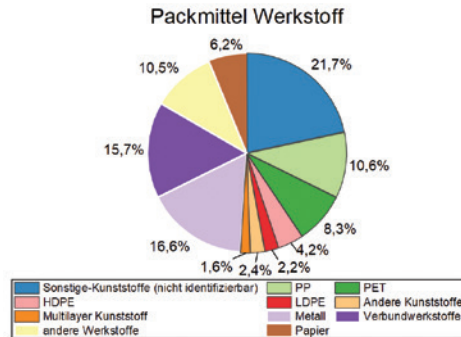


Abbildung 1: Packmittel Werkstoff nach Recyclingcode-Informationen (Angaben in Gew.-%)

Als Packmittel werden vor allem flexible Verpackungen (23 Gew.-%, Tüten, Beutel und Folien) eingesetzt (Abbildung 2), gefolgt von Schalen (16,6%) und Flüssigkeitskartons (14,9%). Produkte, welche der erweiterten Pfandpflicht unterliegen, werden in den Kategorien Dosen (14,7%) und Flaschen (10,5%) gefunden. Bei den Füllgütern sind lediglich 32,8% keine Lebensmittel. Die Lebensmittel sind überwiegend Milch und Milchprodukte (17,7%), Obst und Gemüse (8,5%) und Fertiggerichte (6,9%). Verpackungen für Getränke sind zu lediglich 4,6% vorhanden. Eine Kombination beider Informationen zeigt, dass etwa 1,5% der Flaschen Produkte beinhalten, welche der erweiterten Pfandpflicht unterliegen und Dosen 0,4%. Der Anteil der

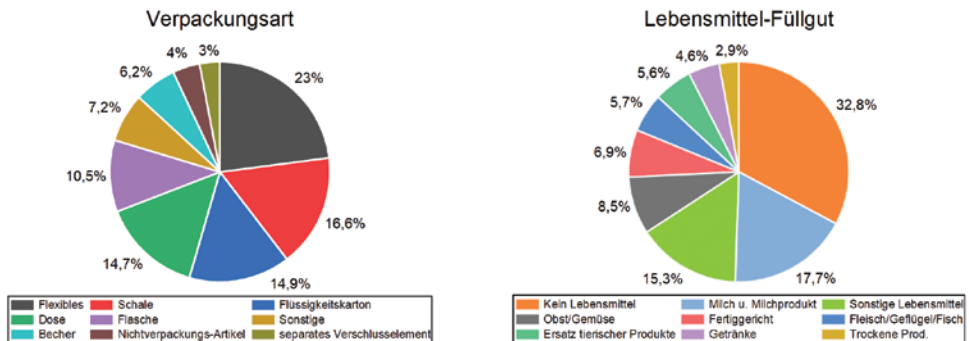


Abbildung 2: Verpackungsart (links) und Lebensmittel-Füllgut (rechts) (Angaben in Gew.-%)

Produkte in der Verpackungsstudie 2024, welche demnach potenziell bepfandet werden müssen, beläuft sich auf 1,9%.

Im Vergleich hierzu zeigte die Verpackungsstudie 2019 einen Anteil von 4,6% zukünftig pfandpflichtigen Produkten [9]. Dies ist eine Reduktion von 2,7 Prozentpunkten bzw. 58,7%. Ein näherer Blick in die Produkte, welche weiterhin über die LVP-Route entsorgt werden, zeigt, dass dies vor allem Getränkeflaschen mit außerdeutschem Ursprung sind.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Verpackungsstudie 2024 haben 277 Haushalte, die nach Sammelsystem, Haushalts- und Gemeindegröße ausgewählt wurden, an der haushaltsnahen Erfassung von LVP-Abfällen teilgenommen. In diesem Beitrag werden die vorläufigen Ergebnisse der Tiefencharakterisierung nach den ersten 100 ausgewerteten Haushalten vorgestellt. Kunststoffe sind mit ca. 51% der am häufigsten verwendete Werkstoff, und flexible Verpackungen (23%) sind vor Schalen (16,6%) und Getränkekartons (14,9%) die am häufigsten verwendete Verpackungsart. Auf Basis der Verpackungsart und des Füllguts wurden 1,9% potenziell pfandpflichtige Verpackungen identifiziert, was einer Reduktion von 2,7 Prozentpunkten im Vergleich zur Verpackungsstudie 2019 entspricht. Neben der Quantifizierung des Pfandpotenzials wird ein weiterer Schwerpunkt der Auswertungen auf der Bewertung der Recyclingfähigkeit von Verkaufsverpackungen liegen. Darüber hinaus werden die Abfalldaten in Kombination mit soziodemografischen Daten ausgewertet.

Danksagung

Der überwiegende Teil der hier vorgestellten Ergebnisse wurde durch eine Förderung des Forschungsvorhabens „präziSort – Entwicklung und Errichtung einer Pilotanlage mit integraler Detektion zur präzisen Einzelstreckensortierung von Kunststoffabfall und anderen Materialien“ durch das Land Baden-Württemberg (Förderlinie BW Invest, Fkz. BW1_2087/02) ermöglicht. Ein besonderer Dank gilt allen Studienteilnehmern sowie den zahlreichen studentischen Hilfskräften, die maßgeblich an der Charakterisierung beteiligt waren.

Literatur/Quellen

- [1] Umweltbundesamt (2024): Verpackungsabfälle. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/verpackungsabfaelle>. Abgerufen am 30.09.2024.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2017): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (VerpackG).
- [3] Conversio Market & Strategy GmbH (2024): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 - Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen, Mainaschaff, Germany.
- [4] Cayé, N, Marasus, S, Schüler, K (2023): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2021.
- [5] Destatis (2024): Aufkommen an Haushaltsabfällen: Deutschland, Jahre, Abfallarten. <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/table/32121-0001>. Abgerufen am 08.01.2025.
- [6] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2023): Ab

2024 gilt Pfandpflicht auch für Milch und Milcherzeugnisse in Flaschen aus Einwegplastik.

- [7] Deutsche Pfandsystem GmbH (2023): Ausweitung der Pfandpflicht ab dem 1. Januar 2024. <https://dpg-pfandsystem.de/index.php/de/das-einwegpfandsystem/wissenswertes/104-gesetzes-aenderungen/344-ausweitung-pfandpflicht-januar-2024.html>. Abgerufen am 27.12.2024.
- [8] Schmidt, J, Auer, M, Maletz, R, Galler, V, Woidasky, J (2024): Consumer influence on lightweight packaging waste generation in Germany. Cleaner and Responsible Consumption, 12:100185.
- [9] Woidasky, J, Schmidt, J, Auer, M (2023): Technologiesprünge beim Kunststoffrecycling!? In: Stegmann, R, et al. (Hrsg), Deponietechnik 2023. 13. Hamburger Abfallwirtschaftstage.

Kontakt

M.Sc., Maximilian Auer, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Hochschule Pforzheim, Fakultät für Technik, Arbeitsgruppe Nachhaltige Produktentwicklung

Tel.-Nr. +49-7231-28-6385

E-Mail: maximilian.auer@hs-pforzheim.de

Kurz- und mittelfristige Effekte von Maßnahmen zur Steigerung der Getrenntsammlung von Bioabfällen in Kasseler Geschosswohnungsbauten hinsichtlich Menge und Zusammensetzung

Abstract: Um Bioabfälle hochwertig verwerten zu können, ist ihre Getrenntsammlung sowohl in Hinblick auf eine möglichst hohe Mengenerfassung als auch hinsichtlich möglichst geringer Fremdstoffgehalte unabdingbar. Ziel der vorliegenden Studie war es, das Bioabfalltrennverhalten der Bewohnerinnen und Bewohner dreier ausgewählter Geschosswohnungsbauten durch die Umsetzung eines gezielten Maßnahmenpakets (persönliche Abfallberatung sowie Ausgabe von Vorsortiergefäßen, Papierbeuteln, Infobroschüren) zu verbessern sowie kurz- und mittelfristige Effekte des Maßnahmenpakets im Rahmen von acht Abfallcharakterisierungskampagnen über einen Zeitraum von ca. einem Jahr zu monitoren. An allen drei Standorten wurde nach Umsetzung des Maßnahmenpakets eine Steigerung der Menge getrennt erfasster Bioabfälle festgestellt. Hinsichtlich des Fremdstoffgehalts zeigten sich in Abhängigkeit der Ausgangssituation unterschiedliche Auswirkungen, wobei abnehmende Fremdstoffgehalte im Bioabfall insbesondere auf ein verstärktes Gefühl der Kontrolle zurückgeführt werden. Auf Basis der Ergebnisse und Beobachtungen der Studie empfiehlt es sich daher, engagierte Hausbewohnerinnen und Hausbewohner bei der Öffentlichkeitsarbeit einzubeziehen, um die soziale Kontrolle an Orten mit vergleichsweise schlechtem Abfalltrennverhalten dauerhaft aufrechtzuerhalten.

1 Einleitung

Aus den Ergebnissen zahlreicher Abfallcharakterisierungskampagnen wird ersichtlich, dass Geschosswohnungsbauten üblicherweise eine schlechtere Bioabfallqualität aufweisen als Ein- und Zweifamilienhäuser (vgl. Kern et al. 2018; Schmidt et al. 2022; Siepenkothen und Neumann 2017). Dadurch wird eine stoffstromspezifische Verwertung biogener Abfälle bzw. die Einhaltung von Grenzwerten für die Nutzung von Gärresten und Komposten erschwert oder sogar verhindert. In diversen Feldversuchen wurde daher bereits versucht, etwa durch Maßnahmen zur Erhöhung von Hygiene und Komfort die Erfassung von Bioabfällen hinsichtlich Menge und Fremdstoffgehalt zu verbessern (vgl. Gröll et al. 2015; Kanthak und Söling 2012; Santjer et al. 2022). Der Fokus der Studien lag dabei jedoch nicht vorrangig auf Geschosswohnungsbauten und/oder Effekte auf die Getrenntsammlung von Bioabfällen wurden nur über einen kurzen Zeitraum nach Maßnahmenumsetzung und teilweise nur qualitativ bestimmt. Das Ziel dieser Studie war deshalb, ein gezieltes Maßnahmenpaket zur Steigerung der Getrenntsammlung von Bioabfällen in ausgewählten Ge-

schosswohnungsbauten umzusetzen und durch wiederkehrende Abfallcharakterisierungskampagnen über einen Zeitraum von ca. einem Jahr sowohl kurz- als auch mittelfristige Effekte des Maßnahmenpakets zu evaluieren.

2 Methodik

In Kooperation mit den Stadtreinigern Kassel wurden drei Geschosswohnungsbauten im Stadtgebiet ausgewählt (Standorte A, B, C) und ein entsprechendes Maßnahmenpaket entwickelt. Dieses umfasste die Ausgabe eines Vorsortiergefäßes inklusive passender Papierbeutel und eine Infobroschüre der Stadtreiniger Kassel mit Hinweisen zur korrekten Abfalltrennung sowie eine persönliche Abfallberatung der Haushalte. Nach der Hälfte des Untersuchungszeitraums wurden erneut Papierbeutel an alle Haushalte ausgegeben. Das Monitoring der Effekte erfolgte in Form von Abfallcharakterisierungskampagnen im Einklang mit gängigen Sortierrichtlinien (BGK 2018; LfULG 2016), die sowohl vor Umsetzung des Maßnahmenpakets (Nullanalyse) als auch in unterschiedlichen Abständen danach stattfanden (vgl. Abbildung 1). Um eine potenzielle Stoffstromverschiebung feststellen zu können, wurden neben den Bioabfällen auch die Restabfälle der ausgewählten Standorte charakterisiert, woraus über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg im Rahmen von acht Abfallcharakterisierungskampagnen ein zu sortierendes Behältervolumen von ca. 62 m³ resultierte. Am Ende des Untersuchungszeitraums steht eine statistische Auswertung der gewonnenen Daten. Diese sollen zudem mit den Ergebnissen zweier Umfragen zum Abfalltrennverhalten verknüpft werden, die vor der ersten (Nullanalyse) sowie nach der letzten Abfallcharakterisierungskampagne an den Standorten durchgeführt wurden bzw. werden (Durchführung der zweiten Umfrage im Frühjahr 2025), um das Verhältnis zwischen berichtetem und tatsächlichem Abfalltrennverhalten zu untersuchen.

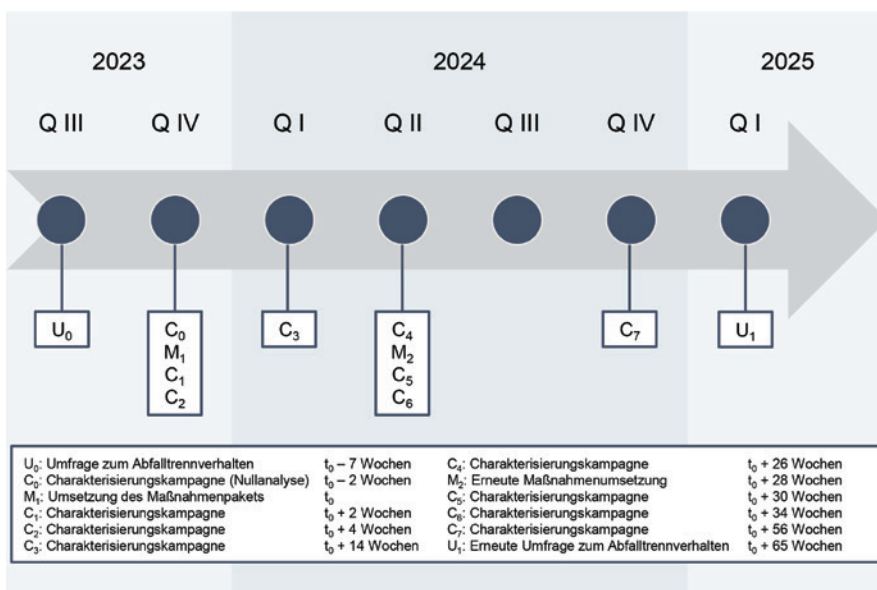


Abbildung 1: Zeitlicher Ablauf der Studie

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass es an Standort A nach Umsetzung des Maßnahmenpakets zu einer eindeutigen Zunahme der über die Biotonne erfassten Bioabfälle bei gleichzeitiger Abnahme der über die Restmülltonne erfassten Bioabfälle kam. Wurden zu Beginn des Untersuchungszeitraums noch ca. 1,8 kg bzw. 1,4 kg Bioabfälle pro Wohneinheit über die Bio- bzw. Restmülltonne erfasst, so lagen zwischenzeitlich (nach erneuter Maßnahmenumsetzung, vgl. Abbildung 2) ca. 3,6 kg bzw. 0,4 kg Bioabfälle pro Wohneinheit in der Bio- bzw. Restmülltonne vor. Bei anfänglich hohem Fremdstoffgehalt (10 %) in der Biotonne konnte dort zudem unmittelbar nach erster Maßnahmenumsetzung eine Reduzierung auf 3 – 4 % beobachtet werden. Im weiteren Verlauf nahm der Fremdstoffgehalt jedoch wieder zu (7 – 16 %). Es zeigte sich, dass die ursprünglich häufig zur Sammlung verwendeten Kunststoffbeutel teilweise durch die ausgegebenen Papierbeutel ersetzt wurden, jedoch der Anteil von in Kunststoffbeuteln gesammelten Bioabfällen im weiteren Verlauf wieder deutlich zunahm. Das deutet darauf hin, dass keine Bereitschaft bestand, nach dem Verbrauch der ausgegebenen Papierbeutel solche erneut zu erwerben. Möglicherweise lag außerdem zu Beginn des Untersuchungszeitraums durch die Umsetzung des Maßnahmenpakets ein verstärktes Gefühl der Kontrolle des Trennverhaltens vor, das mit fortschreitendem Verlauf wieder abnahm.

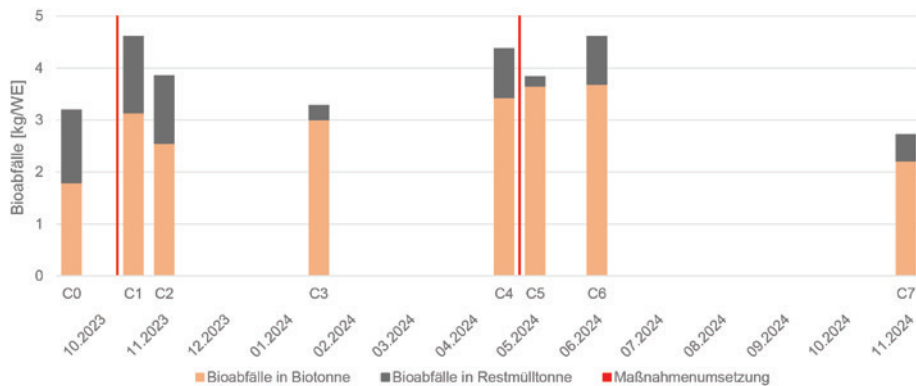


Abbildung 2: Bioabfallmenge pro Wohneinheit (WE) an Standort A, zwei-wöchentlich gesammelt über Bio- und Restmülltonne

An Standort B und C kam es ebenfalls zu einer Steigerung der über die Biotonne erfassten Bioabfallmengen (von 3,1 kg auf durchschnittlich 4,9 kg bzw. von 1,1 kg auf durchschnittlich 1,9 kg pro Wohneinheit), die jedoch bei annähernd gleichbleibender Erfassung von Bioabfällen über die Restmülltonne (ca. 1,0 kg bzw. 0,7 kg pro Wohneinheit) geringer ausfiel als bei Standort A. An Standort B, wo im Rahmen der Nullanalyse bereits ein niedriger Fremdstoffgehalt festgestellt wurde (3 %), blieb dieser über den gesamten Untersuchungszeitraum auf einem ähnlichen Niveau (1 – 4 %). Wie sich herausstellte, erfolgte an dieser Adresse eine hausinterne Kontrolle der Abfallqualitäten durch einen Hausbewohner, der beispielsweise im Hausflur durch ausgehängte Fotografien auf Fehlwürfe im Bioabfall aufmerksam machte. An Standort C hingegen wurden über den Untersuchungszeitraum schwankende Fremdstoffgehalte in der Biotonne festgestellt, die daraus resultierten, dass aufgrund der dort insgesamt geringen separat erfassten Bioabfallmengen bereits geringe Mengen an Fehlwürfen einen starken Effekt auf den ermittelten Fremdstoffgehalt hatten.

Ähnlich wie in vorangegangenen Studien (vgl. Gröll et al. 2015; Kanthak und Söling 2012) wurde nach Einführung des Maßnahmenpakets eine Mengensteigerung im Hinblick auf die über die Biotonne gesammelten Abfälle festgestellt. Während Gröll et al. (2015) sowie Kanthak und Söling (2012) jedoch biologisch abbaubare Kunststoffbeutel ausgaben, durch deren Nutzung nach Aussage der Autoren vor allem herkömmliche Kunststoffbeutel verdrängt und dadurch Fremdstoffgehalte im Bioabfall reduziert wurden, konnte ein vergleichbarer Effekt der Substitution von Kunststoffbeuteln durch Papierbeutel im Rahmen dieser Studie nicht (dauerhaft) beobachtet werden. Dies deckt sich mit den qualitativen Bewertungen von Santjer et al. (2022), die durch die Ausgabe von Papierbeuteln ebenfalls keine Abnahme des Fremdstoffgehalts im Bioabfall von Geschosswohnungsbauten feststellen konnten.

4 Fazit

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass das entwickelte Maßnahmenpaket in erster Linie dazu geeignet war, eine Steigerung der Menge getrennt gesammelter Bioabfälle zu erzielen. Hinsichtlich der Reduzierung des Fremdstoffgehalts indizieren die Ergebnisse, dass sich insbesondere ein verstärktes Gefühl der Kontrolle des Trennverhaltens positiv auswirkt. Um dieses jedoch dauerhaft aufrechtzuerhalten, kann die Einbeziehung sogenannter Multiplikatoren, wie z.B. engagierte Hausbewohner und -bewohnerinnen, ein wirksames Instrument sein.

Literatur/Quellen

- BGK (2018): Gebietsanalyse. Bestimmung der Sortenreinheit von Biogut eines Entsorgungsgebiets. Methodenvorschrift. Hg. v. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. Köln.
- Gröll, K.; Kern, M.; Turk, T.; Werner, J. (2015): Praxisversuch mit kompostierbaren Biobeuteln. Optimierung der Erfassung von Küchen- und Nahrungsabfällen in der Stadt Vellmar, Landkreis Kassel. In: Müll und Abfall (6). <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2015.06.04>
- Kanthak, M.; Söling, F. (2012): Bewertung des Einsatzes von kompostierbaren Sammelbeuteln aus ecovio®-Material. In: Müll und Abfall (8). <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2012.08.04>
- Kern, M.; Siepenkothen, H.-J.; Neumann, F. (2018): Sortenreinheit von Bioabfällen. Datenerhebung am Beispiel zweier öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger in Baden-Württemberg. Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Witzenhausen. Hg. v. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg und Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. Karlsruhe, Köln.
- LFULG (2016): Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen. Sächsische Sortierrichtlinie 2014. Mit Ergänzung zur Identifikation von Lebensmittelabfällen. 2. Aufl. Hg. v. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden.
- Santjer, M.; Hannes, L.; Becker, G. (2022): Wissenschaftliche Begleitung bei der Planung und Durchführung eines Pilotprojekts im Bereich von Großwohnanlagen zur Verbesserung der Qualität der erfassten Bioabfälle und zur Reduzierung des Kunststoffanteils. Endbericht. Institut für Abfall, Abwasser und Infrastruktur-Management GmbH (INFA), Ahlen, im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden.
- Schmidt, S.; Döbel, J.; Dürl, G.; Laner, D. (2022): Analyse der Kasseler Abfallströme aus Haushalten (ANKAH): Status Quo und Optimierungspotenziale in Bezug auf Sammlung, Behandlung und Verwertung. Unveröffentlicht. Universität Kassel, Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik. Kassel.

Siepenkothen, H.-J.; Neumann, F. (2017): Bio- und Restabfallanalyse im Kreis Schleswig-Flensburg. Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Witzenhausen, im Auftrag der Abfallwirtschaft Schleswig-Flensburg GmbH, Schleswig.

Kontakt

Konstantin Bachmann, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter

Universität Kassel, Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik

Tel.-Nr.: +49-561 804-7745

E-Mail: k.bachmann@uni-kassel.de

Homepage: www.uni-kassel.de/go/RMAT/

Charakterisierung von Nichtverpackungskunststoffen in ausgewählten Abfallströmen und deren Potential für eine getrennte Sammlung

Abstract: Nichtverpackungskunststoffe sind im täglichen Leben allgegenwärtig von der Zahnbürste, über Aufbewahrungsboxen bis zu Autobestandteilen. Dabei setzen sich diese Gegenstände unter anderem aus mehreren unterschiedlichen Polymeren gleichzeitig zusammen, was hinderlich für einen darauffolgenden Recyclingprozess ist. Ziel dieser Arbeit ist die Charakterisierung von Nichtverpackungskunststoff (NVPK) – Abfällen aus dem gemischten Siedlungsabfall in Hinblick auf dessen Recyclingfähigkeit. Des Weiteren wird der Beitrag einer getrennten Sammlung von NVPK in der getrennten Leichtverpackungssammlung zur Erhöhung der österreichischen Siedlungsabfallrecyclingquote analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Beitrag mit weit unter einem Prozentpunkt eher gering ist und anderweitige Sammelwege zu empfehlen wären, um das Potential im NVPK-Abfallstrom zu nutzen.

1 Einleitung

In der EU sind rund 60 % des jährlichen Kunststoffbedarfes auf Nichtverpackungskunststoffe (NVPK) wie Spielzeuge oder Zahnbürsten zurückzuführen (Plastics Europe 2022). Sie tragen jedoch nur zu 40 % des EU-weiten Kunststoffabfallaufkommens bei (Plastics Europe 2022), was auf zahlreiche NVPK-Anwendungsbereiche (Bau- und Konstruktion, Transport, Haushaltsprodukte) und deren diverse Nutzungsdauern zurückzuführen ist (Klevnäs und Peter 2021). Ebenso beeinflussen die unterschiedlichen Anwendungsbereiche die Polymerzusammensetzung der NVPK, was zu Herausforderungen beim Recycling aufgrund des Einsatzes multipler oder technischer Polymere führt (Castell-Rüdenhausen et al. 2022). Im Vergleich zu den Verpackungen, bei welchen bis 2030 spezifische Sammel- und Recyclingziele vorgesehen sind (EPR 2018), fallen NVPK nur unter die Siedlungsabfallrecyclingrate von 65 % bis 2030 (EPR 2008). Österreich erreichte mit Stand 2020 eine Recyclingrate von 62,3 % (BMK 2023). In Österreich fallen Stand 2020 pro Jahr rund 200.000 t NVPK-Abfälle in unterschiedlichen Abfallströmen wie in Baustellenabfällen, im Gewerbemüll und Sperrmüll an, wobei ein bedeutender Anteil (57.000 t) über den gemischten Siedlungsabfall aus kommunaler Sammlung (Restmüll) entsorgt wird (Bernhardt et al. 2022). Da dieser in Österreich vorwiegend thermisch verwertet wird, gehen die NVPK für eine stoffliche Verwertung verloren (BMK 2023). Mit Einführung des österreichweiten Einwegpfandes für Kunststoffgetränkeflaschen und Aluminium-Getränkedosen 2025 könnten jedoch Sammelkapazitäten in der getrennten Leichtverpackungs (LVP)-Sammlung frei werden (Hauer et al. 2020). Die vorliegende Arbeit untersucht daher, wie eine getrennte Sammlung von NVPK innerhalb der LVP-Sammlung in Österreich sowie deren anschließende stoffliche Verwertung zur Erreichung des EU-Siedlungsabfall-Recyclingziels beitragen können.

2 Methodik

Die Proben dieser Untersuchung stammen aus der Wiener Restmüll- und Altstoffanalyse 2022, hierbei wurden 3,7 t an Restmüll und rund 1,4 t aus der LVP-Sammlung (zum Analysezeitpunkt gemischte Sammlung aus Kunststoffflaschen, Getränkeverbundkartons und Metallen) mittels technischen Leitfadens (TA Sortieranalen 2021) beprobt und analysiert. Im Zuge dieser Arbeit wurden insgesamt 29 kg an NVPK aus dem Restmüll und 37 kg aus der LVP-Sammlung nach den folgenden Kriterien charakterisiert:

- Zuordnung zu den Anwendungsbereichen Bau- und Konstruktion, Transport, Elektronik, Möbel, Landwirtschaft und Gärtnern, Medizin, Haushalt, Sonstiges.
- Vorhandensein von Recyclingcodes zur Polymerbestimmung. Bei fehlendem Recyclingcode wurde das Polymer des jeweiligen Gegenstandes mittels Fourier-Transformations-Infrarot (FTIR) Analyse erhoben.
- Vorhandensein von multiplen Polymeren, Elastomeren und Metallanteilen.
- Färbung des Gegenstandes.

3 Ergebnisse und Diskussion

In beiden Abfallströmen überwiegen bei der Hauptpolymerzusammensetzung Polypropylen (PP) und Other-Polymere, wobei der PP-Anteil in der LVP-Sammlung höher liegt als im Restmüll (siehe Abb. 1). Umgelegt auf die Anwendungsbereiche lassen sich im Restmüll mehr als 50 % und in der LVP-Sammlung mehr als 70 % der NVPK den Bereichen Haushalt und Sonstiges zuordnen, bestehend aus Freizeitartikeln (v.a. Spielzeug), Büroartikeln, Trinkflaschen, Küchenutensilien oder Eimern.

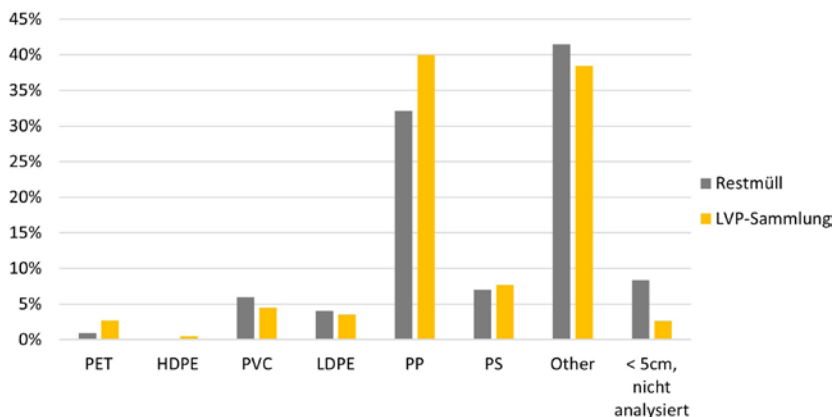


Abbildung 1: Hauptpolymerverteilung der untersuchten NVPK aus Restmüll und getrennter LVP-Sammlung.

Die Fraktion < 5cm wurde nicht auf ihre Polymerzusammensetzung analysiert.

Prozente berechnet aus der Masse m der analysierten NVPK: m (RM) = 29 kg, m (LVP) = 37 kg

Umgelegt auf ganz Österreich findet sich ein Potential von rund 13.800 t an NVPK mit den Hauptpolymeren PET, HDPE, LDPE, PP und PS im Restmüll, welche Zielfractionen in österreichischen Kunststoffsortieranlagen darstellen (Neubauer et al. 2021). Bei einer stofflichen Verwertung dieser Mengen würde sich

die österreichische Siedlungsabfallrecyclingrate um 0,19 Prozentpunkte erhöhen. Die untersuchten NVPK-Abfälle weisen jedoch auch Polymere auf, die keine Zielfraktion darstellen sowie andere für ein Recycling nachteilige Charakteristika (Färbung, Elastomer-Anteil, multiple Polymere). Eine jährliche Menge von rund 1.950 t an NVPK im Restmüll weisen ideal recyclingfähige Eigenschaften auf, führen jedoch nur zu einer Steigerung der Siedlungsabfallrecyclingrate um 0,03 Prozentpunkte.

4 Fazit

Eine Sammlung und Verwertung der NVPK in der getrennten LVP-Sammlung Österreichs leistet insgesamt nur einen geringen Beitrag zur Erreichung des Siedlungsabfallrecyclingziels, da ein großer Anteil sich aus Other-Polymeren wie technischen Kunststoffen zusammensetzt, welche derzeit keine Zielfraktion in Kunststoffsortieranlagen darstellen. Weiters handelt es sich bei den NVPK um einen sehr heterogenen Abfallstrom, wodurch eine klare Bewerbung dieser Fraktion auf den LVP-Sammeltonnen eine Herausforderung darstellen würde. Stattdessen wäre eine vermehrte getrennte Erfassung von NVPK über Altstoffsammelzentren zu empfehlen, da noch keine bundesweite Sammlung dieser existiert (Bernhardt et al. 2022). Dadurch könnten auch technische Kunststoffe zurückgewonnen, sowie der Anteil an NVPK im Sperrmüll reduziert werden, was einen positiven Einfluss auf die österreichische Siedlungsabfallrecyclingrate hätte. Zum besseren Verständnis des sehr diversen NVPK-Abfallstromes sind weitere Analysen, beispielsweise von NVPK im Sperrmüll zu empfehlen, um das vorhandene Recyclingpotential besser darstellen zu können.

Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Weiters bedanken wir uns sehr herzlich für die finanzielle und inhaltliche Unterstützung durch unsere Unternehmenspartner, in alphabetischer Reihenfolge: Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoff Recycling Austria AG, Brantner Österreich GmbH, Holding Graz – Kommunale Dienstleistungen GmbH, Lenzing Aktiengesellschaft, Linz Service GmbH, MM Board & Paper, Wien Energie GmbH, und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H. Weiterer Dank gilt der Magistratsabteilung Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien (MA48) für die Zurverfügungstellung der Proben. Dieses Projekt entstand unter der finanziellen Unterstützung des BlueSkyResearch Funds der TU Wien. Die vorliegenden Daten wurden im Zuge einer Masterarbeit am Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft an der Universität für Bodenkultur Wien erarbeitet.

Literatur/Quellen

Bernhardt, A.; Kral, U.; Neubauer, C.; Judith, O.; Stoifl, B.; Walter, B. (2022): Ausgewählte Kunststoffströme. Sammlung, Aufkommen und Behandlung sowie relevante EU-Regelungen für Einweggeschirr und -besteck, Altreifen, Hartkunststoffe, Kunststofffolien und Agrarfolien: Materialien zum Bundes-Abfallwirtschaftsplan. Wien (Report / Umweltbundesamt, REP-0749). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0749.pdf>, zuletzt geprüft am 08.01.2025.

- BMK (2023): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023. Teil 1. Hg. v. Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Wien. Online verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/bundes_awp/bawp2023.html, zuletzt geprüft am 08.01.2025.
- Castell-Rüdenhausen, M. zu; Almasi, A.; Vanderreydt, I. (2022): Non-packaging plastics in Europe. EEA (ETC-CE Report 2022/7). Online verfügbar unter https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-ce/products/etc-ce-products/etc-ce-report-2022-7-non-packaging-plastics-in-europe/@@download/file/ETC%20Report_NPP_CLEAN.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2025.
- EPR (2008): RICHTLINIE 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. AbfallrahmenRL, vom 18.02.2024. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098>, zuletzt geprüft am 08.01.2025.
- EPR (2018): Richtlinie (EU) 2018/ des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0852>, zuletzt geprüft am 08.01.2025.
- Hauer, W.; Merstallinger, M.; Allesch, A.; Beigl, P.; Happenhofer, A.; Huber-Humer, M.; Obersteiner, G. (2020): MÖGLICHKEITEN ZUR UMSETZUNG DER EU-VORGABEN BETREFFEND GETRÄNKEGEBINDE, PFANDSYSTEME UND MEHRWEG. Im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Endbericht. Wien. Online verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:318b37eb-9f90-4240-a0c4-fcaa4248dea8/BMK_Studie_Getraenkegebinde.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2025.
- Klevnäs, P.; Peter, F. (2021): Europe's Missing Plastics. Taking Stock of EU Plastics Circularity. Hg. v. Material Economics. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Partnerpublikationen/2021/Material_Economics_Europes_Missing_Plastics/Material_Economics_Europes_Missing_Plastics.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2025.
- Neubauer, C.; Stoifl, B.; Tesar, M.; Thaler, P. (2021): Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich. Status 2019. 2. korrigierte Auflage. Wien (Report / Umweltbundesamt, REP-0744), zuletzt geprüft am 08.01.2025.
- Plastics Europe (2022): THE CIRCULAR ECONOMY FOR PLASTICS. A European Overview. Brüssel. Online verfügbar unter https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2022/06/PlasticsEurope-Circularity-Report-2022_2804-Light.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2025.
- TA Sortieranaylisen (2021): Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranaylisen. Hg. v. BMK. Online verfügbar unter https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H81000/H81300/upload-files/Forschung/Leitfaden_Restmuell-Sortieranaylisen_Adaptierung_Okt.2021_1.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2025.

Kontakt

Dipl. Ing.in, Gisela Breslmayer, Projektassistentin

TU Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften

CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft

Tel.-Nr. +43 1 58801 166133

E-Mail: gisela.breslmayer@tuwien.ac.at

Homepage: <https://www.tuwien.at/tch/icebe/e166-01/cd-labor-kreislaufwirtschaft>

Chemisches Recycling von abfallstämmigen Matratzenschaum durch Pyrolyse

Abstract: In Deutschland fallen jährlich etwa 5 Millionen m³ Matratzen zur Entsorgung an, die überwiegend durch Verbrennung energetisch verwertet werden (Umweltbundesamt, 2020). Diese Praxis führt zu einem erheblichen Verlust wertvoller Rohstoffe und birgt ökologische Herausforderungen. Das Projekt REFOAM „Recycling of Waste-Derived Mattresses Foam through Sensor-Based Characterization and Pyrolysis“ zielt darauf ab, das Potenzial der Ressourcenrückgewinnung aus latexhaltigen Matratzenschaumabfällen zu nutzen. Durch sensorbasierte Charakterisierung und Sortierung sollen die Schaummaterialien separiert werden, um wertvolle Rohstoffe durch chemisches Recycling zurückzugewinnen. Der aufbereitete latexhaltige Matratzenschaum wird agglomeriert oder pelletiert, um die Effizienz der anschließenden Pyrolyse zu erhöhen. Bei der Pyrolyse entstehen flüchtige Verbindungen, aus denen durch Kondensation Pyrolyseöl gewonnen werden kann. Die chemische Zusammensetzung des Öls sowie der festen Rückstände sollen analysiert werden. Ziel des Projekts ist es, einen Aufbereitungsprozess vom halbtechnischen Maßstab bis hin zu einer Demonstrationsanlage im industriellen Maßstab zu entwickeln und eine nachhaltige Ressourcennutzung zu fördern sowie verfahrenstechnische Erfahrungen für das Recycling anderer latexhaltiger Abfälle zu gewinnen.

1 Einleitung

Das Recycling von Latex-Matratzenschäumen ist gegenwärtig nicht im industriellen Maßstab etabliert. Die steigenden Recyclingquoten für Siedlungsabfälle in der EU erfordern jedoch ein Umdenken hin zur stofflichen Nutzung und das Ende der rein energetischen Verwertung im Sinne einer verbesserten Ressourcennutzung (EEA, 2018). Aktuell werden in der EU etwa 45 % der Matratzenabfälle deponiert und 35 % thermisch verwertet (Umweltbundesamt, 2022). In Deutschland fallen jährlich rund 8,27 Millionen Altmatratzen an. Bei einer Annahme von 20 kg pro Matratze führt dies zu etwa 165.400 Tonnen Matratzenabfällen, darunter etwa 16.540 Tonnen Latexmatratzenschaum (Umweltbundesamt, 2022). Interessant unter den Latexschaummaterialien ist das Copolymer Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR), welches mit Schwefel vulkanisiert wird (Garrido et al., 2017). Die Machbarkeit eines werkstofflichen Recyclings dieses Materials ist derzeit aufgrund verschiedener Faktoren, wie der chemischen Struktur, Verunreinigungen und dem Einsatz als Verbundwerkstoff, fraglich (Zanchet und Sousa, 2020). Eine Alternative zur thermischen Verwertung wäre die rohstoffliche Nutzung mit dem Ziel, Primärrohstoffe im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zu ersetzen. Zukünftig könnte die pyrolytische Behandlung eine Möglichkeit darstellen, SBR-haltige Abfälle zu recyceln. Bei

diesem Prozess wird das Material in einer inertisierten Atmosphäre so weit erhitzt, dass die Polymerketten durch Wärme fragmentiert werden. Flüchtige Komponenten gelangen in die Gasphase und enthalten neben Permanentgasen auch bei Raumtemperatur kondensierbare Kohlenwasserstoffe mit ölig bis wachsartiger Konsistenz. Optimierte Prozessführung und zusätzliche Aufbereitungsschritte könnten Pyrolysekondensate wieder in die Wertstoffkette integrieren und so durch die Wiederverwertung von Matratzenschaum, die Substitution fossiler Rohstoffe sowie eine zirkuläre Wertschöpfung ermöglichen.

2 Projektplan

Das Projekt REFOAM hat das Ziel, die thermochemischen Recyclingprozesse von Matratzen-Schaumstoffen weiterzuentwickeln und für industrielle Anwendungen nutzbar zu machen. Geplant ist, die Technologie zur sensorbasierten Sortierung weiterzuentwickeln, dies soll am Lehrstuhl für Anthropogene Stoffkreisläufe der RWTH durchgeführt werden. Anschließend soll das chemische Recycling von Latex-Schaum am Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft der RWTH validiert werden. In Abbildung 1 ist das geplante Vorgehen des Projektes abgebildet.

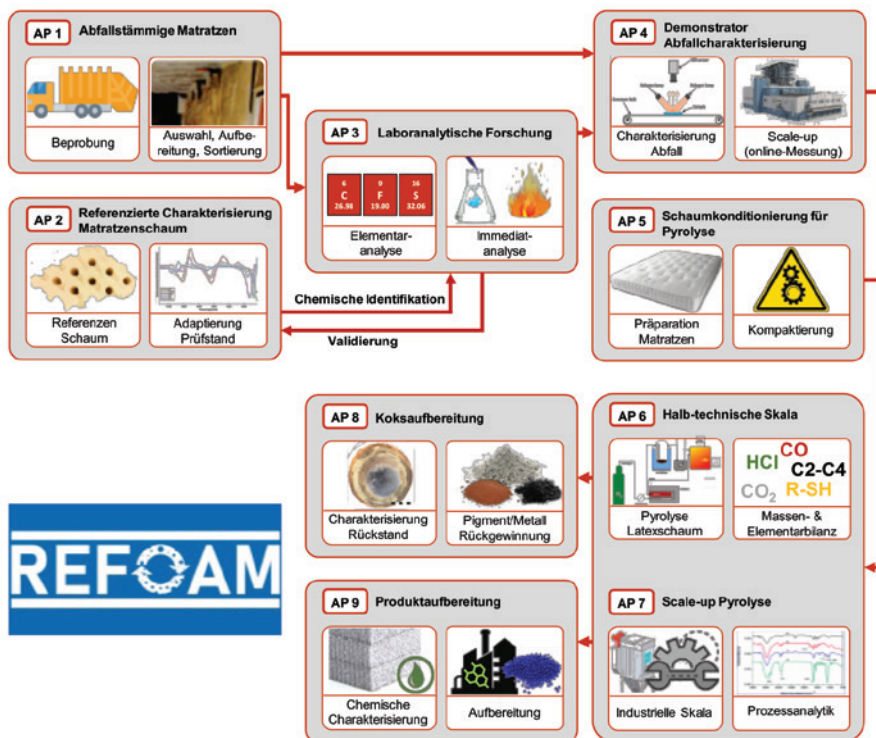


Abbildung 1 Projektstruktur von REFOAM für die sensorbasierte Sortierung und das chemische Recycling von Matratzen-Schaumstoffen.

Im Rahmen des Projekts werden regelmäßig Probenahmen aus abfallstämmigen Matratzen durchgeführt, um geeignete Abfallströme zu identifizieren. Ziel ist es, die unterschiedlichen Materialzusammensetzungen zu analysieren und deren Recyclingpotenzial zu bewerten. Parallel dazu sollen Grundlagen für die NIR-basierte Schaumidentifikation gelegt werden, um eine präzise Sortierung der Materialien zu ermöglichen. Umfassende chemische Analysen der abfallbasierten Schaumstoffe sind vorgesehen, um deren Eigenschaften besser zu verstehen und die Qualität der Rückgewinnung sicherzustellen.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts liegt auf der Entwicklung einer fortschrittlichen Sortiertechnologie, die darauf abzielt, Monomaterialien effizient zu trennen und den Verarbeitungsprozess zu optimieren. Zudem wird eine Methode zur Verdichtung des Schaums entwickelt, um das Volumen signifikant zu reduzieren und ein fehlerfreies Zuführen in den Recyclingprozess zu gewährleisten.

Des Weiteren sollen Pyrolyseversuche durchgeführt werden, um signifikante Mengen an Pyrolyseprodukten für chemische Analysen zu gewinnen. Diese Versuche sollen wichtige Erkenntnisse über die Recyclingfähigkeit der Materialien liefern.

Zusammenfassend strebt REFOAM an, nachhaltige Recyclinglösungen für Matratzen-Schaumstoffe zu entwickeln, mit dem Ziel, wertvolle Ressourcen zurückzugewinnen und den ökologischen Fußabdruck signifikant zu minimieren.

3 Thermogravimetrische Analyse

Die thermogravimetrische Analyse (TGA) ist eine analytische Methode zur Untersuchung der thermischen Eigenschaften von Materialien. Dabei wird das Gewicht einer Probe in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit gemessen, während sie einem kontrollierten Temperaturprofil ausgesetzt wird. TGA ermöglicht die Quantifizierung von Massenänderungen durch Prozesse wie Verdampfung oder thermische Zersetzung und liefert wertvolle Informationen über die thermische Stabilität sowie Erkenntnisse zur Zusammensetzung von Materialien. Diese Methode wurde eingesetzt, um Erkenntnisse über das thermische Verhalten des Materials zu gewinnen und wertvolle Informationen für ein potenzielles Upscaling zu gewinnen. Hierfür kam die Linseis STA PT1600 Thermowaage zum Einsatz, in die pro Durchgang $20,0 \pm 0,1$ mg pulverisierter abfallstämmiger Latexmatratzenschaum eingewogen wurden. Die Probe wurde in einer Stickstoffatmosphäre mit einer Aufheizrate von 10 K/min bis auf 800 °C erhitzt. Es war erkennbar, dass im Temperaturbereich zwi-

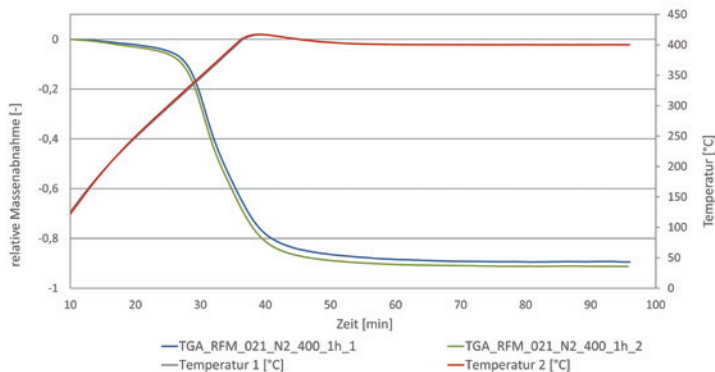


Abbildung 2 Thermogravimetrische Analyse von abfallstämmigem Latexmatratzenschaum in Stickstoffatmosphäre.

Aufheizrate: 10 K/min bis 400 °C, Haltezeit: 1 h.

schen 350 und 500 °C eine deutliche Massenabnahme stattfand. Anschließend wurden weitere Versuche durchgeführt, um ein Temperaturprofil für Pyrolyse-Versuche in einem Batch-Reaktor festzulegen. In Abbildung 2 werden Kurven der thermogravimetrischen Analyse dargestellt, aus denen mögliche Bedingungen abgelesen werden können.

Bei diesem Versuch wurde die Probe auf 400 °C in der gleichen Atmosphäre und mit der identischen Aufheizrate erhitzt und dort für eine Stunde gehalten. Unter diesen Bedingungen zeigte sich eine nahezu vollständige Massenabnahme, was auf eine effektive thermische Zersetzung des Materials unter den gewählten Bedingungen hinweist. Nach Ablauf der Analysen verblieb ein Rückstand, dessen Auftreten aufgrund der bei der Schaumstoffherstellung verwendeten Vulkanisationsaktivatoren, insbesondere Zinkoxiden und weiteren Zinksalzen, erwartet wurde. Diese Substanzen können unter den gegebenen thermischen Bedingungen nicht vollständig verdampfen.

Es konnte beobachtet werden, dass bei Temperaturen unter 400 °C auch nach einer Haltezeit von zwei Stunden keine signifikante Massenabnahme auftrat. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde eine Temperatur von 400 °C für die weiteren Versuche im Batch-Reaktor gewählt.

Auf Basis dieser Untersuchungen werden weitere Optimierungen durchgeführt, um perspektivisch eine kontinuierliche Pyrolyse zu realisieren.

Danksagung

Das Projekt *REFOAM* wird durch die Volkswagenstiftung gefördert.

Literatur/Quellen

- EEA, ohne Datum. Richtlinie (EU) 2018/ des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle.
- Garrido MA, Font R, Conesa JA, 2017. Thermochemical study of the briquetting process of mattress foams. *Fuel Processing Technology*, 159, 88–95.
- Umweltbundesamt, 2020. Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien, unveröffentlicht, 256 S.
- Umweltbundesamt, 2022. Evaluation der Erfassung und Verwertung ausgewählter Abfallströme zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft, unveröffentlicht, 445 S.
- Zanchet A, Sousa FDB de, 2020. Elastomeric Composites Containing SBR Industrial Scraps Devulcanized by Microwaves: Raw Material, Not a Trash. *Recycling*, 5 (1), 3.

Kontakt

Lara Clemens, M. Sc., Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Lehr- und Forschungsgebiet Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft

Tel.-Nr.: +49 241 80-90714

E-Mail: clemens@teer.rwth-aachen.de

Homepage: www.teer.rwth-aachen.de

Toward a Circular Battery Value Chain – A Qualitative Case Study of End-of-First-Life Strategies for Lithium-ion Batteries Stemming from Maritime Applications

Abstract: *The production and end-of-first-life (EofL) stages of traction batteries entail significant sustainability challenges, such as resource depletion, environmental and social issues in material extraction, high energy consumption and pollution during cell manufacturing, as well as landfill fires and groundwater contamination from improper disposal of retired lithium-ion batteries (LIBs). To mitigate these environmental impacts, integrating circular economy (CE) principles is essential, but their practical adoption requires considering a range of internal and external influencing factors. The case study reveals a broad spectrum of external factors, including political, regulatory, economic, and market-related aspects, as well as socio-cultural, technological, governance, and value network elements. Internal factors, examined from the perspective of a maritime battery system producer, cover resource availability, technological capabilities, and organizational and cognitive aspects. Regarding the practical manifestation of the identified influencing factors, the findings suggest that the current battery ecosystem faces more barriers than enablers. Concerning the use case of maritime batteries, their strong suitability for circular activities leads to three potential EofL strategies. The first is to manage the repurposing process in-house, the second involves a collaborative approach by outsourcing tasks like collection, gateway testing, and repurposing to specialized firms, and the third is to send the batteries directly for recycling. Each strategy comes with its own advantages, disadvantages and trade-offs that must be considered.*

1 Introduction

The global efforts to mitigate climate change by cutting down on greenhouse gas emissions and to reduce the dependence on fossil fuels has brought about a transformative process known as the energy transition. It involves moving towards more sustainable energy systems, which not only entails the widespread adoption of renewable technologies like wind and solar power plants, but also the integration of energy storage solutions such as LIBs (SAPEA 2021; Widuto 2023). Over the past two decades, LIBs have undergone remarkable development, evolving from powering portable electronics to supporting electric vehicle propulsion and the storage of intermittent renewable energy. As a result, the global LIB market has seen exponential growth, expanding from around 27 GWh in 2009 to 259 GWh in 2020, with projections anticipating 2.5 TWh by 2030 (Melin et al. 2021; Halleux 2023; Albertsen et al. 2021). Electric mobility, enabled by battery

technology, is considered a green technology and a viable strategy for the decarbonisation of transport systems due to significantly reduced carbon emissions in the use phase of the vehicle. However, the production and EoFL stages entail several sustainability issues and the risk of problem shifting (Albertsen et al. 2021; Melin et al. 2021; Giosuè et al. 2021). The LIB production process is energy intensive, polluting and requires scarce resources like lithium, cobalt, nickel, graphite and manganese, which are listed as critical raw materials for the energy transition. Additionally, the extraction and processing of these materials cause significant CO₂ emissions and are linked to multiple environmental and social issues, notably evidenced by water resource strains in lithium production and human rights violations in cobalt mining (Albertsen et al. 2021; Halleux 2023). Another sustainability challenge stems from the growing volumes of post-used LIBs that will enter the waste stream in the near future. Improper handling poses significant environmental and health hazards and if disposed in landfills, LIBs present a potential ignition source and can release toxic gases like methane as they degrade, or potentially leak harmful substances into groundwater (Melin et al. 2021; Júnior et al. 2023).

To effectively address the above-mentioned negative externalities and achieve a genuinely sustainable, carbon-neutral electrification of the mobility sector, it is crucial to incorporate CE principles into the lifecycle of high-impact products such as LIBs (Chirumalla et al. 2024; Albertsen et al. 2021). With traction batteries subject to extended producer responsibility, the lever falls on manufacturers to develop and implement sustainable EoFL strategies. However, there is no 'blue-print' solution when it comes to adopting a circular business model and while the CE framework offers guiding principles, practical implementation is influenced by a range of internal and external factors. Therefore, understanding the ecosystem in which the strategy operates is crucial for its success (Chirumalla et al. 2024; McDermott et al. 2019).

To this end, the literature suggests that CBMs should shift from a firm-centric view of value creation to a more systemic, holistic mechanism that encompasses various macroeconomic dimensions, such as political, economic, socio-cultural, technical, legal, and environmental factors – commonly referred to as PESTLE framework. Furthermore, collaboration opportunities with diverse stakeholder groups need to be explored, as they can help to overcome potential barriers and to harness the synergies provided by sustainable value networks (De Angelis 2022; Alamerew & Brissaud 2020; Prenner et al. 2023).

While some research and transdisciplinary pilot projects have explored the feasibility and potential of CE practices for traction batteries in the automotive sector, many other applications remain largely unexplored in academia. The maritime industry, for example, represents a niche market despite the rapid growth in the use of hybrid or fully electric propulsion systems for ferries, yachts and other short-range vessels (IDTechEx 2024; Mærsk Mc-Kinney Møller Center 2024). As a result, there is very limited empirical evidence on EoFL management for LIBs used in vessel propulsion, and the unique characteristics of maritime battery systems make it challenging to apply findings from the automotive sector. This master's thesis aims to fill the above-mentioned research gap by conducting in-depth qualitative research through expert interviews. The first goal is to identify internal and external factors influencing the adoption of a CVC for traction batteries, as well as to understand whether their current manifestation in the battery industry acts as a barrier or enabler for circular activities. This will enhance the contextual understanding of ongoing developments in the battery ecosystem. The second objective is to apply the findings to the specific case of maritime LIBs and assess the viability of potential EoFL strategies originally developed for batteries from land-based battery-powered electric vehicles. This part of the study will also explore collaboration opportunities with different stakeholders along the CVC to create a robust value network and thereby overcome potential barriers.

2 Methodik

2.1 Literature Review

The literature review for this study follows an unsystematic approach, allowing for the use of a snowball method to identify relevant literature by examining references from initially selected papers. It serves to develop the theoretical background and provides a foundation for the other research methods, particularly guiding the creation of the interview guidelines and formulating in-depth backup questions that address key system variables. The review includes academic research papers and peer-reviewed journal articles to map existing scientific knowledge. For specific topics, grey literature, such as industry reports and legal documents, supplements the academic search.

2.2 Stakeholder Analysis & Mapping

In this study, potential stakeholders are first identified through internet research and the professional network of the author and then organized into stakeholder groups based on their role within the CVC. After compiling all identified stakeholder into two tables, they are integrated into an exemplary CVC to visualize their involvement in the EofL stages. The stakeholder analysis serves as the basis for identifying potential interview partners, in this case, experts with specialized knowledge or experience relevant to the research topic. Categorizing and mapping stakeholders ensures that each cluster is represented by at least one actor, thereby capturing all relevant perspectives, and enhancing data quality, as well as producing more robust and reliable research outcomes.

2.3 Semi-structured Interviews

The core of the chosen methodological approach are semi-structured interviews with external industry experts for qualitative data collection. The interviews follow a loosely pre-structured guideline, which was developed in advance based on the findings from the literature review. It serves as a thematic outline and provides orientation throughout the interviews. For this study, the guide includes five key topic areas with questions designed to address the issues necessary for answering the research questions. However, the interview format remains flexible, allowing for the exploration of new topics or aspects that may emerge during the conversation. To gain a deeper understanding of the influencing factors, the author formulated in-depth backup questions tailored to each stakeholder. Since maritime battery systems are an important topic area and most interviewees are new to this field, the author prepared an information sheet with essential technical details and key differences from automotive traction batteries.

Following the identification of potential interview partners through the stakeholder analysis, a purposeful sampling approach, as outlined by Patton (2014), is used to select specific organizations from the battery ecosystem for an initial contact via email. Additionally, a battery recycling trade fair in Frankfurt provides an opportunity to reach out to potential interview partners. Ultimately, the author conducts twelve interviews, four in person at the trade fair, seven online via video calls and one via WhatsApp voice messages. These interviews take place between June and August 2024, with durations ranging from 20 to 65 minutes. All interviews are conducted in English, except for two, which are held in German and directly translated into English using the same AI software employed for transcription. To better understand the internal factors influencing the adoption of a circular business model from a manufacturer's perspective, an interview with a producer of maritime battery systems is conducted. For this interview, a tailored guideline is created to jointly discuss the

producer's internal strengths and weaknesses in implementing circular strategies for their retired systems. Each interview is audio-recorded, and the files are subsequently transcribed verbatim. The transcripts then serve as the foundation for the qualitative content analysis, as described in the next section.

2.4 Qualitative Content Analysis

Qualitative content analysis is a systematic and structured technique to analyse textual data, such as interview transcripts, and thereby identify patterns, insights and areas of contention. The process involves condensing and organizing the qualitative material into clearly defined categories, known as codes, which capture thematically related insights (Stemler 2000; Chirumalla et al. 2024). In this study, overarching codes are used to represent the main categories of influencing factors, while subcodes denote the individual factors. Previous studies often lack clear differentiation between neutral influencing factors and their specific manifestations as challenges or opportunities. Therefore, this work adopts a more rigorous approach to maintain neutrality when defining these factors, aiming to enable the strategic transformation of barriers into enablers by clearly identifying overarching factors.

The chosen software for the coding process is MAXQDA and a combination of theory-driven and data-driven approaches is applied to develop a suitable coding scheme. Initially, the scheme is constructed based on the theoretical background and the structure of the interview guideline. It is then iteratively revised and adapted after a preliminary review of the collected data, thus employing a combination of inductive and deductive coding.

Literatur/Quellen

- Alamerew, Y. A., & Brissaud, D. (2020). Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120025.
- Albertsen, L., Richter, J. L., Peck, P., Dalhammar, C., & Plepys, A. (2021). Circular business models for electric vehicle lithium-ion batteries: An analysis of current practices of vehicle manufacturers and policies in the EU. *Resources, conservation and recycling*, 172, 105658.
- Chirumalla, K., Kulkov, I., Parida, V., Dahlquist, E., Johansson, G., & Stefan, I. (2024). Enabling battery circularity: Unlocking circular business model archetypes and collaboration forms in the electric vehicle battery ecosystem. *Technological Forecasting and Social Change*, 199, 123044.
- De Angelis, R. (2022). Circular economy business models: A repertoire of theoretical relationships and a research agenda. *Circular economy and sustainability*, 2(2), 433-446.
- Giosuè, C., Marchese, D., Cavalletti, M., Isidori, R., Conti, M., Orcioni, S., ... & Stipa, P. (2021). An Exploratory Study of the Policies and Legislative Perspectives on the End-of-Life of Lithium-Ion Batteries from the Perspective of Producer Obligation. *Sustainability*, 13(20), 11154.
- Halleux, V. (2023). New EU regulatory framework for batteries: Setting sustainability requirements. Briefing EU Legislation in Progress. European Parliamentary Research Service (EPRS).
- IDTechEX (2024). Electric Boats & Ships 2024-2044. Electric ferry, electric cargo/container, electric Ro-Ro, electric cruise, electric OSV, electric tugboat, electric recreational boats by powerclass, Li-ion battery systems, electric propulsion systems, supplier primary interviews. Research Report.
- Júnior, C. A. R., Sanseverino, E. R., Gallo, P., Koch, D., Kotak, Y., Schweiger, H. G., & Zanin, H. (2023). Towards a business model for second life batteries: Barriers, opportunities, uncertainties, and technolo-

- gies. *Journal of Energy Chemistry*, 78, 507-525.
- Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping (2024). Understanding the potential of battery-powered vessels for deep-sea shipping: A pre-feasibility study.
- McDermott, S., Morwood, D., Laczko, P., Slaughter, R., Smith-Gillespie, A. (2019). Circular Business Model Innovation Toolkit. Work Package 5 of European Union's Horizon 2020 research & innovation programme.
- Melin, H. E., Rajaeifar, M. A., Ku, A. Y., Kendall, A., Harper, G., & Heidrich, O. (2021). Supplementary Materials for: Global implications of the EU battery regulation. *Science*, 373(6553), 384-387.
- Patton, M. Q. (2014). *Qualitative research & evaluation methods: Integrating theory and practice*. Sage publications.
- Prenner, S., Part, F., Jung-Wacli, S., Bordes, A., Leonhardt, R., Jandric, A., ... & Huber-Humer, M. (2023). Resolving Market Entry Barriers for Repurposed Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries.
- SAPEA. Science Advice for Policy by European Academies (Ed.) (2021). A systemic approach to the energy transition in Europe. Evidence Review Report No. 9. Berlin: SAPEA.
- Stemler, S. (2000). An overview of content analysis. *Practical assessment, research, and evaluation*. 7(1).
- Widuto, A. (2023). Energy transition in the EU. Briefing of the European Parliament. European Parliamentary Research Service (EPRS).

Kontakt

Heike Espelage, Studentin

Leuphana Universität Lüneburg

Tel.-Nr. 017697922910

E-Mail: heike.espelage@leuphana.de

Nachhaltige Nutzung von Aushubmaterialien des Tief- & Tunnelbaus mithilfe sensorgestützter Technologien

Abstract: Das NNATT-Projekt stellt eine zukunftsweisende Entwicklung im Umgang mit Tunnel- und Aushubmaterialien dar. Das Projekt bietet innovative Lösungen zur Wiederverwendung von Tunnel- und Aushubmaterialien und trägt somit zur primären Ressourcenschonung, Minimierung von Deponieauslastungen, Verkürzung von Transportwegen und Nachhaltigkeit im Bauwesen bei. Dies wird durch die Kombination von chemisch-mineralogischen und geotechnischen Analysen, einer eigens erstellten Datenbank, KI-gestützter Materialklassifikation und Datenerfassung in einer Pilotanlage sowie nachhaltiger Praktiken zur Entwicklung alternativer Baustoffe und Bodenadditive in der Landwirtschaft erreicht.

1 Einleitung

Das NNATT Projekt wurde vor dem Hintergrund der zunehmenden Bedeutung nachhaltiger Baupraktiken sowie der erheblichen Menge an Tunnel- und Aushubmaterialien, die jährlich anfallen, initiiert. Im Jahr 2021 machten Aushubmaterialien in Österreich rund 59 % des gesamten Abfallaufkommens (Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich 2023) aus, was einer Menge von 46 Millionen Tonnen entspricht (siehe Abbildung 1). 35 Millionen Tonnen werden nach (BAWP 2023) als Bodenaushubmaterial eingestuft, das nicht verunreinigt ist und dem geogenen Vorkommen entspricht. 62 % des nicht verunreinigten Bodenaushubmaterials werden deponiert (siehe Tabelle 1). Von insgesamt 1.111 Deponien in Österreich werden 932 nach Stand 2020 speziell für die Ablagerung von Bodenaushub, was einem freien Deponievolumen von 102,9 Millionen m³ entspricht, angewendet (BAWP 2023).

Eine Sache, die einmal als Abfall eingestuft wurde, kann diese Eigenschaft nur unter den in § 5 AWG 2002 (AWG 2002) definierten Bedingungen verlieren. Nach § 5 AWG 2002 wird die Abfalleigenschaft eines Stoffes oder Gegenstandes beendet, wenn die gesetzlichen Voraussetzungen für das Ende der Abfalleigenschaft erfüllt sind. Dies kann entweder durch eine nationale Verordnung gemäß § 5 Abs. 2 AWG 2002 (AWG 2002) oder durch eine EU-Verordnung auf Basis von Artikel 6 Abs. 2 der Richtlinie 2008/98/EG (ARRL 2008) festgelegt werden. Wird der Abfall für eine Wiederverwendung vorbereitet, endet die Abfalleigenschaft mit Abschluss des entsprechenden Verwertungsverfahrens. Voraussetzung für das Ende der Abfalleigenschaft ist die Einhaltung aller relevanten Anforderungen, die für Rohstoffe und Produkte gelten. Detaillierte Angaben können, insofern vorhanden, aus gültigen Regelungen wie beispielsweise der Recycling-Baustoffverordnung (RBV) – BGBl. II Nr. 181/2015 entnommen werden (RBV 2015).

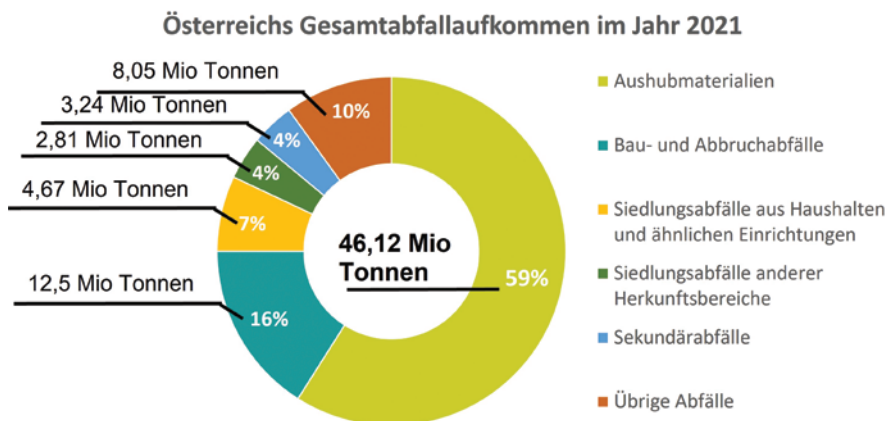


Abbildung 1: Das Gesamtabfallaufkommen Österreichs bezogen auf das Referenzjahr 2021. 59 % machen Aushubmaterialien aus. Mineralische Abfälle (Aushubmaterialien gemeinsam mit Bau- und Abbruchabfällen, und mineralischen Abfällen aus den Übrigen Abfällen: Schlacken, etc.) umfassen 78 % des gesamten österreichischen Abfalles (BAWP 2023).

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Aufkommen, Verwertung und Deponierung von nicht verunreinigten Bodenaushubmaterialien. Für die Verwertung wurden die Werte auf Basis der Differenz von Aufkommen und Verwertung sowie Deponierung berechnet (BAWP 2023).

SN	Abfallbezeichnung	Aufkommen [t]	Verwertung [t]	Deponierung [t]	Deponierung [%]
31411 29	Bodenaushub Qualität BA	19.368.000	4.648.000	14.720.000	76
31411 30	Bodenaushub Qualität A1	2.852.000	1.603.000	1.249.000	44
31411 31	Bodenaushub Qualität A2	11.182.000	5.722.000	5.460.000	49
31411 32	Bodenaushub Qualität A2-G	1.478.000	1.178.000	300.000	20
Gesamt		34.880.000	13.151.000	21.729.000	62

Die Nebenprodukteigenschaft kann nur für Stoffe gelten, die nach Artikel 3 Nummer 1 der Abfallrahmenrichtlinie (ARRL 2008) nicht als Abfall eingestuft werden. Dabei ist entscheidend, dass weder ein Wille zur Entledigung noch eine Entledigungspflicht vorliegt. Zusätzlich müssen gemäß § 2 Abs. 3a AWG 2002 (AWG 2002) folgende vier Kriterien erfüllt sein:

1. Der Stoff oder Gegenstand muss sicher einer Weiterverwendung zugeführt werden.
2. Der Stoff oder Gegenstand kann ohne zusätzliche Verarbeitung, die über die normalen industriellen Verfahren hinausgeht, direkt verwendet werden.
3. Der Stoff oder Gegenstand entsteht als integraler Bestandteil eines Herstellungsprozesses.
4. Die weitere Verwendung ist rechtlich zulässig und sicher. Sie darf keine Schutzgüter gemäß § 1 Abs. 3 beeinträchtigen und muss sämtliche relevanten Rechtsvorschriften einhalten. Der Stoff oder Gegenstand muss zudem für den vorgesehenen Zweck unbedenklich sein.

Ziel des Projekts ist es, durch den Einsatz innovativer Techniken zur Materialidentifikation und -wiederverwendung ein Upcycling von Bodenaushub für die Anwendung auf und abseits der Baustelle zu ermöglichen. Dies stellt eine Alternative zur derzeit weitverbreiteten Praxis der Deponierung dar. Ein Grund für die hohe Deponierungsquote von Aushubmaterialien sind günstige Altlastenbeiträge mit 9,20 € pro Tonne. Dieser Beitragssatz ist in § 6 ALSAG (ALSAG 2024) festgelegt und wird ab dem 1. Jänner 2025 auf 10,60 Euro pro Tonne erhöht (WKO 2023). Die zentrale Fragestellung ist, wie durch die Kombination fortschrittlicher sensorbasierter Technologien und Künstlicher Intelligenz (KI) eine Basis für eine anschließende Sortierung geschaffen werden kann, um in weiterer Folge eine hochwertige sowie nachhaltige Nutzung dieser Ressourcen im Sinne der europäischen Kreislaufwirtschaft zu fördern.

2 Methodik

Das methodische Vorgehen im Projekt umfasst einen mehrstufigen Ansatz: Zu Beginn erfolgt die Probenahme und umfassende chemisch-mineralogische und geotechnische Charakterisierung repräsentativer Tunnel- und Aushubmaterialien aus verschiedenen Lithologien Österreichs. Diese Daten werden unter Einsatz von NIR und Raman HyperSpectral Imaging sowie LIBS Sensorik gesammelt und in einer Datenbank systematisch erfasst. In einem weiteren Schritt erfolgt durch maschinelle / Deep Learning Verfahren der Abgleich der erfassten Materialdaten mit den hinterlegten Referenzwerten, was zur automatisierten Klassifizierung und Identifikation der Materialien führt. Die automatische Klassifizierung von unterschiedlichen Gesteinsarten ist komplex, da Technologien wie Raman den Mineralbestand eines Gesteins identifizieren und damit Rückschluss auf den Gesteinstypen führen. Hier muss berücksichtigt werden, dass identische Minerale in mehreren Gesteinstypen vorkommen können.

Dabei konzentriert sich die Projektbearbeitung auf chemisch-mineralogische Analysen, die Datenvalidierung und -auswertung sowie die Anwendung der Sensoren in einer Pilotanlage. Zur Datensammlung werden auf einem kontinuierlich arbeitenden Förderband die Sensordaten erfasst. Die dort gewonnenen Daten werden in die zentrale Datenbank integriert und tragen zur Optimierung der Identifikation der Materialien bei. Besondere Herausforderungen liegen in der präzisen Klassifizierung der Materialien unter Berücksichtigung der Feinabstimmung des KI-Modells auf unterschiedliche Gesteinstypen und den Umweltparametern (Wetter, Staubentwicklung, Bodenvibrationen etc.) auf und fernab der Baustelle. In einem weiteren Schritt wird die Einsatzbarkeit der Materialien in alternativen Baustoffen, einschließlich der benötigten Vorbereitungsschritte, sowie die Verwendung als Bodenadditive in der Landwirtschaft getestet.

Das NNATT-Projekt repräsentiert einen fortschrittlichen Ansatz im Umgang mit Tunnel- und Aushubmaterialien. Es verfolgt das Ziel Ressourcen effizienter zu nutzen, Deponien zu entlasten, Transportwege zu verkürzen (Galler 2015) und die Nachhaltigkeit im Bauwesen zu fördern (Ritter et al. 2013; Magnusson et al. 2015). Möglich wird dies durch die Verbindung chemisch-mineralogischer und geotechnischer Analysen, die Entwicklung einer speziellen Datenbank, den Einsatz von KI zur Materialklassifikation, die Datenerfassung in einer Pilotanlage sowie die Anwendung nachhaltiger Verfahren zur Herstellung alternativer Baustoffe und Bodenadditive für die Landwirtschaft. Die gewonnenen Erkenntnisse könnten weitreichende Auswirkungen auf Wissenschaft und Industrie haben und das ursprüngliche Anwendungsgebiet deutlich übertreffen.

Danksagung

Das Projekt *NNATT* wird durch das österreichische Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie und der Forschungsförderungsgesellschaft (FFG Projektnummer: FO999907606) im Rahmen der FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft (3. Ausschreibung, 2023) innerhalb der open4innovation gefördert.

Literatur/Quellen

- ALSAG (2024): Altlastensanierungsgesetz. ALSAG. Fundstelle: RIS Österreich. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010583>, zuletzt geprüft am 19.12.2024.
- ARRL (2008): Abfallrahmenrichtlinie - Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. ARRL. Fundstelle: Europäische Union.
- AWG (2002): Abfallwirtschaftsgesetz. AWG. Fundstelle: Österreichisches Rechtsinformationssystem.
- BAWP (2023): Bundes-Abfallwirtschaftsplan. BAWP. Fundstelle: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2023 für das Referenzjahr 2021 (2023).
- Galler, R. (2015): Development of resource-efficient tunnelling technologies – Results of the European research project DRAGON. In: *Geomechanics and Tunnelling* 8 (4), S. 302–309. DOI: 10.1002/geot.201500017.
- Magnusson, S.; Lundberg, K.; Svedberg, B.; Knutsson, S. (2015): Sustainable management of excavated soil and rock in urban areas – A literature review. In: *Journal of Cleaner Production* 93, S. 18–25. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.01.010.
- RBV (2015): Recycling-Baustoffverordnung – BGBl. II Nr. 181/2015. RBV. Fundstelle: Rechtssystem des Bundes. Online verfügbar unter <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20009212>, zuletzt geprüft am 20.12.2024.
- Ritter, S.; Einstein, H. H.; Galler, R. (2013): Planning the handling of tunnel excavation material – A process of decision making under uncertainty. In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 33, S. 193–201. DOI: 10.1016/j.tust.2012.08.009.
- WKO (2023): Änderung des Umweltförderungsgesetzes – redaktionelle Anpassungen und Festlegung von Förderhöhen und Förderhöhen. Zu Kreislaufwirtschaft, Flächenrecyclings, nachhaltiger Produkte, Energieeffizienz und Sanierungsoffensive. Online verfügbar unter <https://www.wko.at/abfall/aenderung-umwelt-foerderungsgesetz>, zuletzt geprüft am 19.12.2024.

Kontakt

Martin Johannes Findl, MSc, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Dr.mont. Klaus Philipp Sedlazeck, MSc, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Montanuniversität Leoben, Österreich – Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel.-Nr.: +43 676 / 84 53 86-5170 (Martin Johannes Findl)

E-Mail: martin.findl@unileoben.ac.at

Homepage: <https://www.avaw-unileoben.at/en/research/projects/nnatt>

Iye Szin Ang, MSc, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Univ.-Prof. Dr. Elmar Rückert, Professur

Montanuniversität Leoben, Österreich – Lehrstuhl für Cyper Physical Systems

Elisabeth Hauzinger, MSc, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Robert Galler, Professur

Montanuniversität Leoben, Österreich – Lehrstuhl für Subsurface Engineering

WIR! recyceln Fasern V1.1

Abstract: *Faserverbundwerkstoffe werden aufgrund ihrer vielfältigen Materialeigenschaften in verschiedenen Sektoren eingesetzt. Insbesondere Carbonfasern erfreuen sich einer steigenden Nutzung in der Faserverbundwerkstoffproduktion und finden Anwendung in der Luftfahrt- und Automobilindustrie, aber auch in der Sport- und Baubranche. Faserhaltige Abfälle aus diesen Bereichen werden aufgrund geringer Mengen und heterogener Qualitäten jedoch nicht erfasst. Eine Abfallschlüsselnummer für den Abfallstrom „Carbonfasern“ existiert nicht. Potenzielle Sekundärrohstoffe werden so unerkant von einem Recycling ausgeschlossen. Das übergeordnete Ziel des Projektes WIR! recyceln Fasern (WIRreFa) ist die Etablierung eines Faserkreislaufes in der Projektregion Elbtal Sachsen. Eine Stakeholderanalyse stellt hier die erste Grundlage für eine Vernetzung von Akteuren und der Identifikation von Hemmnissen dar. Aktuell wurden 195 Stakeholder in der Region identifiziert. Diese können in die Interessensgruppen Unternehmen, Entsorgungsunternehmen, Forschung, Vereine und Verbände sowie Politik und Verwaltung geclustert werden. Sowohl die technischen Kompetenzen als auch die Perspektiven der Akteure hinsichtlich des Faserrecyclings sind unterschiedlich. Dies gilt es im weiteren Projektverlauf zu harmonisieren.*

1 Einleitung

Carbonfaserverbundwerkstoffe besitzen vielfältige Materialeigenschaften und werden mittlerweile in den unterschiedlichsten Industriebereichen eingesetzt. Diese umfassen die Luft- und Automobilbranche sowie den Sportbereich und die Baubranche. Hier werden sie zum Beispiel als ergänzende Bewehrung zu Stahlbaukonstruktionen angewandt (Lengsfeld et al. 2019). Im Jahr 2023 wurde eine weltweite Bedarfsmenge von 117.500 t ermittelt. Marktanalysten sehen sowohl für Carbonfasern als auch für Carbonfaserverbundwerkstoffe nach einem Rückgang während der COVID-19-Pandemie einen Trend zu wachsenden Bedarfsmengen (Sauer & Schüppel 2023; Witten & Mathes 2024). Die faserhaltigen Abfälle aus den Verbundwerkstoffen fallen jedoch räumlich ungleichmäßig in geringen Mengen und unterschiedlichen Qualitäten an. Eine getrennte Erfassung von faserhaltigen Abfällen existiert nicht. Für den Abfallstrom „Carbonfasern“ gibt es keine Abfallschlüsselnummer. So gehen potenzielle Sekundärrohstoffe unerkant in anderen Abfallströmen verloren, ein Recycling wird ausgeschlossen und eine Schließung des Faserkreislaufes verhindert. Meng et al. (2017, 2018, 2020) zeigt jedoch in mehreren Studien sowohl Kosteneinsparungspotenziale als auch eine Reduktion negativer Umwelt- und Klimaauswirkungen für recycelte Carbonfasern.

Im übergeordneten Verbundprojekt WIR! recyceln Fasern (WIRreFa) soll in der Projektregion Elbtal Sachsen zu der Schließung eines Carbonfaserkreislaufes beigetragen werden. Das Vorhaben WIR! V1.1 befasst sich insbesondere mit dem Kreislaufabschnitt *Sammlung und Sortierung faserhaltiger Abfälle bzw.*

Wertstoffe. Durch den Aufbau eines digital gestützten Logistiksystems sollen die relevanten Fasermengen der Region erfasst und einer Aufbereitung zugeführt werden. Beispielhaft werden parallel ausgewählte Prozessketten der zirkulären Wertschöpfung ermittelt. Anhand dieser sollen Maßnahmen zur Senkung der stoffstromspezifischen CO₂-Emissionen und zur Effizienzsteigerung entwickelt werden, um im Zuge der nationalen Klimaziele wirtschaftlich tragfähig agieren zu können. Langfristig soll so ein regionaler Wertschöpfungskreislauf für Carbonfaserverbundwerkstoffe entstehen sowie Marktbarrieren gesenkt und neue Geschäftsfelder entwickelt werden. Für diese Zielsetzung steht zunächst die Vernetzung der Stakeholder in der Region sowie eine Analyse der aktuellen Hemmnisse im Vordergrund.

2 Methodik

Aufgrund der aktuellen Initiierung des Faserkreislaufs existieren bisher keine Geschäftsfelder oder -modelle, die die Teilnahme an der Bewirtschaftung faserhaltiger Recyclingwertstoffe attraktiv machen. Eine Analyse der nahen und fernen Umwelt bildet eine Grundlage für die spätere Entwicklung neuer Geschäftsfelder. Ein erstes Mittel der Wahl stellt eine Stakeholderidentifikation und -analyse dar (nach BMI 2024). Aufgrund einer hohen Anzahl von Akteuren werden diese nach gegenwärtigem Stand in folgende Interessengruppen: (●) Unternehmen, (●) Politik und Verwaltung, (●) Vereine und Verbände, (●) Forschung sowie (●) Entsorgungsunternehmen differenziert. Die Wichtung der Stakeholder folgt dem Ansatz des agilen Projektmanagements, wobei der Einfluss sowie die Einstellung des Stakeholders zum Projekt evaluiert werden. Die Zuordnung der Stakeholder wurde nach folgender Skala getroffen: 1 (gering), 2 (mittel) und 3 (hoch). Die Einstellung zum Projekt ist dabei definiert über die Dringlichkeit der Thematik im jeweiligen Geschäftsfeld.

3 Ergebnisse

Die Stakeholderanalyse wird über den gesamten Projektzeitraum fortlaufen und den Entwicklungen entsprechend angepasst. Vorläufig konnten 195 Stakeholder identifiziert werden. 93 Stakeholder können der Interessengruppe (●) Unternehmen und 16 Stakeholder der (●) Politik und Verwaltung zugeordnet werden. Die (●) Vereine und Verbände werden von 20 Stakeholdern vertreten, in der (●) Forschung sind 32 Stakeholder tätig. Weitere 34 Stakeholder werden den (●) Entsorgungsunternehmen zugeordnet. Eine erste Wichtung der Stakeholder lässt sich wie folgt in Abbildung 1 darstellen.

Eine erste Stakeholderbefragung macht deutlich, dass die technischen Kompetenzen zum Faserrecycling auf viele verschiedene Akteure verteilt sind und teils nur als Insellösungen mit Vernetzungspotenzial vorliegen. Darüber hinaus bringen die Stakeholder verschiedene Perspektiven und Wissensstände zu den folgenden Punkten in das Verbundvorhaben ein:

- Material- bzw. Abfallkategorien
- Phasen einer zirkulären Wertschöpfung
- Produktanforderungen für ein effizientes Recycling
- Anforderungen an recycelte Fasern für hochwertige Produkte

Diese gilt es zu harmonisieren. Ein zentrales Ziel des WIRreFa-Projektes ist und wird somit die Zusammenführung von Techniken, Kompetenzen und Ideen sein, um den gegenwärtig unterbrochenen Stoffkreislauf für das Faserrecycling zu schließen und somit den wirtschaftsgetriebenen Innovationsprozess mit den Unternehmen und deren Eigenkapital zu ermöglichen.

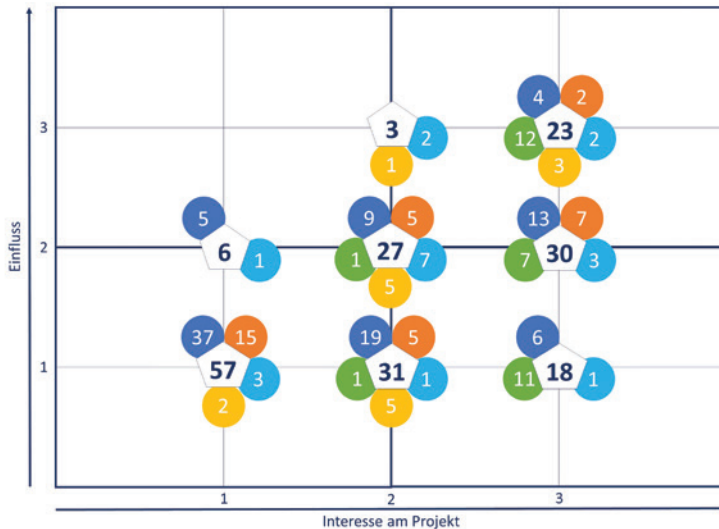


Abbildung 1: Visualisierung der 195 Stakeholder nach Einfluss und Interesse am Projekt – geclustert nach folgenden Interessengruppen: ● Unternehmen, ● Entsorgungsunternehmen, ● Politik und Verwaltung, ● Vereine und Verbände, ● Forschung, △ Summe der Stakeholdergruppen (eigene Darstellung)

Danksagung

Das Projekt *WIR! recyceln Fasern* wird von 2024 bis 2026 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Projektträger ist der Projektträger Jülich (PtJ).

Literatur

- Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI) (2024): Organisationshandbuch - Stakeholderanalyse. URL: https://www.orghandbuch.de/Webs/OHB/DE/OrganisationshandbuchNEU/4_MethodenUndTechniken/Methoden_A_bis_Z/Stakeholderanalyse/Stakeholderanalyse_node.html, abgerufen am: 09.10.2024
- Lengsfeld, H.; Mainka, H.; Altstädt, V. (2019): Carbonfasern - Herstellung, Anwendung, Verarbeitung. Carl Hanser Verlag München. ISBN: 978-3-446-45407-1.
- Meng, F.; McKechnie, J.; Turner, T.; Wong, K.H.; Pickering, S.; (2017): Environmental Aspects of Use of Recycled Carbon Fiber Composites in Automotive Applications. *Environmental Science and Technology*, Vol 51/Issue 21, 12727–12736. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04069>
- Meng, F.; McKechnie, J.; Pickering, S. (2018): An assessment of financial viability of recycled carbon fibre in automotive applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 109, 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.03.011>

- Meng, F.; Cui, Y.; Pickering, S.; McKechnie, J. (2020): From aviation to aviation - Environmental and financial viability of closed-loop recycling of carbon fibre composite. Composites Part B: Engineering, Volume 200, November 2020, 108632. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108362>
- Sauer, M.; Schüppel, D. (2023): Marktbericht für 2022 - Der globale Markt für Carbonfasern und Carbon Composites - Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen. Composite United e.V. -frei zugängliche Kurzfassung -
- Witten, E.; Mathes, V. (2024): Der europäische Markt für Faserverstärkte Kunststoffe / Composites 2023. AVK Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe.

Kontakt

Leonie Gerking, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Technische Universität Dresden/ Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Tel.-Nr. 0351 463 44127

E-Mail: leonie.gerking@tu-dresden.de

Homepage: <https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/iak>

Rahmenbedingungen zur Nachhaltigkeitsbewertung von dezentralen Energiesystemen in Wohnquartieren unter Berücksichtigung von Maßnahmen zur Lebensdauerverlängerung

Abstract: Die Entsorgung dezentraler Energiesysteme in Wohnquartieren am Ende ihrer Lebensdauer und deren Umweltauswirkungen stellen große Herausforderungen dar. Ein Ansatz zur Problemlösung ist die Verlängerung der Nutzungsdauer durch ein zweites Leben der Systeme, um das Abfallvolumen nachhaltig zu reduzieren. Dabei variieren die Herausforderungen je nach Energiesystem erheblich. Bislang sind die langfristigen Auswirkungen eines verlängerten Lebenszyklus auf die Nachhaltigkeit solcher Systeme jedoch wenig erforscht.

Eine ganzheitliche Lebenszyklusbetrachtung ist essenziell, um die Nachhaltigkeit dezentraler Energiesysteme in Wohnquartieren zu steigern. Ziel der Forschung an der Westfälischen Hochschule ist es, Rahmenbedingungen für die ökologische Bewertung der Energieversorgung in Siedlungsgebieten zu entwickeln. Dabei sollen insbesondere Ansätze wie das Remanufacturing, also die Aufbereitung und Wiederverwendung bestehender Systeme, untersucht werden. Neben technologischen Entwicklungen werden auch Wechselwirkungen zwischen gesellschaftlicher Akzeptanz, wirtschaftlicher Tragfähigkeit und regulatorischen Rahmenbedingungen analysiert.

1 Einleitung

Die Produktion und Nutzung dezentraler Energiesysteme wie Wärmepumpen, Batteriespeicher und Photovoltaikanlagen ist zentral für die nachhaltige Energieentwicklung in Deutschland. Diese Technologien erfordern einen hohen Ressourceneinsatz, einschließlich seltener Metalle und Materialien, deren Recycling aktuell aufwendig und nur begrenzt effizient ist. Während Neuanlagen oft den aktuellen Stand der Technik repräsentieren, werden Altanlagen selten auf Wiederverwendung geprüft oder technisch aufgerüstet. Dies reduziert das ökologische Potenzial erheblich, auch wenn diese Vorgehensweise ökonomisch nachvollziehbar erscheint.

Im Rahmen der seit 2023 begonnenen Dissertation wird eine wissenschaftliche Methode zur Entwicklung von Rahmenbedingungen für die ökologische Bewertung dezentraler Energiesysteme in Wohnquartieren untersucht. Ziel ist es, die Voraussetzungen für mehr Ressourceneffizienz durch die Aufarbeitung bestehender Energiesysteme zu definieren. Dabei werden technologische Neuentwicklungen und die Wechselwirkungen zwischen Akzeptanz, Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit unter den bestehenden regulatorischen und politischen Rahmenbedingungen analysiert.

Besonderer Fokus liegt auf den Energiesystemen Wärmepumpe, Batteriespeicher und Photovoltaikanlage, da diese ein sich ergänzendes System bilden, jedoch spezifische Herausforderungen aufweisen.

2 Methodisches Vorgehen

Um die Ziele der Dissertation zu erreichen, wird zunächst im Rahmen einer Erhebungsphase eine Analyse mit den am Kreislaufprozess beteiligten Akteuren durchgeführt. Die dort gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend in eine exemplarische Ökobilanz überführt. Dabei werden vorhandene Methoden zur Nachhaltigkeitsbewertung wie beispielsweise die VDI 4605 im Hinblick auf die Einbindungsmöglichkeiten von Maßnahmen zur Lebensdauererweiterung untersucht. Aus den Erkenntnissen sollen entsprechende Rahmenbedingungen abgeleitet werden, die eine wissenschaftlich fundierte Nachhaltigkeitsbewertung von dezentralen Energiesystemen in Wohnquartieren ermöglichen. Hinzu kommt die Verknüpfung mit dem Forschungsprojekt: „Techno-ökologische Maßnahmenbewertung zur Steigerung der Lebensdauer (repair, reuse, remanufacture)“, das vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen gefördert wird. Ein wichtiger Schwerpunkt des bis 2026 laufenden Projektes ist der Austausch mit einem aus Praxispartnern bestehenden Projektbeirat. Die in der Dissertation untersuchten Maßnahmen werden mit den im Rahmen des Forschungsprojektes ermittelten Daten eines realen Wohnquartiers auf ihre Praxistauglichkeit diskutiert.

3 Aktueller Stand der Arbeit

Die aktuellen Bestrebungen der Europäischen Union sowie der deutschen Gesetzgebung zielen darauf ab, durch Maßnahmen wie den digitalen Produktpass und die Nachhaltigkeitsberichterstattung (Corporate Sustainability Reporting Directive) die Maximierung von Produktlebenszyklen und die Kreislauffähigkeit zu erhöhen (European Commission, 2022).

- **Batterien:** Second-Life-Batterien aus Elektrofahrzeugen zeigen ein großes Potenzial zur Reduktion von Umweltauswirkungen. Studien belegen eine mögliche Einsparung von 30 bis 95 kg CO₂-Äquivalenten pro kWh Nennkapazität. Allerdings fehlen wirtschaftliche und skalierbare Testverfahren, insbesondere für kleinere Batterien, wie etwa aus Pedelects. Automatisierte Verfahren zur Zustandsprüfung sind essenziell, um Personalkosten und Prozessaufwände zu senken (Boston Consulting Group, 2020).
- **Photovoltaikanlagen:** Solarmodule stellen aufgrund ihrer verklebten Schichtstruktur besondere Herausforderungen dar, da diese nur als Ganzes recycelt oder wiederverwendet werden können. Technologische Fortschritte sind erforderlich, um eine zerstörungsfreie Trennung der Materialien zu ermöglichen (Deutsche Umwelthilfe e.V., 2021; Schnatmann, 2022).
- **Wärmepumpen:** Die in Wärmepumpen enthaltenen Materialien wie Metalle, seltene Erden und Kunststoffe bieten erhebliches CO₂-Einsparpotenzial. Allerdings werden sie aktuell als Elektronikschrott entsorgt, was aufwendige Recyclingprozesse erfordert. Eine spezialisierte Logistik für die Sammlung und Aufbereitung fehlt, obwohl diese entscheidend für eine ressourceneffiziente Wiederverwendung wäre. Erste Bewertungen gemäß der VDI-Richtlinie 4605 zeigen, dass präzisere Untersuchungen nötig sind, da bisherige Analysen oft nur grobe Einschätzungen liefern (RWTH Aachen, 2016; VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2023).

4 Betrachtung der Umweltauswirkungen von Wärmepumpen

Im Rahmen des Promotionsvorhabens wurde basierend auf einem Demontageversuch mit einer Split-Klimaanlage eine Lebenszyklusanalyse (LCA) für eine Wärmepumpe erstellt. Zur Modellierung wurde die Software openLCA genutzt, wobei die Datenbank ecoinvent 9.1 als Grundlage diente. Die Analyse umfasst die Phasen Rohstoffgewinnung, Einbau, Betrieb sowie Ausbau und Reparatur. Bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren ergeben sich, wie in Abbildung 1 dargestellt für das Global Warming Potential (GWP) 6433 kg CO₂-Äquivalent bei Verwendung eines durchschnittlichen deutschen Energiemixes sowie 1878 kg CO₂-Äquivalent bei Nutzung eines erneuerbaren Energiemixes. Der Betrieb der Wärmepumpe stellt dabei den größten Anteil der gesamten Emissionen dar.

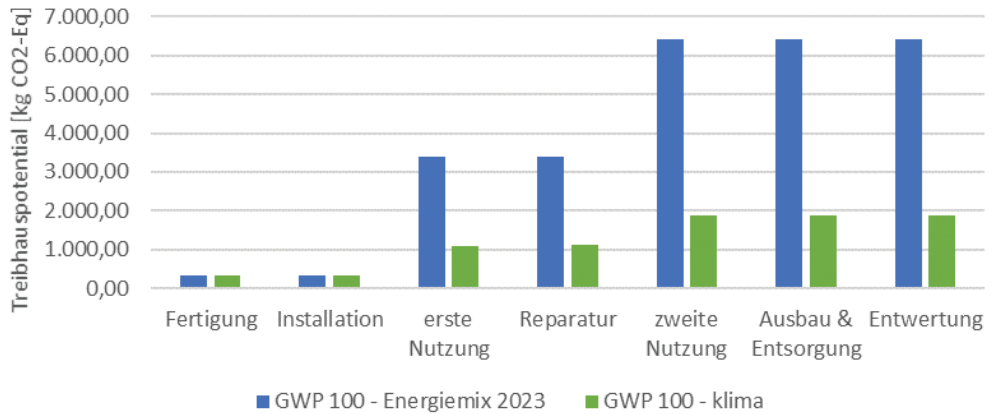


Abbildung 1: Einfluss verschiedener Energie-Szenarien auf die Ökobilanz einer Wärmepumpe

Zur Betrachtung der Umweltauswirkungen über einen Zeitraum von 60 Jahren wurden vier Szenarien definiert, die sich in der Betriebsdauer und der zugrunde gelegten Energiequelle unterschieden. Neben dem aus dem öffentlichen Netz bezogenen Energiemix wurde ebenfalls eine lokale Photovoltaikanlage betrachtet. Zur Berechnung des GWP für ein Jahr wurde für die Szenarien, die den Energiemix verwenden, Formel 1 angewandt. Diese setzt sich zusammen aus dem GWP des vorherigen Jahres, dem GWP der elektrischen Energie in Abhängigkeit vom COP sowie dem anteiligen GWP der Wärmepumpe.

$$GWP_{Jahr}(n) = GWP_{Jahr}(n-1) + \frac{Q}{\epsilon_{WP}(n)} \times GWP_{Energiemix}(n) + \frac{GWP_{Wärmepumpe}}{Betriebsdauer} \quad (1)$$

Für die Szenarien mit der lokalen Photovoltaikanlage wurde die Formel 2 verwendet. Diese setzt sich zusammen aus dem GWP des Vorjahres, dem anteiligen GWP der Photovoltaikanlage sowie dem anteiligen GWP der Wärmepumpe.

$$GWP_{Jahr}(n) = GWP_{Jahr}(n-1) + \frac{GWP_{PV}}{Betriebsdauer} + \frac{GWP_{Wärmepumpe}}{Betriebsdauer} \quad (2)$$

Bei den Berechnungen wurden sowohl die technische Entwicklung des Coefficient of Performance (COP) als auch die Veränderung des Energiemixes über die Zeit berücksichtigt.

5 Diskussion

Um die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Förderung der Nachhaltigkeit in dezentralen Energiesystemen für Wohnquartiere zu bewerten, ist eine umfassende Lebenszyklusbewertung unerlässlich. Dafür bedarf es einheitlicher Standards bei der Ermittlung der Eingangsparameter, die sich an den relevanten Rahmenbedingungen für die ökologische Bewertung der Energieversorgung orientieren. Technische Innovationen und deren Einfluss auf die Energiesysteme spielen dabei eine zentrale Rolle.

Darüber hinaus müssen die Wechselwirkungen zwischen sozialen, wirtschaftlichen und technologischen Faktoren im Kontext der aktuellen regulatorischen und politischen Vorgaben systematisch analysiert werden. Für eine erfolgreiche Umsetzung in der Praxis ist ein intensiver Dialog mit allen beteiligten Akteuren erforderlich, um Herausforderungen frühzeitig zu identifizieren und praxisnahe Lösungen zu entwickeln.

Danksagung

Das Projekt „Techno-ökologische Maßnahmenbewertung zur Steigerung der Lebensdauer (repair, re-use, remanufacture)“ wird über die vom Bundesinstitut für Bau, Stadt- und Raumforschung begleitete Zukunft Bau Forschungsförderung durch das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen gefördert.

Literatur/Quellen

- Deutsche Umwelthilfe e.V. (2021). Weißbuch zur Stärkung der Wiederverwendung und des Recyclings von Photovoltaik-Modulen. Berlin.
- European Commission. (2022). REPowerEU.
- Kader, S., Kobus, J., Hansen, E., Akinci, S., Elsner, P., Hagelüken, C., . . . von Wittken, R. (2021). Circular Economy Roadmap für Deutschland. Münche/London: Circular Economy Initiative Deutschland.
- N. Niese, C. Pieper, A. Arora und A. Xie, „Boston Consulting Group GmbH“ (2020). Von <https://www.bcg.com/de-de/publications/2020/case-for-circular-economy-in-electric-vehicle-batteries> abgerufen am 25.09.2023
- RWTH-Aachen. (2016). Effizientes Recycling von Elektronikschrott. Forschungsmagazin RWTH THEMEN.
- Schnatmann, A. K. (2022). Sustainable PV Module Design: Review of State of the Art Encapsulation Methods. Bielefeld: Fachhochschule Bielefeld.
- VDI Zentrum Ressourceneffizienz. Kreislaufführung von Produkten und Bauteilen (2023). Von www.resource-deutschland.de/themen/kreislaufwirtschaft/kreislauffuehrung-im-verarbeitenden-gewerbe/kreislauffuehrung-von-produkten-und-bauteilen/ abgerufen am 25.09.2023

Kontakt

M.Eng. Martin Gertz, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Westfälische Hochschule / Fachbereich Maschinenbau, Umwelt- und Gebäudetechnik

Tel.-Nr. 0209/9596-8969

E-Mail: martin.gertz@w-hs.de

Homepage: www.w-hs.de

There is more to an experiment than its design

Abstract: *Research conducted on sensor-based quality assurance (SBQA) on a plant level indicates the implementation of a systematic design of experiments (DoE). Still, there is no consensus on how such experiments can best be conducted. Moreover, before one is even able to conduct experiments to validate a developed quality monitoring system, or any automated analysis system in the broad sense, prior experiments are generally needed to determine a suitable experimental environment for system validation or to acquire a (labeled) data set for developing the analysis model embedded in the quality monitoring system. To this end, this work aims to provide a guideline, by means of describing a real case study, for successful and efficient upscaling of sensor-based systems for pilot plants and full-scale industrial facilities.*

1 Introduction

Sensor-based quality assurance (SBQA) is an emerging topic in the field of mechanical waste management (Kroell, Chen, et al., 2022). Even though this technology is becoming established in some fields, like food processing and water management, further developments are needed in most application areas before it can be successfully implemented in practice (Di Maria et al., 2016; Kandlbauer et al., 2021; Kroell, Schönfelder, et al., 2022). In the context of mechanical waste management, much research has already been conducted on a proof-of-concept and laboratory scale, but upscaling this work to the higher technology readiness levels has proven to be difficult. That is, factors like high material heterogeneity, complex material flows, and rough operating conditions complicate experimentation and implementation of SBQA in full-scale industrial waste processing and recycling facilities (Göbbels, Kroell, & Raulf, 2024; Zhang et al., 2016).

Even though some SBQA research conducted on a plant level indicates the implementation of a systematic experimental design or design of experiments (DoE), there is no consensus on how such experiments can best be conducted. Moreover, accurate, generalizable reports are often lacking. For instance, the work by Nair et al. contains a visual comparison of sensor and lab measurements before final deployment in a full-scale wastewater treatment plant, but the DoE is not elaborately described, which limits interpretability, transferability and validity of the results (Nair et al., 2022). Similarly, Bilodeau et al. describe the experiments conducted on a laboratory scale in detail, but fail to provide precise descriptions of the controlled and uncontrollable parameters during their industrial-level experiments in a rock quarry (Bilodeau et al., 2020). Furthermore, Aigner et al. describe both experiments conducted for the gas sensor calibration as well as for the inline quality measurement set-up in a compounder for polymer extrusion (Aigner et al., 2014). However, here too, accurate descriptions of the DoE for verifying the validity and functionality of the system are missing. Moreover, before one is even able to conduct experiments to validate a developed quality monitoring system, prior experiments are generally needed to determine a suitable experimental environment for system validation or to acquire a (labeled) data set for developing the analysis model embedded in the quality monitoring system. To this end, this work aims to provide a guideline, by means of describing a real

case study, for successful and efficient upscaling of sensor-based systems for pilot plants and full-scale industrial facilities. In this, the focus will be on designing and conducting plant-scale experiments with the developed sensor system for data acquisition. The main purposes of this data collection are the subsequent development of deep learning models and analysis of machine and sensor system performances under different working conditions.

2 Case description

The case study in this work is the KIMBA project, which is based on the feasibility study described in (Göbbels, Kroell, and Raulf, 2024) and (Kroell, Schönfelder, et al., 2022). The project focuses on the implementation of sensor-based quality monitoring (SBQM) of construction and demolition waste (CDW) processing on an industrial scale, among other things to increase transparency regarding the material quality and to maintain or even improve material quality. In a more general sense, this project thus aims to enhance the ecological advantages embedded in the use of RC material instead of primary material when it comes to building and infrastructure construction applications (Göbbels, Kroell, Raulf, et al., 2024). Both the large size of the waste stream as well as the heterogeneity pose difficulties when it comes to automating the quality analysis of processed (i.e. comminuted) CDW material, which is currently carried out manually, and are thus central problems in our case study. As such, an important question is what a suitable experimental environment would be for verifying the SBQM system on an industrial level. To answer this question, it is imperative to define and answer a multitude of sub-questions related to the DoE. In this work, we aim to centralize the main questions into three topics: 1) material and sample (size), 2) experimental design, and 3) analysis of the output. For all three topics, a specific and clear definition of the purpose for conducting the experiments forms the basis. That is, in the current study, the goal is to acquire true particle size distributions (PSDs) of the samples, which form the *labels* for the data recorded of the same sample by the sensor system. More specifically, the sensor system consists of a CMOS RGB line scan sensor, which stores 8-bit RGB images with a size of 8192 by 4096 pixels, a two-sensor 3D laser triangulation system, which stores height data in a 16-bit grey scale image format, and an industrial PC for controlling the sensors and, later, allowing operation of the complete SBQM system.

3 Material, experimental design and output analysis

Defined by the DoE, the required amount of material was estimated. Moreover, to account for the heterogeneity, it was decided to collect 'best-case scenario' material – clean concrete waste with relatively low material heterogeneity – and 'worst-case scenario' material – mainly bricks, tiles, ceramics and other contaminants – in a period spanning several months. The ideal amount of material per type would be 4000 Mg to allow for experiments with a duration of one hour each. In the end, it was possible to collect around 3000 Mg for each type of material. Besides the material, having sufficient information on the optimal settings of the main machine parameters and the potential consequences different machine parametrizations have, are essential when designing an experiment to validate a SBQM system. During several discussions with impact crusher developers, three machine parameters were identified as main factors. These independent

variables can be monitored and documented in a constant fashion. Each combination of parameter settings is defined as a configuration, resulting in 18 configurations. This full-factorial design will be repeated for both material types in an as short as possible time frame (i.e. the aim is to conduct all experiments in a time span of several subsequent days) to minimize seasonal and environmental influences. Additionally, the aim is to document uncontrolled conditions in a detailed manner. Each configuration will then be run for 30 minutes. Even though randomization of when to conduct which experiment, both in terms of material type and configuration, is logistically infeasible, the time at which a sample is taken can relatively easily be randomized, allowing for stratified random sampling conditions. As each sample needs to be dried, manually sieved and stored in the correct way to acquire the quality factor of interest, i.e. the PSD (*DIN EN 933-1*, 2021; *DIN EN 12620:2002+A1:2008*, 2008), sample sizes need to be inherently small. Therefore, for each experiment the plan is to take two samples of 2 to 3 seconds using a wheel loader to sample directly from the output stream. Preliminary tests indicate sample sizes between 10 and 30 kg per sampling procedure, depending on the throughput. The PSD is a cumulative distribution of the mass (*DIN 66165-1:2022-06*, 2022). As the particle counts are unknown and infeasible to acquire due to the presence of many minuscule particles, the output is the aggregation of observations in one sample in the form of a PSD. Using GPS time stamps documented when taking a sample, each PSD can, once available, be matched to the RGB and grey scale images recorded at the same time during the sampling. These images will subsequently be used to quantify the prediction performance of the SBQM system for the real, industrial-scale material flow in an offline manner, before implementing it in its entirety for live monitoring.

Three types of data are documented: experiment meta data, sample data, and sensor data. That is, the experiment meta data regard notes on the weather and environment, time stamps of the samples, start and end time stamps of the experiments, the experiment IDs and corresponding configurations and specifications of the crusher and material types, and a space for additional observations. The sample data regard the net and gross weight before and after drying together with the PSD. The sensor data regard the images collected by the sensor system. Sensor settings are not actively collected during the experiments but are documented beforehand as they are set for the entire run of experiments. Where the images are automatically labeled with the respective GPS time stamp by an embedding in the self-developed python-based recording program, the sample and experiment time stamps are determined by a self-developed time stamping app and can additionally be written down by hand. For the experiment meta data, a tabular template has been created digitally with the highly recommended option to print it and fill it out using a pen. A similar procedure is available for the sample data, but the resulting PSD will be documented in a digital format only, after sieving.

4 Discussion and conclusion

In this work, the process of developing the experiments conducted in the KIMBA project, including essential considerations and the documentation procedure has been described in the context of validating a SBQM system for CDW processing. The proposed design aims to mitigate the difficulty of acquiring the information needed to quantify the performance of the SBQM system under different conditions like material and throughput fluctuations, which is required for successful upscaling. Moreover, the design is directly generalizable to the phase in which a completely developed SBQM system is to be validated. Additionally, it can be interesting to assess if different configurations may influence the PSDs. This could be done with a similar design, albeit preferably with larger sample sizes, and manual sieve analysis, or with a validated SBQM system to mitigate problems related to the sample size. Such a comparison could for instance be made

by conducting a two-sample test for distributional equality (e.g. the Kuiper, Cucconi or KS-test). Despite the specific implementation context, at least some of the hurdles described in this work are also applicable to other waste management processes, where more and more SBQA systems are being implemented. Therefore, this work has aimed to contribute to the debate on how to prepare and conduct experiments for SBQM system validation in the context of mechanical waste processing environments by describing the development process of a DoE in a real CDW processing case study, therewith providing a set of practical and generalizable guidelines that has so far been lacking.

Acknowledgements

The Federal Ministry of Education and Research (BMBF) is funding the KIMBA project [KI-basierte Prozesssteuerung und automatisiertes Qualitätsmanagement im Recycling von Bau- und Abbruchabfällen durch sensorbasiertes Inline-Monitoring von Korngrößenverteilungen] (grant no. 2WDG1693D) for the funding measure Digital GreenTech - Environmental technology meets digitalization within the framework of the BMBF strategy Research for Sustainability (FONA).

Sources

- Aigner, M., Hundeshagen, A., Hinterberger, T., Mayrbäurl, E., Buchberger, W., & Miethlinger, J. (2014). A gas-sensor-based measurement setup for inline quality and process control in polymer extrusion. *International Polymer Processing*, 29(4), 461–466. Scopus. <https://doi.org/10.3139/217.2861>
- Bilodeau, M., Gouveia, D., Demers, A., & Di Feo, A. (2020). 3D free fall rock size sensor. *Minerals Engineering*, 148. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106169>
- Di Maria, F., Bianconi, F., Micale, C., Baglioni, S., & Marionni, M. (2016). Quality assessment for recycling aggregates from construction and demolition waste: An image-based approach for particle size estimation. *Waste Management*, 48, 344–352. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.005>
- DIN 66165-1:2022-06. (2022).
- DIN EN 933-1:2021-07. (2021).
- DIN EN 12620:2002+A1:2008. (2008).
- Göbbels, L., Kroell, N., & Raulf, K. (2024). Construction and demolition waste recycling: Investigating the feasibility of using AI-based quality control using sensor-based monitoring of particle size distributions. In *Global Guide 2024-2026* (pp. 124–130). Vulkan Verlag GmbH. <https://fs-journal.de/global-guide/>
- Göbbels, L., Kroell, N., Raulf, K., Häberle, S., Merkel, J., & Rambach, J. (2024, March 8). *Verbesserung des Recyclings von Bau- und Abbruchabfällen*. Symposium für Aufbereitungstechnik, Freiberg. <https://tu-freiberg.de/fakult4/iart/freiburger-symposium-fuer-aufbereitungstechnik/vergangene-symposien>
- Kandlbauer, L., Khodier, K., Ninevski, D., & Sarc, R. (2021). Sensor-based Particle Size Determination of Shredded Mixed Commercial Waste based on two-dimensional Images. *Waste Management*, 120, 784–794. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2020.11.003>
- Kroell, N., Chen, X., Greiff, K., & Feil, A. (2022). Optical sensors and machine learning algorithms in sensor-based material flow characterization for mechanical recycling processes: A systematic literature review. *Waste Management*, 149, 259–290. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.05.015>

- Kroell, N., Schönfelder, P., Chen, X., Johnen, K., Feil, A., & Greiff, K. (2022). *Sensorbasierte Vorhersage von Korngrößenverteilungen durch Machine Learning Modelle auf Basis von 3D-Lasertriangulationsmessungen*. 11. DGAW-Wissenschaftskongress "Abfall- und Ressourcenwirtschaft," Dresden.
- Nair, A., Hykkerud, A., & Ratnaweera, H. (2022). Estimating Phosphorus and COD Concentrations Using a Hybrid Soft Sensor: A Case Study in a Norwegian Municipal Wastewater Treatment Plant. *Water (Switzerland)*, 14(3). Scopus. <https://doi.org/10.3390/w14030332>
- Zhang, M., Liu, X., & Zhang, Z. (2016). A soft sensor for industrial melt index prediction based on evolutionary extreme learning machine. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24(8), 1013–1019. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.05.030>

Contact

Lieve Göbbels, M.Sc., research assistant and PhD student
RWTH Aachen / Department of Antropogenic Material Cycles (ANTS)
+49 241 80-95707
E-Mail: lieve.goebbels@ants.rwth-aachen.de
Homepage: www.ants.rwth-aachen.de

Optimierung des Abfallmanagements im öffentlichen Raum: Betrachtung der Umweltauswirkungen am Beispiel Wien

Abstract: Öffentliche Abfälle sind kaum untersucht. Bislang werden sie überwiegend gemischt gesammelt. In dieser Studie wird eine Lebenszyklusanalyse für den öffentlichen Abfall in Wien vorgenommen, bei der die Umweltauswirkungen verschiedener Sammelszenarien untersucht werden. In mehreren Szenarien wird die gemischte Sammlung (als Restmüll) mit der getrennten Sammlung von Leichtverpackungen, Papier und Glas verglichen, wobei das Treibhausgaspotential als zu analysierende Wirkungskategorie gilt.

1 Einleitung

Im Rahmen dieser Studie bezieht sich der Begriff „Öffentlicher Abfall“ auf Abfälle, die im öffentlichen Raum anfallen und in öffentlichen Abfallbehältern gesammelt werden. Darunter fallen öffentliche Räume wie Parks, Straßen und öffentliche Plätze. Öffentlicher Abfall wird bislang hauptsächlich gemischt – als Restmüll – gesammelt und nur vereinzelt getrennt.

In Österreich wird öffentlicher Abfall dem Abfallstrom „Straßenkehricht“ zugeordnet. Österreichweit betrug das Abfallaufkommen (ohne Einkehrsplitt) im Jahr 2022 70.100 t (BMK, 2024). Öffentlicher Abfall stellt insgesamt einen wachsenden Abfallstrom dar, was vor allem auf den zunehmenden Außer-Haus-Konsum zurückzuführen ist (RegioData, 2019). Rund 52 % des öffentlichen Restmülls in Österreich bestehen aus Wertstoffen, darunter 18 % Leichtverpackungen (einschließlich Metall, Kunststoff und Materialverbunde), 17 % Papier und 16 % Glas (Kladnik et al., 2024). Angesichts des erheblichen Nachholbedarfs zum Erreichen der EU-Recyclingquoten sollte dieser Wertstoffanteil nicht ungenutzt bleiben. Bis 2030 muss die Recyclingquote für Kunststoffverpackungen gemäß den EU-Vorgaben auf 55 % steigen (EC, 2008), was in Österreich nahezu einer Verdoppelung entspricht (BMK, 2022). Derzeit entgehen Wertstoffe aus dem öffentlichen Abfall jedoch der kreislaufwirtschaftlichen Nutzung.

Um die ökologische Sinnhaftigkeit einer getrennten Sammlung im öffentlichen Raum zu bewerten, wird in dieser Studie eine Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt. Dabei werden verschiedene Szenarien simuliert und Treibhausgasemissionen verglichen.

2 Methodik

2.1 Systemgrenzen






Ziel dieser Studie ist es mithilfe einer LCA mehrere Szenarien zu vergleichen. Das Untersuchungsgebiet bildet dabei die Sammlung öffentlichen Abfalls von Straßen, Parks und öffentlichen Verkehrsmitteln in der Stadt Wien. Genauer umfasst die Systemgrenze die Sammlung, den Transport, die Behandlung und Beseitigung. Dabei werden Prozesse und Flüsse, die außerhalb Wiens liegen, wie es häufig bei der Behandlung

und Beseitigung der Fall ist, ebenfalls beachtet. Es wird davon ausgegangen, dass alle Prozesse und Flüsse in Österreich stattfinden. Exporte werden zur Vereinfachung des Modells nicht betrachtet.

2.2 Szenarienbeschreibung

Um eine aussagekräftige Entscheidung über die Sinnhaftigkeit einer getrennten Sammlung im öffentlichen Raum treffen zu können, wurden insgesamt sechs Szenarien entwickelt. Dabei werden Szenarien mit einer gemischten Sammlung (S0, S1), einer getrennten Sammlung (S1.1, S1.2), einer gemischten Sammlung und Restmüllsplitting (S2) sowie einer Kombination aus getrennter Sammlung und Restmüllsplitting (S3) simuliert. In Tabelle 1 ist eine Übersicht zu den Szenarien zu finden. Szenario 0 beschreibt den Status quo der öffentlichen Abfallsammlung in Wien, welcher das Jahr 2024 abbildet. Aufbauend darauf wird in Szenario 1 die österreichweite Einführung des Pfandsystems für PET- Getränkeflaschen und Aluminiumdosen, die ab 2025 vorgesehen ist, berücksichtigt. Dieses Szenario stellt das Baseline Szenario dar, mit dem die darauffolgenden Szenarien verglichen werden.

Tabelle 1: Szenarienübersicht

Szenarien			Symbol
	S0	Status Quo	
	S1	2025 – Pfand	
Sammlung	S1.1	Vollständige getrennte Sammlung	
	S1.2	Partielle getrennte Sammlung	
Behandlung	S2	Restmüllsplitting	
Kombination	S3	Gemischt	

Szenario 1.1 und Szenario 1.2 erweitern Szenario 1 mit der Einführung einer getrennten Sammlung im öffentlichen Raum, wofür zusätzliche Trennbehälter bereitgestellt werden. Diese beiden Szenarien unterscheiden sich in dem Erfassungsgrad. In Szenario 1.1 wird der Erfassungsgrad von Wertstoffen, wie er in Wiener Haushalten nachzuweisen ist, auf den öffentlichen Raum übertragen. Es wird hier von einer vollständigen getrennten Sammlung gesprochen, welcher die Aufstellung zusätzlicher Abfallsammelbehälter voraussetzt. Genauer wird davon ausgegangen, dass jeder zweite Restmüllbehälter mit einer Trennmöglichkeit ausgestattet wird. Im Gegensatz dazu handelt es sich in Szenario 1.2 um eine partielle getrennte Sammlung. Hier werden Erfassungsgrade von Wertstoffen berücksichtigt, die auf vorangegangenen Feldversuchen im öffentlichen Raum basieren (Kladnik et al., eingereicht). Diese Erfassungsgrade liegen überwiegend unterhalb derer in Wiener Haushalten. Es wird angenommen, dass eine Trennmöglichkeit bei jedem neunten Restmüllbehälter bereitgestellt wird. Szenario 2 schließt (außer im öffentlichen Verkehr) eine getrennte Sammlung von öffentlichem Abfall aus und betrachtet eine alternative Behandlungsmethode für Restmüll, das sogenannte „Restmüllsplitting“, bei dem Wertstoffe aus gemischt gesammelten Abfällen mittels mechanischer Aufbereitung zurückgewonnen werden. Im letzten Szenario 3 wird das Restmüllsplitting mit der getrennten Sammlung, wie sie in Szenario 1.2 vorzufinden ist, kombiniert.

2.3 LCA Modell

Als funktionelle Einheit ist eine Tonne öffentlich gesammelter Abfall festgelegt. In Abbildung 1 wird ein schematischer Überblick des Modells gegeben, welches die Grundlage für alle Szenarien darstellt. Startpunkt ist die Sammlung des öffentlichen Abfalls. Diese unterscheidet sich je nach Szenario in eine gemischte Sammlung bzw. getrennte Sammlung von Papier, Glas, Leichtverpackungen. Bis auf die Sammelart bleiben die restlichen Prozesse und Flüsse in den Szenarien ident. Für die Szenarien, die eine getrennte Sammlung vorsehen, wurde neben den zusätzlichen Transportwegen auch die Produktion von zusätzlichen Abfallbehältern berücksichtigt. Öffentlicher Abfall wird in Wien separat mit eigenen Sammelfahrzeugen (Pritschenwagen) bis zu Zwischenlagerungsstätten (z.B. Müllräume) transportiert. Anschließend wird der öffentliche Abfall mit der Systemsammlung, welche Abfälle aus Haushalten sammelt, zu den Behandlungsanlagen befördert. Einige der Abfälle werden zuvor zu Vorbehandlungsanlagen (z.B. Sortierungsanlagen für Papier, Leichtverpackungen etc.) verbracht, von wo sie weiter zum mechanischen Recycling gelangen. Andere Abfälle werden direkt nach der Zwischenlagerung einer thermischen Behandlung zugeführt. Wertstoffe aus Rückständen der thermischen Verwertung können wieder dem mechanischen Recycling zugeführt werden, z.B. Glas zur Schaumglasproduktion. Als letzter Prozess zählt die Beseitigung der Reststoffe (Deponie). Der Ausstoß von Emissionen, die Gewinnung von Energie sowie die Produktion und Wiederverwendung von sekundären Materialien aus dem mechanischen Recycling werden in dem Modell berücksichtigt.

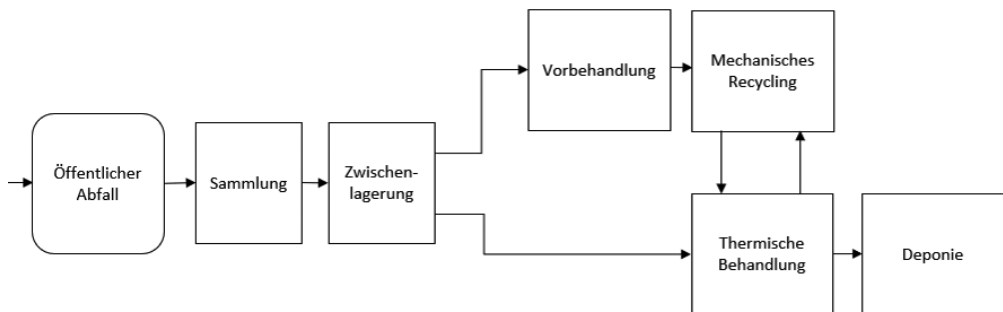


Abbildung 1: Schematisches Modell zur Behandlung öffentlichen Abfalls als Basis der LCA

Als primäre Wirkungskategorie gilt die Quantifizierung des Treibhausgaspotentials (GWP – Global Warming Potential). Dabei handelt es sich um den zeitlichen Rahmen der innerhalb eines Jahres produzierten Umweltemissionen. Zur Auswertung wurde die Methode EFv3.0 verwendet.

Die LCA wurde unter Verwendung des Programms EaseTech simuliert, welches spezifisch für abfallwirtschaftliche Modelle von der DTU Kopenhagen entwickelt wurde. Darin enthalten sind etwa vorgefertigte chemische Zusammensetzungen von Abfallfraktionen sowie Daten bzgl. Ressourcenverbrauch und Emissionsausstoß bestimmter Prozesse.

Der Datenbestand für das Modell stammt, neben Angaben aus EaseTech, aus vorangegangenen Feldversuchen im Forschungsprojekt (siehe Kladnik et al., eingereicht), Angaben der Wiener Abfallwirtschaft sowie aus Studien zu Materialflussanalysen (Kladnik et al., in Ausarbeitung). Datenlücken zu Materialien und Prozessschritten wurden über Literaturrecherche sowie aus der Umweltdatenbank ecoinvent (v3.9.1, cut-off) vervollständigt. In Fällen, in denen keine Daten verfügbar waren, wurden begründete Annahmen getroffen bzw. ExpertInnenschätzungen berücksichtigt.

3 Ausblick

Die Ergebnisse der LCA werden während der Konferenz vorgestellt. Es ist davon auszugehen, dass die Einführung der getrennten Sammlung im öffentlichen Raum zu verbesserten Umweltauswirkungen führt. Es gilt jedoch dies in Anbetracht des operativen Aufwands (Sammeltouren, Transportkilometer, zusätzlicher Behälter etc.) zu evaluieren. Die Ergebnisse der Arbeit sind in jedem Fall von großer Aktualität und Bedeutung, da eine getrennte Abfallsammlung wesentlich ist, um Recyclingmaterial von geeigneter Qualität zu sammeln. Das Trennbewusstsein kann durch öffentliche Sichtbarkeit gestärkt werden. Insbesondere in Großstädten und touristischen Regionen gewinnt die Frage eines optimierten Umgangs mit öffentlichem Abfall zunehmend an Bedeutung.

Danksagung

Die Arbeiten werden durch den Wiener Wissenschafts-, Forschungs- und Technologiefonds (WWTF) und das Land Niederösterreich im Zuge des Projektes „UrbanWaste“ (ESR20-019) gefördert.

Literatur/Quellen

- BMK (2022): Kreislaufwirtschaft: Ab 2023 österreichweit einheitliche Sammlung von Kunststoffverpackung
<https://infothek.bmk.gv.at/verpackungsverordnung-ab-2023-oesterreichweit-einheitliche-sammlung-von-kunststoffverpackung/>
- BMK (2024): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich, Statusbericht 2024 für das Referenzjahr 2022.
- EC (2008): DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives.
- Kladnik, V., Dworak, S., Schwarzböck, T. (2024): Composition of public waste - a case study from Austria. Waste Management, 178, 210–220. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2024.02.031>
- Kladnik, V., Schwarzböck, T., Dworak, S. (eingereicht): Improving waste separation in public spaces – a field study. Detritus Journal.
- Kladnik, V., Schwarzböck, T., Dworak, S. (in Ausarbeitung): Analysis of Public Waste Flows in the City of Vienna: Assessing Current Practices and Alternative Scenarios
- RegioData. (2019): Österreich - Ausgaben für Außer-Haus-Essen an Konsumausgaben für Ernährung 2018
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/48095/umfrage/ausgaben-fuer-ausser-haus-essen-an-konsumausgaben-fuer-ernaehrung-in-oesterreich/>

Kontakt

DI, Betül Gök, Projektmitarbeiterin

TU Wien / Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement

Tel.-Nr. +43 1 58 801 226 46

E-Mail: betuel.goek@tuwien.ac.at

Homepage: iwr.tuwien.ac.at/ressourcen

Was landet wo? Charakterisierung und Erfassungsgrad papierbasierter Verpackungen – eine Fallstudie aus Österreich

Abstract: Das Aufkommen an Papierverpackungsabfällen nimmt stetig zu, während die Recyclingraten tendenziell sinken. Insbesondere in städtischen Gebieten werden weniger Papierverpackungsabfälle getrennt gesammelt, weshalb Wien als Fallstudie ausgewählt wurde. Ziel der Studie war die Analyse der Zusammensetzung und Qualität von papierbasierten Verpackungen in der getrennten Altpapiersammlung und im Restmüll mittels Handsortierung sowie die Untersuchung von Mengen, Erfassungsgraden, ungenutzten Potenzialen und Maßnahmen zur Verbesserung der getrennten Sammlung. Die Ergebnisse zeigen u.a. hohe Erfassungsgrade bei Wellpappe (80%), aber niedrige Erfassungsgrade bei Papier (21%) und Karton (26%). Somit gehen mindestens 21.000 t/a an sauberen Verpackungen für das Recycling verloren, wie z.B. Lebensmittel-Sekundärverpackungen und Non-Food-Verpackungen. Durch eine gezielte Bewerbung dieser Verpackungen könnte der Gesamterfassungsgrad in Wien theoretisch von 54% auf 65-76% gesteigert werden.

1 Einleitung







Papier, Karton und Wellpappe sind mit 40,3 % die am häufigsten verwendeten Verpackungsmaterialien in der EU und stellen mit 34 Millionen Tonnen im Jahr 2021 den größten Abfallstrom aller Verpackungen dar (EUROSTAT, 2023). Das Aufkommen an Papierverpackungsabfällen ist seit 2010 leicht aber kontinuierlich von 64 kg/Kopf/Jahr auf 73 kg/Kopf/Jahr im Jahr 2020 angestiegen, während die Recyclingrate leicht rückläufig ist (EUROSTAT, 2024, 2023). Für die Zukunft wird erwartet, dass Papierverpackungen aufgrund der anhaltenden Trends des boomenden Onlinehandels, des zunehmenden Außer-Haus-Konsums und der vermehrten Substitution von Kunststoffverpackungen durch Papierverbundverpackungen weiter zunehmen werden (Cayé and Marasus, 2023). Auch in Österreich ist ein Anstieg der Papierverpackungsabfälle von 553.300 t/a (2015) auf 603.900 t/a (2022) zu verzeichnen, während die Recyclingrate im gleichen Zeitraum von 84% auf 79% gesunken ist (BMK, 2024). Insbesondere in Wien werden weniger Verpackungsabfälle getrennt gesammelt als in ländlichen Gebieten (Schuch et al., 2023), ein Phänomen, das auch in anderen europäischen Großstädten zu beobachten ist (Seyring et al., 2015). Neben infrastrukturellen Gegebenheiten sind es häufig auch das Verpackungsdesign oder Verschmutzungen, die die getrennte Sammlung beeinflussen und erschweren (Thoden van Velzen et al., 2019; ZSVR and UBA, 2023). Vor diesem Hintergrund wurde die Stadt Wien als Fallstudie ausgewählt.

2 Methodik

2.1 Mengen und Qualitäten

In einem ersten Schritt wurden die Mengen an papierbasierten Verpackungen im Jahr 2022 je Verpackungstyp (Papier, Karton, Wellpappe, Papierverbunde) über die Konzentration in den Abfallströmen Restmüll und Altpapier anhand von Daten der Stadt Wien (MA 48, 2022) berechnet. Anschließend wurden Papier- und Kartonverpackungen aus dem Restmüll (33 kg) und der getrennten Altpapiersammlung (44 kg) hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Qualität analysiert und die Jahresmengen der einzelnen Fraktionen hochgerechnet. Dazu wurde eine manuelle Sortieranalyse gemäß Sortierkatalog (Tabelle 1) nach Food/Non-food, Lebensmittelkontaktstufe, Produkttyp und Verschmutzung durchgeführt und die für die getrennte Sammlung geeigneten Verpackungen identifiziert. Die Proben hierfür stammten aus einer großen Abfallsortierkampagne im Jahr 2022, bei der im gesamten Stadtgebiet repräsentative Proben gemäß nationalem Leitfaden gezogen und anschließend vom einem Ingenieurbüro vorsortiert und geteilt wurden (Beigl et al., 2019; BMK, 2021).

Tabelle 1: Sortierkatalog für Papier- und Kartonverpackungen mit Sortierebenen I-IV.

Papier-/Kartonverpackungen							
(I)	Lebensmittelkompatibilität	Food					Non-food
(II)	Lebensmittelkontakt	Primär				Sekundär	
(III)	Produkttyp	Flüssig	Feucht	Fettreich	Trocken		
							
(IV)	Verschmutzung	Sauber/ verschmutzt	Sauber/ verschmutzt	Sauber/ verschmutzt	Sauber/ verschmutzt	Sauber/ verschmutzt	Sauber/ verschmutzt

2.2 Erfassungsgrad und Szenarien

Anschließend wurden die Erfassungsgrade der papierbasierten Verpackungen sowie deren Fraktionen berechnet ($EG[\%] = m_{\text{Altpapier},i} / (m_{\text{Altpapier},i} + m_{\text{Restmüll},i}) \cdot 100$), um das ungenutzte Potenzial aufzuzeigen. In weiterer Folge wurden Szenarien zur verbesserten getrennten Sammlung geeigneter Verpackungen entwickelt und die Auswirkungen auf den Gesamterfassungsgrad von papierbasierten Verpackungen in Wien dargestellt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse [Abb. 1 (A)] zeigen, dass im Jahr 2022 Wellpappe-Verpackungen mit insgesamt 36.358 t/a die mengenmäßig größte Fraktion darstellen, gefolgt von Kartonverpackungen mit 22.458 t/a und Papier-Verpackungen mit 11.212 t/a. Der durchschnittliche Erfassungsgrad liegt bei 54%, wobei Wellpappe mit 80% den mit Abstand höchsten Erfassungsgrad erreicht, während Kartonverpackungen nur 26% und Papierverpackungen nur 21% erreichen. Das heißt, dass ca. 25.000 t/a Papier- und Kartonverpackungen

im Restmüll verloren gehen. Ein großer Teil davon, rund 21.000 t/a, wäre aufgrund geringer Verschmutzung für eine getrennte Sammlung geeignet, darunter Verpackungen von trockenen Lebensmitteln, Lebensmittelsekundärverpackungen und Non-Food-Verpackungen, wobei letztere mit 12.000 t/a den größten Anteil im Restmüll ausmachen (Abb. 1 (B)). Eine Steigerung des Erfassungsgrades dieser geeigneten Verpackungen von derzeit durchschnittlich 28% auf 54 bzw. 80% durch gezielte Bewerbung, würde theoretisch zu einer Steigerung des Gesamterfassungsgrades von derzeit 54% auf 65 bzw. 76% führen. Insbesondere Papiertragetaschen als sehr homogene und charakteristische Verpackung würden sich hier für eine gezielte Bewerbung eignen. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass die Menge der Papierverbundverpackungen mit 4.700 t/a im Vergleich zu den Papier-, Karton- und Wellpappeverpackungen (70.000 t/a) zwar relativ gering, aber nicht zu vernachlässigen ist.

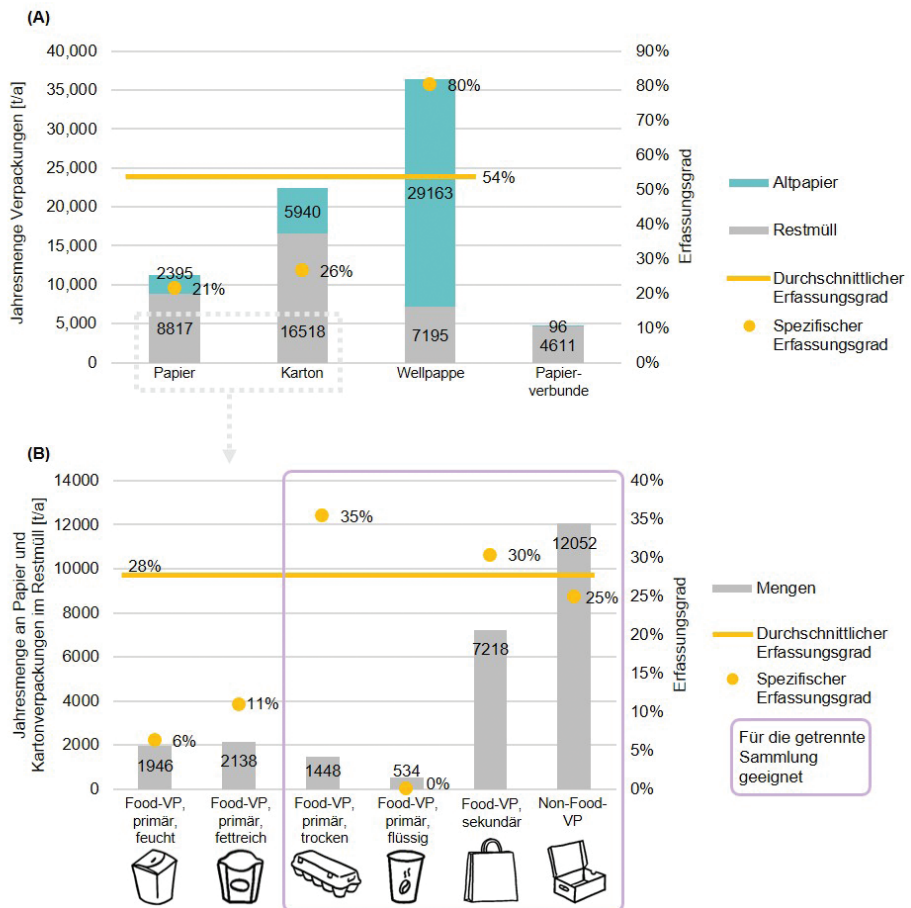


Abbildung 1: Jahresmengen an papierbasierten Verpackungen im Restmüll und Altpapier in Wien 2022 in [t/a] und Erfassungsgrade in [%] (A) sowie Produkttypen der Papier- und Kartonverpackungen im Restmüll in [t/a] und Erfassungsgrade in [%] (B) (VP, Verpackung)

Die Fallstudie bestätigt, dass es ein großes ungenutztes Potenzial an Papier- und Kartonverpackungen im Restmüll gibt und angesichts des zunehmenden Trends zu papierbasierten Verpackungen dringender Forschungs- und Handlungsbedarf besteht. Besonderes Augenmerk ist auf eine effektive Information der Konsument:innen über Zielfraktionen und geeignete Verpackungen für die getrennte Sammlung zu legen.

Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Weiters bedanken wir uns sehr herzlich für die finanzielle und inhaltliche Unterstützung durch unsere Unternehmenspartner, in alphabetischer Reihenfolge: Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoff Recycling Austria AG, Brantner Österreich GmbH, Holding Graz – Kommunale Dienstleistungen GmbH, Lenzing Aktiengesellschaft, Linz Service GmbH, MM Board & Paper, Wien Energie GmbH, und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H.

Literatur/Quellen

- Beigl, P., Happenhofer, A., Allesch, A., 2019. Leitfaden für die Planung, Durchführung und Auswertung von Altpapiersortieranaysen (Guidelines for planning, implementation and evaluation of waste paper sorting analyses), Wien, 49 pp.
- BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021. Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranaysen (Guidelines for residual waste sorting analyses), Wien, 31 pp.
- BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024. Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2024 für das Referenzjahr 2022 (Status report 2024 for the reference year 2022), Wien, 274 pp.
- Cayé, N., Marasus, K.S., 2023. Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2021, Mainz, 301 pp. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/162_2023_texte_aufkommen_verpackungsabfaelle.pdf (accessed 6 May 2024).
- EUROSTAT, 2023. Packaging waste statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Packaging_waste_statistics&oldid=580504.
- EUROSTAT, 2024. Recycling rate of packaging waste by type of packaging (paper and cardboard packaging). https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm020__custom_10169243/default/table (accessed 1 March 2024).
- MA 48 - Magistratsabteilung MA 48 City of Vienna, 2022. Data on waste management in Vienna. Personal communication.
- Schuch, D., Lederer, J., Fellner, J., Scharff, C., 2023. Separate collection rates for plastic packaging in Austria - A regional analysis taking collection systems and urbanization into account. Waste management (New York, N.Y.) 155, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.09.023>.
- Seyring, N., Dollhofer, M., Weißenbacher, J., Herczeg, M., McKinnon, D., Bakas, I., 2015. Assessment of separate collection schemes in the 28 capitals of the EU: Final report. Publications Office, Luxembourg, 1 online resource ([215] pages).

- Thoden van Velzen, E.U., Brouwer, M.T., Feil, A., 2019. Collection behaviour of lightweight packaging waste by individual households and implications for the analysis of collection schemes. *Waste management* (New York, N.Y.) 89, 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.021>.
- ZSVR - Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister, UBA - Umweltbundesamt Deutschland, 2023. Recycling im Wandel: Gemeinsam für Qualität und Quoten!: Jahrespressekonferenz 4. Dezember 2023. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11901/dokumente/presentation_pk_recycling_im_wandel_gemeinsam_fuer_qualitaet_und_quoten.pdf.

Kontakt

Lea Gritsch, MSc, wissenschaftliche Mitarbeiterin

TU Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften

CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft

1060 Wien

Tel.-Nr. +43 1 58801 166112

E-Mail: lea.gritsch@tuwien.ac.at

Homepage: www.vt.tuwien.ac.at

Entwicklung eines Pfandkonzepts zur Reduktion batteriebedingter Brände durch die Steigerung der Sammelquoten von Lithium-Ionen-Batterien

Abstract: Vor dem Hintergrund zahlloser Brände durch unsachgemäß entsorgte Lithium-Ionen-Batterien (LIB) ist es dringend erforderlich, Modelle zur Erhöhung der Sammelquoten für LIB zu entwickeln. Eine mögliche Lösung dazu ist die Einführung eines Pfandsystems. Der vorliegende Beitrag stellt ein Konzept zur Entwicklung eines solchen Pfandsystems auf Basis einer Nutzwertanalyse (NWA) dar. Das Modell berücksichtigt dabei die vier Aspekte „Zielgegenstände“, „Sammelorte und -infrastruktur“, „Kennzeichnung“ und „Pfandhöhe“ als Entscheidungsparameter und stellt entsprechende Entscheidungsalternativen transparent gegenüber. Basierend auf dieser Auswahl wurden zwei Konzepte erarbeitet. Das Modell bzw. die NWA ist dabei so flexibel konzipiert, dass es stetig an neue gesetzliche Rahmenbedingungen oder Systemanforderungen ebenso wie weitere Entscheidungsparameter angepasst werden kann.

1 Hintergrund und Forschungsfrage

Lithium-Ionen-Akkumulatoren, im allgemeinen Sprachgebrauch auch als Lithium-Ionen-Batterien (LIB) bezeichnet, gelten als die führende Energiespeichertechnologie bspw. in Mobilgeräten und Elektrofahrzeugen. Sie zeichnen sich durch ihre hohe Energiedichte bei geringem Gewicht aus, bergen jedoch auch Risiken wie Brand- und Explosionsgefahren, besonders bei unsachgemäßer Handhabung oder Beschädigung [1]. Das Brandrisiko, v. a. in den Recyclingbetrieben [2], gefährdet nicht nur die Mitarbeitenden der Betriebe und die Umwelt, sondern verursacht auch beträchtliche wirtschaftliche Schäden bei diesen Unternehmen. Die resultierende Verminderung essenzieller Kapazitäten in den Aufbereitungs- und Entsorgungsanlagen bewirkt eine allgemeine Schwächung der Kreislaufwirtschaft [3]. Innerhalb der Abfallwirtschaft wird daher immer öfter die Einführung einer Pfandpflicht für LIB gefordert, welche als effektive Möglichkeit zur Reduzierung der Brandereignisse angesehen wird [2, 4]. Im Zentrum dieses Beitrages steht daher die Fragestellung:

1.1 Wie sollte ein Pfandsystem für LIB in Deutschland gestaltet sein, um durch die Erhöhung der Sammelquote die von LIB ausgehenden Brandgefahren bei der Entsorgung effektiv zu minimieren?

Der Fokus liegt dabei auf der Sammlung von Gerätebatterien und solchen für leichte Verkehrsmittel (LV-Batterien) wie Pedelecs, da beide Typen aufgrund ihrer geringen Größe als „abfalltonnengängig“ zu bewerten sind [2]. Zudem wird bei der Konzepterstellung ausschließlich die Rückgabe aus Verbraucher*innenperspektive betrachtet.

2 Aufbau und Durchführung einer Nutzwertanalyse

Um die Forschungsfrage zu beantworten und ein passendes Pfandkonzept zu entwickeln, wurde eine *Nutzwertanalyse (NWA)* durchgeführt. Eine NWA ist ein wichtiges Instrument der multikriteriellen Betrachtung eines Entscheidungsproblems, womit alle relevanten Entscheidungsaspekte berücksichtigt und Entscheidungsalternativen anhand von Kriterien transparent miteinander verglichen werden [5].

2.1 Beschreibung des Entscheidungsproblems und des Ziels

Angesichts der Brandrisiken ist die Gefahrenabwehr mithilfe der Erhöhung der Sammelquoten von LIB das primäre Ziel der Einführung einer Pfandpflicht. Durch die Erhebung eines Pfandes und einer dadurch gesteigerten Sammelmenge von LIB kann die Häufigkeit von Bränden verringert werden. Zudem wird gleichzeitig ein weiteres Ziel erreicht – die Förderung der Ressourceneffizienz [6]. Die NWA orientierte sich jedoch rein am primären Ziel, ein Pfandsystem zu gestalten, das zur Verringerung der Brandrisiken beiträgt.

2.2 Auswahl der Entscheidungsalternativen

Im zweiten Schritt wurden die Entscheidungsalternativen festgelegt, für die nachfolgend der Nutzwert ermittelt wurde. Da keine ausgearbeiteten Alternativen für ein Pfandsystem für LIB vorlagen, galt es ein Konzept zu entwickeln. Dazu wurden mehrere NWA durchgeführt, die sich auf die verschiedenen Parameter zur Entwicklung eines Pfandkonzeptes konzentrieren. Die Entscheidungsparameter und die darunterfallenden Entscheidungsalternativen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Relevante Entscheidungsparameter und entsprechende -alternativen

Zielgegenstände	Sammelorte und -infrastruktur	Kennzeichnung	Pfandhöhe
Lose Gerätealtbatterien (A1.1)	Integration in bestehende Sammelstruktur (A2.1)	Label auf dem Zielgegenstand (A3.1)	5 % des Verkaufspreises (A4.1)
Lose LV-Altzellen (A1.2)	Wertstoffhof (A2.2)	Pfandbon (A3.2)	10 % des Verkaufspreises (A4.2)
Lose Gerätealtbatterien + LV-Altzellen (A1.3)	Verkaufsort (A2.3)	Ausweisung auf dem Kaufbeleg (A3.3)	Festbetrag 50 Cent (A4.3)
Batteriehaltige EAG (A1.4)	Freiwillige Sammelstellen in öffentlichen Einrichtungen (A2.4)	App (A3.4)	Festbetrag 5 € (A4.4)
Batteriehaltige EAG und lose Gerätealtbatterien (A1.5)	Sammelstellen auf Quartiersebene (A2.5)	Pfandkarte (A3.5)	Festbetrag 10 € (A4.5)
Batteriehaltige EAG und lose LV-Altzellen (A1.6)	Sammelmobil (A2.6)		Festbetrag 20 € (A4.6)
Batteriehaltige EAG und lose Gerätealtbatterien + LV-Altzellen (A1.7)	Zentrale Rückgabeautomaten (A2.7)		Festbetrag 50 € (A4.7)
			Gestaffelte Festbeträge 5 - 50 € (A4.8)

2.3 Bestimmung und Gewichtung der Entscheidungskriterien

In diesem Schritt wurden entscheidungsrelevante Kriterien für die Entwicklung eines Pfandsystems festgelegt, die den Nutzen einer Alternative beschreiben [6] (siehe Tab. 2). Die Kriterien leiten sich aus den im Diskurs zum LIB-Pfand betonten Herausforderungen und Anforderungen ab (vgl. [7]). Anschließend wurden sie anhand ihrer Relevanz zur Zielerreichung mittels einer Paarvergleichsmethode [8] gewichtet.

Tabelle 2: Entscheidungskriterien

Abk.	Kriterium	Beschreibung	Gewicht
K1	Geringe Einrichtungskosten	Das Kriterium beschreibt die Investitionen, die zum Aufbau eines LIB-Pfandsystems benötigt werden (z. B. durch Infrastruktur und Schulung der Sammelstellen).	0,07
K2	Geringe Betriebskosten	Laufende Kosten, die durch den Betrieb des Pfandsystems entstehen (z. B. durch organisatorischen, verwaltungstechnischen, logistischen und personellen Aufwand).	0,13
K3	Geringe negative Auswirkungen auf die Wirtschaft	Auswirkungen durch missbräuchliche Nutzung, Einbußen bei Anbieter*innen niedrigpreisiger Produkte, lange Kapitalbindung oder Umgehungsgefahr durch Import.	0,0
K4	Hohe Fairness	Sicherstellung, dass durch das Pfandsystem keine Verbraucher*innengruppen ausgeschlossen werden.	0,2
K5	Hoher Rückgabekomfort	Zeitlicher und logistischer Aufwand für Verbraucher*innen bei der Rückgabe.	0,33
K6	Hohe Sicherheit	Das Pfandsystem sollte hinsichtlich der Rücknahme eine größtmögliche Sicherheit gewährleisten und durch die Rücknahmeangebote auch steigern, um das Brandrisiko so gering wie möglich zu halten.	0,27

Im nächsten Schritt wurden den Kriterienausprägungen Erfüllungsgrade zugeordnet. Um sie trotz unterschiedlicher Dimensionen vergleichbar zu machen, wurden sie durch Skalierung in eine einheitliche Kardinalskala (10er-Skala) mit Bewertungskorridoren als Orientierungshilfe überführt [9].

2.6 Bewertung der Entscheidungsalternativen und Berechnung des Nutzwertes

Die Bewertung der Entscheidungsalternativen und die daran anschließende Berechnung der Nutzwerte auf Basis der vorherigen Schritte erfolgte separat für die vier definierten Parameter. Um final beurteilen zu können, welche Entscheidungsalternative pro Entscheidungsparameter den größtmöglichen Nutzen bringt, wurden (1) die Nutzwertbeiträge je Kriterium durch Multiplikation von Gewichtung und Erfüllungsgrad berechnet, (2) anschließend zum Nutzwert summiert und daraus (3) die Rangfolge der Alternativen abgeleitet [9].

Die im Rahmen der NWA bestimmten Idealalternativen der Parameter sind demnach:

- Zielgegenstände: Batteriehaltige Elektro(nik)altgeräte (EAG) und lose Gerätealtbatterien (A1.5)
- Sammelorte und -infrastruktur: zentrale Rücknahmeautomaten (A2.7)
- Kennzeichnung: Label auf dem Zielgegenstand (A3.1)
- Pfandhöhe: Festbetrag 20 € (A4.6)

Das genaue Vorgehen der Bewertung und Beurteilung ist detaillierter in [7] dargestellt.

2.7 Sensitivitätsanalyse

Angesichts der begrenzten Datenlage und Erfahrungswerte wurde vielfach mit Schätzwerten und Annahmen gearbeitet. Um dadurch bedingte Unsicherheiten über die Richtigkeit oder Genauigkeit der Ergebnisse zu minimieren, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, die die Stabilität der Ergebnisse bei veränderten Inputvariablen, wie der Kriteriengewichtung oder der Bewertung der Alternativen, prüfte [5]. In diesem Zusammenhang wurden die Gewichtungen gleichgesetzt, Gewichtungsspitzen geglättet, Höchst- und Tiefwerte in der Gewichtung weiter gespreizt und die Bewertungen weiter in die Extreme verschoben.

Die Ergebnisse blieben insgesamt stabil, was die Robustheit der favorisierten Alternativen bestätigte. Lediglich beim Parameter „Sammelorte und -infrastruktur“ ergab sich die „Nutzung bestehender Sammelstrukturen“ (A2.1) als mögliche Alternative.

3 Fazit und Empfehlungen zur praktischen Umsetzung

Die NWA identifizierte zwei Konzepte für ein Pfandsystem zur Steigerung der Sammelquote von LIB als Maßnahme zur Gefahrenabwehr batteriebedingter Brände durch unsachgemäß entsorgte LIB. *Konzept 1* zeichnet sich durch spezialisierte Infrastruktur mit hoher Effizienz und Kontrolle aus. Es sieht die Sammlung von batteriehaltigen EAG und losen Gerätealtbatterien (A1.5) *über zentrale Rücknahmeautomaten* (A2.7) vor, wobei die LIB/EAG mit Labeln markiert sind (A3.1) und ein Pfand von 20 € erhoben wird. *Konzept 2* stellt eine weniger aufwändige Alternative dar. Hier werden bestehende Sammelstrukturen (A2.1) genutzt, wobei Rücknahme und Pfandauszahlung durch den Handel, *örE* und freiwillige Sammelstellen erfolgen. Jedoch könnten so viele freiwillige Sammelstellen wegfallen, da die Rücknahme im Rahmen eines Pfandsystems komplexere Strukturen erfordert.

Bei der Einführung eines Pfandsystems sollte die Einbindung eines Clearingmechanismus in jedem Fall vorausgesetzt werden. Dies ist entscheidend, um den Rückgabekomfort für die Verbraucher*innen zu maximieren und somit die Sammelquote zu erhöhen. Eine zentrale Clearingstelle könnte zudem die Einführung eines zweckgebundenen Pfandschlupfs ermöglichen, der durch festgelegte Handlungsrichtlinien zur Förderung von Umwelt- und Ressourcenschutz beitragen könnte.

Da die rechtlichen Vorgaben für Altbatterien und EAG weiterhin einem stetigen Wandel unterliegen, wurde die NWA als flexibles Modell konzipiert. Sie kann speziell im Bereich der Bewertung und Gewichtung kontinuierlich an neue gesetzliche Rahmenbedingungen oder Systemanforderungen angepasst werden. Neben den beiden Pfandkonzepten wurde somit auch ein adaptives Grundmodell für einen LIB-Pfand entwickelt.

Literatur / Quellen

- [1] J. Diekmann, C. Hanisch, K. Froböse, G. Schälicke, T. Loellhoeffel, A.-S. Fölster, A. Kwade (2017): „Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles with Focus on Mechanical Processes“, Journal of The Electrochemical Society, 164(1), A6184 - A6191, doi: 10.1149/2.0271701jes
- [2] R. Brüning, J. Wolf, F. Piehl, S. Löhle, U. Schmiedel, M. Kerkhoff (2023): „Prüfung der Einführung einer Pfandpflicht für lithiumhaltige Batterien und Akkumulatoren“ (Abschlussbericht 60/2023), Umweltbundesamt (Hrsg.). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/60_2023_texte_pruefung_der_einfuehrung_einer_pfandpflicht.pdf
- [3] BDE (2020): „Maßnahmenkatalog für intelligentes Batterierecycling – Sachgerechtes Batterierecycling sichert lokale Recyclingrohstoffe im Wirtschaftskreislauf“, 21.01.2020. <https://www.bde.de/presse/massnahmenkatalog-fuer-intelligentes-batterierecycling/>
- [4] T. Wilfer (2023): „Brände durch Batterien – Entsorger fordern auf Demo in Berlin mehr Unterstützung von Politik und Herstellern“, 10.10.2023, in: EUWID Recycling und Entsorgung, 42/2023. <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/braende-durch-batterien-entsorger-fordern-auf-demo-mehr-unterstuetzung-von-politik-und-herstellern-101023/>
- [5] J. B. Kühnapfel (2021): „Scoring und Nutzwertanalysen: Ein Leitfaden für die Praxis“, Springer Gabler, Wiesbaden, doi: 10.1007/978-3-658-34810-6, ISBN: 978-3-658-34809-0
- [6] H. Wilts (2020): „Pfand auf alles – eine Lösung für geschlossene Wertstoffkreisläufe in einer Kreislaufwirtschaft?“, Studie im Auftrag der Bundestagsfraktion von Bündnis 90/Die Grünen, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (Hrsg.). https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7703/file/7703_Pfand.pdf
- [7] M. Groote, P. Hense (2025): „Entwicklung eines Pfandkonzepts für Lithium-Ionen-Batterien zur Reduktion batteriebedingter Brände durch die Steigerung der Sammelquoten“, in: Müll und Abfall, 1/2025, S. 108 - 115, doi: 10.37307/j.1863-9763.2025.01.03
- [8] H. Schierenbeck, C. B. Wöhle (2016): „Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre“, 19. Aufl., De Gruyter Oldenbourg, Berlin/Boston, ISBN: 978-3110440669
- [9] P. Rinza, H. Schmitz (1977): „Nutzwert-Kosten-Analyse – Eine Entscheidungshilfe zur Auswahl von Alternativen unter besonderer Berücksichtigung nicht monetärer Bewertungskriterien“, VDI-Taschenbücher, VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN: 3-18-403051-2.

Kontakt

Prof. Dr. Peter Hense

Hochschule Bochum, Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen

Tel.-Nr. +49 234 32 10-275

E-Mail: peter.hense@hs-bochum.de

Homepage: www.hochschule-bochum.de/fbb

Umsetzung der zirkulären Wertschöpfung bei Altfenstern

Abstract: Das Bauteil Fenster als wesentlicher Bestandteil der Gebäudeaußenhülle stellt einen bedeutenden Stoffstrom im Bausektor dar. Beim Rückbau oder der Sanierung von Gebäuden fallen große Mengen an Altfenstern an, die ein erhebliches Recyclingpotenzial bieten. Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Erfassung und Verwertung von Altfenstern und deren Komponenten zu analysieren sowie ökobilanzielle Faktoren zur Bewertung der Klima- und Ressourcenrelevanz zu untersuchen. Darauf aufbauend sollen Optimierungspotenziale und Handlungsempfehlungen zur Steigerung der zirkulären Wertschöpfung abgeleitet werden. Diese Masterarbeit erfolgt im Rahmen eines Forschungsprojektes im IWARU im Auftrag führender Verbände und Organisationen der deutschen Fensterbranche.

1 Einleitung

Der Bausektor ist eine der ressourcenintensivsten Branchen in Deutschland und verbraucht etwa 60 % der natürlichen Ressourcen (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2024b). Im Jahr 2022 fielen rund 399 Millionen Tonnen Abfall an, wovon rund 54 % Bau- und Abbruchabfälle ausmachten (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2024a). Angesichts von Materialknappheit, Lieferengpässen, steigenden Materialpreisen und erhöhten Entsorgungskosten besteht auch im Bausektor die Notwendigkeit, die Kreislaufwirtschaft weiter voranzubringen. Ein wesentliches Ziel hierbei ist es, geschlossene Materialkreisläufe zu etablieren, um Ressourcen effizienter zu nutzen und Abfälle zu minimieren.

In diesem Kontext ist das Bauteil Fenster als ein bedeutender Stoffstrom zu werten. Fenster bestehen aus unterschiedlichen Komponenten und Materialien: Rahmen (Kunststoff, Aluminium oder Holz), Glas, Beschlägen und Dichtungen.

Nach Untersuchungen von Conversio fielen 2022 in Deutschland ca. 9-10 Millionen Altfenster an, was einer Gesamtmasse von 460.000-480.000 Mg entspricht (Conversio Market & Strategy GmbH 2023). Angesichts dieser Abfallmengen ist die Umsetzung der zirkulären Wertschöpfungskette für die Altfenster zu betrachten. Ziel dieser Masterarbeit ist das Recyclingpotenzial von Altfenstern zu analysieren, ökobilanzielle Faktoren zur Bewertung der Klima- und Ressourcenrelevanz zu untersuchen sowie Verbesserungspotenziale in diesem Kontext zu identifizieren. Diese Masterarbeit wird im Rahmen eines Forschungsprojektes im IWARU im Auftrag führender Verbände und Organisationen der deutschen Fensterbranche durchgeführt.

2 Methode

Um den derzeitigen Prozess zur Erfassung und Logistik sowie die Verwertungswege von Altfenstern analysieren zu können, wurden intensive Literaturrecherchen, Besichtigungen von Aufbereitungsanlagen, Experten- und Expertinneninterviews sowie eine Online-Umfrage unter den relevanten Stakeholdern entlang

der Wertschöpfungskette von Fenstern durchgeführt. Dabei wurden Erkenntnisse über die Erfassung, den Umgang mit Altfenstern sowie den Bekanntheitsgrad von Recyclinginitiativen wie Rewindo GmbH (Kunststofffenster) und A|U|F e.V. (Aluminiumprofile) gesammelt und ausgewertet.

Für die Betrachtung von ökobilanziellen Faktoren wurden jeweils modellhaft ein Kunststofffenster, ein Aluminiumfenster und ein Holzfenster zusammengestellt. Die hierbei angesetzten Massenanteile der jeweiligen Fensterkomponenten basieren auf den Angaben aus der Massenbilanzierung der Conversio GmbH (Conversio Market & Strategy GmbH 2023). Als weitere Datengrundlagen wurden Umwelt-Produktdeklarationen (EPDs) sowie Datensätze aus der Datenbank der ökobau.dat verwendet. Die Bilanzierung berücksichtigt die Indikatoren Global Warming Potential (GWP), Primärenergiebedarf (PE) und Frischwasserverbrauch (FW) und erfolgt für die Lebenszyklusphasen Herstellung und Errichtung (A1-A5), Entsorgung (C1-C4) sowie das Recyclingpotenzial (D).

Zusätzlich wurde der Einfluss eines Sekundärmaterialeinsatzes für den Rahmen und das Glas hinsichtlich des Parameters GWP analysiert.

3 Ergebnisse

3.1 Erfassung von Altfenstern

Altfenster fallen entweder beim Gebäuderückbau oder bei Sanierungen an. Im Rückbau werden Fenster oft von Abbruchunternehmen maschinell mit der Fassade abgebrochen, sodass das Glas zerstört und mit den Mineralfraktionen entsorgt wird. Bei Sanierungen tauschen im Regelfall Fensterbau- und Montagebetriebe die Fenster aus. Abhängig von Größe der Sanierungsmaßnahme werden die rückgebauten Fenster dann entweder direkt auf der Baustelle oder auf den Betriebshöfen der ausführenden Unternehmen gesammelt (Ausnahme: Für den Austausch von Dachfenstern sind dagegen Dachdeckerbetriebe zuständig. Diese Fenster werden i. d. R. aufgrund der geringen Menge als Bauabfall entsorgt).

Je nach Annahmebedingungen des Entsorgungsunternehmens wird das Glas vorab aus dem Rahmen entfernt. Anschließend werden die Container in entsprechende Aufbereitungsanlage verbracht.

In Deutschland existieren bislang Rücknahmesysteme für Kunststoff- und Aluminiumfenster. Die Rewindo GmbH organisiert die Erfassung und das Recycling von Fenstern, Rollläden und Türen aus Kunststoff (PVC) (Rewindo GmbH 2024). Der A|U|F e.V. engagiert sich für die Rücknahme und das Recycling von Aluminiumprofilen aus dem Hochbau (A|U|F e.V. 2023). Beide Initiativen agieren als Vermittler zwischen den verschiedenen Akteuren entlang der Wertschöpfungskette. Die Ergebnisse der Online-Umfrage zeigen, dass diese Systeme bei Fensterbau- und Montagebetrieben etabliert sind. Bei Architekten und Architektinnen, Projektentwickler/innen, Dachdeckerbetrieben und Abbruchunternehmen sind sie dagegen noch weitgehend unbekannt.

3.2 Verwertungswege

Sortenrein erfasstes PVC aus **Kunststofffenstern** wird werkstofflich recycelt. Das Material wird zerkleinert, sortiert, klassiert und zu Regranulat verarbeitet, das anschließend für neue Fensterprofile genutzt wird. Sekundärmaterial wird jedoch, aufgrund der Anforderungen an die Oberflächenqualität, nur im Kern von Fensterrahmen eingesetzt (Moro und Schlaich 2021).

Aluminiumprofile werden mechanisch und metallurgisch aufbereitet, um Aluminiumchips der spezifischen Fensterprofil-Legierung AlMgSi 0,5 (EN EW 6060) herzustellen. Diese werden in einer Gießerei zu

Pressbolzen geschmolzen, aus denen neue Fensterprofile hergestellt werden können. Der hohe monetäre Wert von Aluminium führt jedoch häufig dazu, dass es direkt an Schrotthändler verkauft oder ins Ausland exportiert wird, wodurch es für den geschlossenen Recyclingkreislauf (Einsatz in Neufenstern) verloren geht.

Das **Rahmenmaterial von Holzfenstern**, die i. d. R. mit Holzschutzmitteln behandelt wurden, werden als Altholz der Kategorie IV eingestuft und dürfen laut AltholzV nicht stofflich verwertet werden. Stattdessen erfolgt eine energetische Verwertung in Anlagen mit Genehmigung nach der 17. BImSchV (Bundesregierung (D) 19.06.2020).

Das **Fensterglas** wird bei der Aufbereitung der verschiedenen Fenstertypen im Regelfall zerstört oder gilt bei der Aufbereitung der Rahmenmaterialien als Störstoff und wird aussortiert. Auf Grund der Scherbengröße und den z. T. vorhandenen Verunreinigungen werden die Anforderungen für ein Flachglasrecycling überwiegend nicht erfüllt. Die Glasscherben werden stattdessen nach einem mehrstufigen Aufbereitungsprozess in der Hohlglas- und Glasperlenindustrie oder als Dämmmaterial verwertet.

Die **metallhaltigen Fraktionen**, wie Fensterbeschläge und die Armierung aus dem PVC-Rahmen, werden bei der Aufbereitung von Altfenstern aussortiert und stofflich verwertet.

3.3 Ökobilanzielle Faktoren

Aus der ökologischen Bilanzierung resultiert, dass die Herstellungsphasen (A1-A3) beim Kunststoff-, Aluminium- und Holzfenster den größten Einfluss auf den Lebenszyklus des jeweiligen Fensters in den drei Indikatoren haben. Eine detaillierte Betrachtung der Fensterkomponenten hinsichtlich dieser Phasen zeigt, dass insbesondere der reine PVC-Rahmen (ohne Stahlarmierung) und der reine Aluminiumrahmen (ohne Isoliersteg) maßgeblich zur Bilanz des jeweiligen Fensters beitragen. Aufgrund seines hohen Massenanteils hat auch das Glas einen erheblichen Einfluss. Beim Holzrahmen wird im Hinblick auf das GWP der biogene CO₂-Speichereffekt negativ angerechnet, verzeichnet aber dafür einen hohen Energiebedarf. Beschläge weisen trotz ihres geringen Masseanteils einen vergleichsweise hohen Frischwasserverbrauch auf.

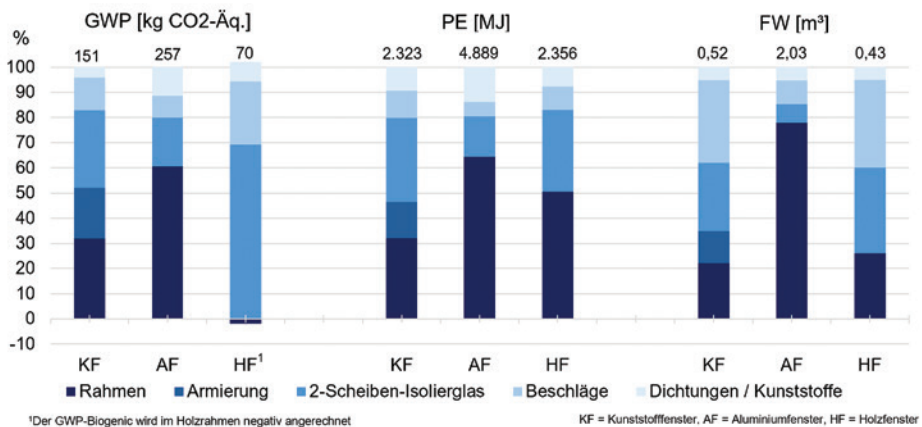


Abbildung 1: Anteile der Fensterkomponenten auf die Indikatoren GWP, Gesamtprimärenergiebedarf (PE) und Frischwasserverbrauch (FW) in den **Herstellungsphasen (A1-A3)** (Eigene Berechnungen)

Das Holzfenster zeigt in den Herstellungsphasen (A1-A3) im Vergleich zu Kunststoff- und Aluminiumfenstern einen geringeren GWP. In den späteren Lebenszyklusphasen hat jedoch die Abfallbehandlung (C3) als Teil der Entsorgung einen erheblichen Einfluss auf den Indikator GWP für das Holzfenster.

PVC-Rahmen enthalten bereits standardmäßig einen Rezyklatgehalt von 20 % (Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) 2022), Aluminiumrahmen von etwa 30–40 % (A|U|F e.V. 2021), während Holzrahmen derzeit keinen Rezyklatanteil aufweisen. Bei der Produktion von Flachglas werden etwa 20 % Glasscherben eingesetzt, jedoch handelt es sich dabei überwiegend um Pre-Consumer-Scherben (Müller 2018). Eine Erhöhung der Rezyklatanteile bei PVC und Aluminium kann deutliche Einsparungen bei den CO₂-Emissionen bewirken.

4 Optimierungspotenziale und Handlungsempfehlungen

Auf Basis der ausgewerteten Erkenntnisse wurden u. a. folgende Optimierungsansätze abgeleitet:

- **Steigerung der Bekanntheit durch Ausbau der vorhandenen Netzwerke (Rewindo, A|U|F, etc.)**
Hier empfiehlt sich eine stärkere Präsenz auf branchenspezifischen Veranstaltungen, bei denen die Vorteile wie die CO₂-Einsparung durch den Einsatz von Sekundärmaterial hervorgehoben werden.
- **Verankerung der Fensterdemontage und Rücknahmesysteme in Ausschreibungstexten und Leistungsverzeichnissen**
Der Nachweis über die Rückgabe kann über ein Zertifikat erfolgen, das den beteiligten Stakeholdern ausgehändigt wird.
- **Einführung eines Rücknahmesystems für Glas**
Glasscheiben können in hoher Qualität gesammelt und effizient verwertet werden, um das Flachglasrecycling zu fördern.
- **Sammlung ausgebaute Dachfenster über den Dachdeckerhandel**
Ausgebaute Dachfenster können über den Dachdeckerhandel zentral erfasst, auf dem Betriebshof gesammelt und als größere Menge einer Aufbereitungsanlage zugeführt werden.
- **Analytik zur Behandlung von Holzfenstern**
Bei Holzrahmen sind die tatsächlichen Belastungen durch Holschutzmittel zu überprüfen und mit den Grenzwerten der Altholzkategorien der AltholzV zu vergleichen, um evtl. die Möglichkeit einer stofflichen Verwertung rechtlich zu verankern.

Literatur/Quellen

- A|U|F e.V. (Hg.) (2021): A|U|F-Wertstoff-Studie. Der geschlossene Wertstoffkreislauf für Aluminium-Altmaterial aus dem Hochbau. Frankfurt am Main.
- A|U|F e.V. (Hg.) (2023): Nachhaltigkeit und Verantwortung - Ökologie und Ökonomie. Eine Broschüre des A|U|F e.V. - Aluminium und Umwelt im Fenster- und Fassadenbau. Frankfurt am Main.
- Bundesregierung (D) (19.06.2020): Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV). AltholzV. Fundstelle: BGBl. I S. 1328. Online verfügbar <https://www.gesetze-im-internet.de/altholzV/AltholzV.pdf> (zuletzt aufgerufen 10.01.2025)
- Converso Market & Strategy GmbH (Hg.) (2023): Abfallmengenszenario und Value Chain für Fenstersysteme in Deutschland. Mainz

- Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) (Hg.) (2022): UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach ISO 14025 und EN 15804+A2. Kunststofffenster (1,23 m x 1,48 m) mit 2-Scheiben-Isolierglas, Berlin
- Moro, José Luis; Schlaich, Jörg (2021): Baukonstruktion - vom Prinzip zum Detail. 3. Auflage, Springer Vieweg; Berlin, Heidelberg; ISBN: 9783662641545
- Müller, Anette (2018): Baustoffrecycling, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-22987-0
- Rewindo GmbH (Hg.) (2024): Kunststofffensterrecycling heißt Wertstoffe erhalten und die CO₂-Belastung reduzieren. Online verfügbar: <https://rewindo.de/> (zuletzt aufgerufen 10.01.2025)
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2024a): Abfallbilanz 2022. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2024b): Umweltökonomische Gesamtrechnungen (UGR) Gesamtwirtschaftliches Materialkonto. Berichtszeitraum 1994-2022. Wiesbaden.

Kontakt

Katrin Große Scharmann, Wissenschaftliche Mitarbeiterin

FH Münster, IWARU - Arbeitsgruppe Ressourcen

Tel.-Nr. 0251 83-65918

E-Mail: katrin.grosse-scharmann@fh-muenster.de, Homepage: www.fh-muenster.de/iwaru

Biologische Abbaubarkeit und Umweltverträglichkeit von Textilien aus Bio-Baumwolle und Polycotton

Abstract: Die konventionelle Textil- und Bekleidungsindustrie weist einen hohen Ressourcenverbrauch sowie wachsende Textilabfallmengen auf, was erhebliche negative Umweltauswirkungen zur Folge hat. Gleichzeitig gewinnen aber auch der Aspekt der Nachhaltigkeit sowie das Konzept der Kreislaufwirtschaft immer mehr an Bedeutung. Dies impliziert, dass Textilien so produziert werden sollten, dass eine gezielte und ohne weitere Umweltbelastungen erfolgende Rückführung in den natürlichen Kreislauf am Ende ihrer Lebensdauer gewährleistet ist. In diesem Kontext wurde die biologische Abbaubarkeit von Textilien aus zertifizierter Bio-Baumwolle und Polycotton analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Textilien aus Bio-Baumwolle innerhalb von 28 Tagen nahezu vollständig aerob abgebaut wurden, während das Mischgewebe nach vier Wochen lediglich einen Gewichtsverlust von etwa 30 % aufwies. Im Rahmen der anaeroben Vergärung wurde eine signifikant höhere Methanproduktion durch Bio-Baumwolle im Vergleich zu Mischgewebe festgestellt. Zudem konnten anhand von Kresstests keine ökotoxikologischen Bedenken hinsichtlich beider Materialtypen identifiziert werden. Die Resultate bekräftigen die höhere biologische Abbaubarkeit von Textilien aus Bio-Baumwolle und unterstreichen die Relevanz einer verstärkten Fokussierung auf kreislauffähige Materialien in der Textilproduktion.

1 Einleitung

Die Produktion und der Konsum von Textilien haben signifikante Auswirkungen auf die Umwelt, das Klima und die Gesellschaft. Die kontinuierliche Veränderung von Trends resultiert in kürzeren Produktlebenszyklen, einem steigenden Rohstoffbedarf sowie einer Zunahme von Textilabfällen entlang der gesamten Wertschöpfungskette (Jeihanipour & Taherzadeh, 2009).

Die Textilproduktion sieht sich folglich mit komplexen ökologischen Herausforderungen konfrontiert. Der konventionelle Baumwollanbau wird aufgrund seines erheblichen Ressourcenverbrauchs und Pestizideinsatzes zunehmend kritisch betrachtet, was zu einer steigenden Nachfrage nach biologisch angebaute Baumwolle führt (Sajn, 2021). Gleichzeitig hat die Produktion synthetischer Fasern, insbesondere von Polyester, signifikant zugenommen und macht etwa 65 % der globalen Textilfaserproduktion aus (FEMNET e.V., 2020). Obwohl ein beträchtliches Recyclingpotenzial besteht, werden über 80 % der Polyesterprodukte nicht wiederverwertet, was erhebliche Umweltprobleme zur Folge hat (Quartinello et al., 2017; Yousef et al., 2020). Zudem haben sich Mischgewebe wie Polycotton etabliert, die am Ende ihres Lebenszyklus nur erschwert recycelt werden können (Kahoush & Kadi, 2022).

Im Jahr 2022 wurde in Österreich ein Textilabfallaufkommen von etwa 227.796 Tonnen verzeichnet. Dabei weist die bisherige Entsorgungspraxis Optimierungspotenziale auf. Es konnte festgestellt werden, dass 93 % der Textilabfälle einer thermischen Verwertung unterzogen werden, während lediglich 2 % der Abfälle dem Secondhand-Markt zugeführt und insgesamt nur 2 % recycelt werden (Bernhardt et al., 2024). Darüber hinaus sind etwa 52 % aller Textilabfälle im Siedlungsabfall zu finden, was eine effiziente Ressourcenrückgewinnung signifikant erschwert (Bernhardt et al., 2024). In Bezug auf diese Problematik sieht die EU-Strategie für nachhaltige und kreislauffähige Textilien vor, dass die Mitgliedstaaten der Europäischen Union ab dem Jahr 2025 Textilabfälle getrennt sammeln müssen. Die neue Strategie der Kommission beinhaltet zusätzliche Maßnahmen zur Regulierung gefährlicher Chemikalien sowie die Intention, Verbraucher:innen bei der Auswahl nachhaltiger Textilien zu unterstützen. Darüber hinaus werden Hersteller:innen dazu angehalten, die Verantwortung für ihre Produkte entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu übernehmen, auch im Falle einer späteren Abfallentstehung (L 150/109, 2018).

Angesichts der Notwendigkeit einer effizienteren Nutzung von Ressourcen sowie einer signifikanten Reduzierung der Emissionen von Treibhausgasen lassen sich zunehmend Bestrebungen beobachten, Prozesse, Produkte und Dienstleistungen auf nachhaltige Weise zu gestalten. In diesem Kontext erfolgt eine kritische Hinterfragung der gegenwärtigen Nutzung von Textilien und Bekleidung sowie der Behandlung nach Gebrauch. Ein wesentliches Kriterium ist dabei die Gewährleistung einer rückstandsfreien biologischen Abbaubarkeit, welche den gesamten Produktlebenszyklus abdeckt. Dieser reicht von der Rohstoffgewinnung über die Textilherstellung und -nutzung bis hin zur geordneten Entsorgung und Rückführung in den Naturkreislauf einschließlich einer kaskadischen Fasernutzung. Eine effiziente Sammellogistik stellt eine weitere wesentliche Voraussetzung für die Erreichung einer hohen Recyclingquote dar. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde der biologische Abbau von Textilien untersucht.

2 Methodik

2.1 Beschreibung Textilproben

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Textilien beprobt. Die erste Probe bestand zu 100 % aus Bio-Baumwolle, die sowohl nach dem Cradle to Cradle Certified ® als auch nach dem Global Organic Textile Standard (GOTS) zertifiziert war. Die zweite Probe, ein Polycotton, setzte sich aus einer Mischung von 50 % der oben genannten zertifizierten Bio-Baumwolle und 50 % einer synthetischen Faser zusammen, deren Eigenschaften mit denen von Polyester vergleichbar waren. Diese Synthetikfaser war ebenfalls nach dem Cradle to Cradle Certified ® Prinzip zertifiziert, was bedeutet, dass sie für einen geschlossenen Materialkreislauf konzipiert worden war.

2.2 Untersuchung der Abbaubarkeit

Im Rahmen der Bewertung des aeroben Abbaus der Textilien wurden die Proben für unterschiedliche Zeiträume Komposterde ausgesetzt. Die Erdeingrabung folgte leicht abgewandelt der ÖNORM EN ISO 1172-1. Aufgrund des Zuschnitts der Mischgewebeproben gemäß ÖNORM lag der durchschnittliche Baumwollanteil pro Probe bei ca. 38 %, der durchschnittliche Synthefaseranteil bei ca. 62 %. Folgende physio-chemischen Analysen wurden während der gesamten Laufzeit des Erdeingrabetests durchgeführt: TR und oTR (ÖNORM EN 15934:2021 und ÖNORM EN 15935:2012); pH (ÖNORM EN L1061-88); Leitfähigkeit (ÖNORM S2023). Das Biogaspotential 21d der Textilien wurde nach VDI 4630 bestimmt. Die Proben wur-

den zu diesem Zweck auf eine Größe von 1 cm x 1 cm zugeschnitten. Hierbei ergab sich beim Mischgewebe ein Anteil von 50 % Baumwolle und 50 % Synthetikfaser. Die ökotoxikologische Bewertung (Kressetest) wurde gemäß der ÖNORM S 2210:2019 02 01 durchgeführt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse des Erdeingrabetests zeigten, dass die analysierten Stoffproben aus Bio-Baumwolle nach einer Dauer von vier Wochen einen signifikanten Abbau aufwiesen, so dass die Proben nicht mehr auffindbar waren. Demgegenüber wiesen die Stoffproben aus Polycotton im gleichen Versuchszeitraum einen Gewichtsverlust von ca. 30 % auf, wobei lediglich der Polyesteranteil auffindbar war. Der prozentuale Gewichtsverlust entsprach in etwa dem Baumwollanteil der jeweiligen Stoffprobe, was darauf hinweist, dass der Abbau ausschließlich im Baumwollanteil stattgefunden hat (Abbildung 1). Auch eine Verlängerung der Verweildauer auf fünf Monate führte zu keinem weiteren Gewichtsverlust.

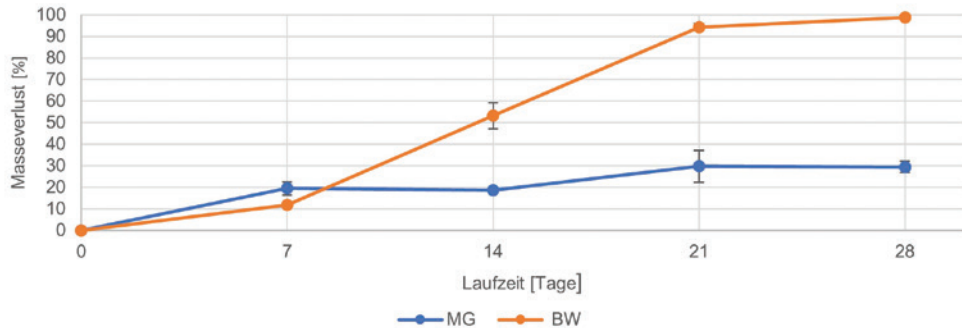


Abbildung 1: Masseverlust der Stoffproben aufgrund des biologischen Abbaus während des Erdeingrabetests.

MG = Mischgewebe (Polycotton); BW = Baumwolle

Die in Abbildung 2 dargestellten Ergebnisse zeigen die Methanerträge der untersuchten Textilproben. Die Baumwollfasern, deren Hauptbestandteil Cellulose ist, wiesen einen spezifischen Methanertrag von 352 mL_N/g oTR auf. In vergleichbaren Untersuchungen wurden Werte von 342 mL_N/g oTR (Jin et al., 2022) bis 421 mL_N/g oTR (Zheng et al., 2013) beschrieben. Im Rahmen des gleichen Versuchszeitraums wurde für Proben aus Mischgewebe ein Methanertrag von 154 mL_N/g oTR erzielt, was weniger als 50 % der mit Baumwolle erzielten Menge entspricht. In einer ähnlichen Untersuchung mit Jeansmaterial, das zu 40 % aus Polyester und zu 60 % aus Baumwolle bestand, konnte ein Methanpotenzial von rund 170 mL_N/g oTR nachgewiesen werden (Hasanzadeh et al., 2018).

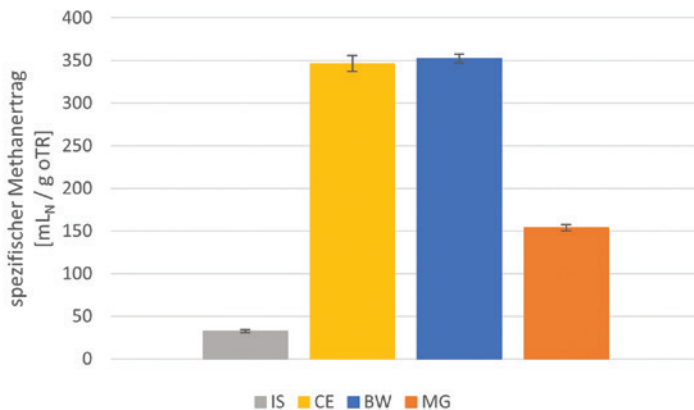


Abbildung 2: Methanerträge der Textilproben in g oTR. IS = Impfslamm (= Nullprobe), CE = mikrokristalline Cellulose (= Kontrolle), BW = Baumwolle, MG = Mischgewebe

Aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Schadstoffen im Boden eignet sich Kresse besonders gut als Indikator für Kompost- oder Bodenqualität (Smolinska & Leszczynska, 2017). Die Ergebnisse der offenen Kresstests sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Kresse, die im Testsubstrat aus den Erdeingrabetests kultiviert wurde, erzielte höhere Biomasseerträge als die Kresse in den Kontrollböden. Allerdings war dieser Unterschied nicht signifikant ($p > 0,05$). Des Weiteren traten keine signifikanten Veränderungen in Form von Gelbfärbung, Schimmelbildung oder unangenehmen Gerüchen auf. Die Ergebnisse wiesen darauf hin, dass durch den mikrobiellen Abbau der Stoffproben keine Schadstoffe oder Phytotoxine in das Testsubstrat gelangt waren.

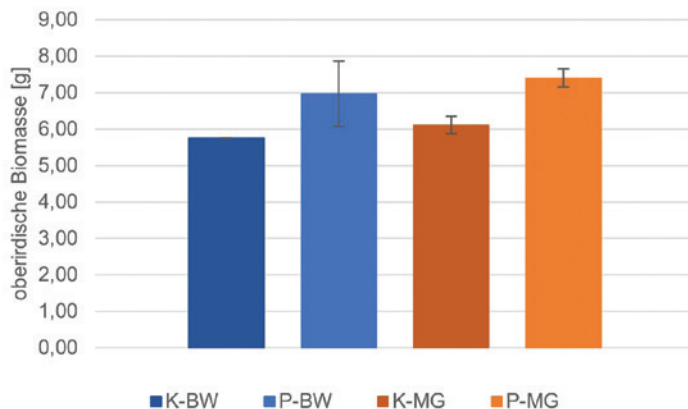


Abbildung 3: Kresstest zur Untersuchung der ökotoxikologischen Unbedenklichkeit des Testsubstrates nach dem Erdeingrabetest. K-BW = Kontrolle, P-BW = Testsubstrat nach Abbau der Baumwolle, K-MG = Kontrolle, P-MG = Testsubstrat nach Abbau des Mischgewebes

4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Untersuchung belegten, dass die untersuchten Stoffproben, welche aus 100 % Bio-Baumwolle bestehen, sowohl unter aeroben als auch anaeroben Bedingungen eine gute biologische Abbaubarkeit aufweisen. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass die Textilien aus Baumwolle nach Ende ihres Lebenszyklus ohne Rückstände in den Naturkreislauf zurückgeführt werden können. Im Fall einer anaeroben Behandlung erzeugt ihre Biomasse zudem regenerative Energie in Form von Biogas. Im Gegensatz dazu konnte nachgewiesen werden, dass die untersuchten Stoffproben aus Mischgewebe unter den vorherrschenden Laborbedingungen und innerhalb des Beobachtungszeitraums nur teilweise abgebaut werden konnten, und sich der Abbau dabei auf den Baumwollanteil beschränkte. In Bezug auf das Recycling stellt das Mischgewebe demnach eine signifikante Herausforderung für Recyclingprozesse dar. Die Trennung der verschiedenen Faserarten ist nicht nur sehr aufwendig, sondern in vielen Fällen auch wirtschaftlich nicht rentabel. Es bestehen Bestrebungen, innovative Technologien für das Recycling von Mischgeweben zu entwickeln, um eine effizientere Verwertung dieser Materialien zu ermöglichen. Ein solcher Fortschritt könnte einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Effizienz und Effektivität bei der Wiederverwertung von Mischgeweben leisten und den Kreislauf für diese Materialien schließen. Nichtsdestotrotz bleiben die effektive Sammlung und Verwertung von Mischgeweben eine große Herausforderung, da die Technologien und Prozesse für das Recycling von gemischten Textilien noch nicht so weit fortgeschritten sind.

Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen von Projekten durchgeführt, welche durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) mittels Innovationsschecks mit Selbstbehalt gefördert wurden. Ein besonderer Dank gilt Mary Rose ® / PAPTEX Textilhandels GmbH für ihre Unterstützung und wertvolle Zusammenarbeit bei der Durchführung der Projekte.

Literatur/Quellen

- Bernhardt, A., Brandstätter, C., Broneder, C., Gold, C., Neubauer, C., Oliva, J., Roll, M., Schaffernak, A., Stoifl, B., Tesar Maria, Wankmüller-Tista, M., Walter, B. & Weißenbach, T. (2024, 15. Mai). Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich: Statusbericht 2024 für das Referenzjahr 2022. https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/bundes_awp/bawp2023.html
- Richtlinie (EU) 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, 61 (2018). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1528981579179&uri=CELEX:32018L0851>
- FEMNET e.V. (2020). FEMNET-Factsheet: Klimaschäden durch die Bekleidungsindustrie. <https://femnet.de/informationen/materialien-medien/broschueren-flyer/fuer-verbraucher-innen/1463-femnet-factsheet-klimaschaeden-durch-die-bekleidungsindustrie.html>
- Hasanzadeh, E., Mirmohamadsadeghi, S. & Karimi, K. (2018). Enhancing energy production from waste textile by hydrolysis of synthetic parts. *Fuel*, 218, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.035>

- Jeihanipour, A. & Taherzadeh, M. J. (2009). Ethanol production from cotton-based waste textiles. *Bioresource Technology*, 100(2), 1007–1010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.020>
- Jin, W., Dai, Z., Wang, L., Cai, F., Song, C., Liu, G. & Chen, C. (2022). Recycling different textile wastes for methane production: Morphological and microstructural changes and microbial community dynamics. *Waste management (New York, N.Y.)*, 151, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.07.018>
- Kahoush, M. & Kadi, N. (2022). Towards sustainable textile sector: Fractionation and separation of cotton/polyester fibers from blended textile waste. *Sustainable Materials and Technologies*, 34, e00513. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00513>
- Quartinello, F., Vajnhandl, S., Volmajer Valh, J., Farmer, T. J., Vončina, B., Lobnik, A., Herrero Acero, E., Pellis, A. & Guebitz, G. M. (2017). Synergistic chemo-enzymatic hydrolysis of poly(ethylene terephthalate) from textile waste. *Microbial biotechnology*, 10(6), 1376–1383. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12734>
- Sajn, N. (2021, 8. Mai). Environmental impact of the textile and clothing industry: What consumers need to know - Think Tank. https://www.europarl.europa.eu/thinktank/de/document.html?reference=EPRS_BRI%282019%29633143
- Smolinska, B. & Leszczynska, J. (2017). Photosynthetic pigments and peroxidase activity of *Lepidium sativum* L. during assisted Hg phytoextraction. *Environmental science and pollution research international*, 24(15), 13384–13393. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8951-3>
- Yousef, S., Tatarants, M., Tichonovas, M., Kliucininkas, L., Lukošiušė, S.-I. & Yan, L. (2020). Sustainable green technology for recovery of cotton fibers and polyester from textile waste. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120078. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120078>
- Zheng, W., Phoungthong, K., Lü, F., Shao, L.-M. & He, P.-J. (2013). Evaluation of a classification method for biodegradable solid wastes using anaerobic degradation parameters. *Waste management (New York, N.Y.)*, 33(12), 2632–2640. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.015>

Kontakt

Livia Hökl (Wissenschaftliche Mitarbeiterin)
Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur
Arbeitsbereich Umwelttechnik
Tel.-Nr. +43 512 507 - 62128
E-Mail: livia.hoekl@uibk.ac.at
Homepage: www.uibk.ac.at/umwelttechnik

Analyse der Auswirkungen der Implementierung von R-Strategien auf Materialflüsse im Bausektor und Implikationen für zukünftige Stoffströme im Ruhrgebiet

Abstract: In Deutschland stellen mineralische Bauabfälle mit rund 220 Millionen Tonnen jährlich den größten Abfallstrom dar. In verschiedenen Studien wurden bereits die Materialströme in städtischen Gebieten untersucht. Bestehende MFA-Modelle haben das 9R-Framework von Potting et al. (2017) zur Erreichung einer ganzheitlichen Kreislaufwirtschaft nicht vollständig berücksichtigt. Dieses Poster fasst die Ergebnisse eines Forschungsprojektes zu den Auswirkungen von Kreislaufwirtschaftsstrategien im Bausektor des Ruhrgebiets durch eine Materialflussanalyse (MFA) zusammen. Diese Forschung wendet die MFA an, um Materialflüsse zu bewerten, und konzentriert sich dabei auf Strategien wie adaptive Wiederverwendung (reuse), selektiver Rückbau (rethink), Recycling (recycle) und Karbonatisierung (rethink). Die Ergebnisse zeigen eine Verringerung des Einsatzes von Primärrohstoffen um 58 %, insbesondere einen Rückgang von Sand und Kies um 1,1 Millionen Tonnen. Trotz eines Anstiegs hochwertiger Abfälle aufgrund des selektiven Rückbaus könnten die CO₂-Emissionen gesenkt werden. Diese Studie liefert wertvolle Erkenntnisse zur Verbesserung der Ressourceneffizienz und der Abfallverringerung in der Bauindustrie.

1 Einleitung

Die Bauindustrie birgt ein beträchtliches Potenzial für die Implementierung der Kreislaufwirtschaft sowie die Etablierung nachhaltiger Baupraktiken. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Bau neuer Gebäude mit einem signifikanten Ressourcenverbrauch einhergeht. Gleichzeitig entstehen Bau- und Abbruchabfälle im Rahmen von Neubau-, Renovierungs- und Umbaumaßnahmen. In Bezug auf die Menge stellen Bau- und Abbruchabfälle mit einem jährlichen Aufkommen von ca. 220 Mio. t an mineralischen Bauabfällen den größten Abfallstrom in Deutschland dar (Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V., 2023). In Anbetracht des Übergangs von einer linearen zu einer zirkulären Wirtschaft können Strategien aus der Circular Economy (CE) als Instrumente dienen, um die Ressourceneffizienz zu steigern, Abfall zu minimieren und nachhaltige Baupraktiken zu fördern.

Das Forschungsprojekt widmet sich der Untersuchung der Auswirkungen der Implementierung von CE-Strategien im Bausektor des Ruhrgebiets durch die Durchführung von Materialflussanalysen (MFA). Die MFA erweist sich als nützliches Instrument zur Analyse und Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft. In der wissenschaftlichen Literatur finden sich bereits Modelle zur MFA, welche den Zu- und Abfluss von Baumaterialien in der Bauindustrie darstellen, beispielsweise Lederer et al., 2020, Meglin et al., 2022, Tazi et al., 2021. Allerdings wurden in diesen Modellen bislang keine Szenarien verknüpft, welche die Umsetzung

des 9R-Frameworks nach Potting et al. (2017) direkt berücksichtigen, um eine ganzheitliche Kreislaufwirtschaft im Bausektor zu schaffen. Die Berücksichtigung dieser Forschungslücke ist von Relevanz, da die Integration des 9R Frameworks potenziell Verbesserungen hinsichtlich der Ressourceneffizienz und Abfallminimierung mit sich bringen kann. Die Implementierung der durch das 9R-Framework implizierten Strategien in MFA könnte neue Erkenntnisse und praktische Ansätze für die Bauindustrie liefern, in diesem Fall insbesondere im Ruhrgebiet.

2 Methodik

Im Rahmen der Untersuchung findet die Software STAN als MFA-Tool Anwendung. Die Analyse stützt sich auf frühere Untersuchungen des Gebäudebestands im Ruhrgebiet, die die Basis für die Stoffstromanalyse bilden (Jegen et al., 2025). Die zeitliche Systemgrenze der MFA ist das Jahr 2023. Es wurden nur die im Ruhrgebiet verbrauchten Baustoffe und anfallenden Bauabfälle betrachtet. In anderen Studien wurden bereits die städtischen Gebiete von Wien (Lederer et al., 2020) und München (Heinrich et al., 2019) untersucht, die sich städtebaulich vom Ruhrgebiet unterscheiden. Die Analyse über Materialflüsse im Kontext eines weiteren Städtebautyps unter Berücksichtigung anderer Szenarien könnte zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen führen. Abbildung 1 fasst die Methodik zusammen.

Im ersten Schritt erfolgt die Berechnung der Materialströme in der Bauindustrie im Jahr 2023. Zu diesem Zweck wird eine Analyse statistischer Daten, technischer und rechtlicher Standards durchgeführt, um die derzeitige Menge an im Ruhrgebiet verfügbaren Bau- und Abbruchabfällen und die Nachfrage nach recycelten Materialien zu ermitteln. Zur Berechnung der erforderlichen Baumaterialien und Rohstoffe wurde ein Bottom-up-Ansatz gewählt. Die statistischen Daten aus NRW werden genutzt, um die Anzahl der fertiggestellten Wohn- und Nichtwohngebäude im Jahr 2023 pro Kreis und kreisfreier Stadt zu ermitteln (Information und Technik Nordrhein-Westfalen, 2023). Anschließend wird die Nettogeschossfläche mit dem Material Coefficient Index (MCI) aus der IÖR-Datenbank multipliziert, um die Materialströme zu berechnen (Leibniz-Institut für Ökologische Raumentwicklung (IÖR), 2023). Anhand der Daten der IÖR-Datenbank und den statistischen Daten NRW werden außerdem die benötigten Rohstoffe für den Hochbau und entstehenden Bau- und Abbruchabfälle und die zugehörigen Abfallkategorien ermittelt (Leibniz-Institut für Ökologische Raumentwicklung (IÖR), 2023, Information und Technik Nordrhein-Westfalen, 2023). Die Verteilung der Abfallströme basiert auf den Daten des Bundesverbandes Baustoffe – Steine und Erden e.V. (2023).

Anschließend werden in der Studie verschiedene Implementierungen der CE als Szenario betrachtet. Die Implementierungen wurden gemäß den von Potting et al. (2017) [5] definierten CE R-Imperativen analysiert und umfassen die folgenden Maßnahmen: *adaptive reuse* von Gebäuden (R3 Reuse), Selektiver Rückbau (R1 Rethink), R-Beton (R8 Recycle), R-Zement (R8 Recycle) und Karbonatisierung von rezyklierter Gesteinskörnung (R1 Rethink).

Bei der Implementierung des *adaptive reuse* wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass alle Gebäude, die aus Gründen der Erneuerung abgerissen werden sollten, erhalten bleiben. In dem Szenario werden die betreffenden Gebäude nicht mehr abgerissen, was sich auf die Entstehung der Bau- und Abbruchabfälle und den Neubau von Gebäuden auswirkt (Information und Technik Nordrhein-Westfalen, 2023). Weiterhin geht diese Arbeit davon aus, dass durch die Etablierung von besserem selektiven Rückbau die Quote reines Betonabbruchs von 40% auf 75% verbessert werden kann (Schiller et al., 2022). Für die Implementierung von R-Beton wurde die DIN 4226 als Berechnungsgrundlage verwendet. Für diese Analyse wurde angenommen, dass die Hälfte des verwendeten R-Betons aus rezyklierten Gesteinskörnungen der Typen 1 und 2 besteht. Die Substitution von Zementklinker durch Rohmischung wird in Österreich bereits mit Bau-

schutt praktiziert, was als Grundlage für die Ermittlung der Implementierung von R-Zement im Ruhrgebiet angenommen wird. Laut Literatur können bis zu 20 % des derzeit in der österreichischen Zementindustrie verwendeten Rohmaterials durch Recyclingmaterial aus mineralischem Bauschutt ersetzt werden (Zeithofer et al., 2018, Lederer et al., 2020). Für die Karbonatisierung von rezyklierter Gesteinskörnung wurde zur Abschätzung der Speicherkapazität dieser die potentielle Speicherung von 10 kg CO₂ pro Tonne angenommen (Hron et al., 2024) und mit der Masse des Materials im Abfallstrom 170101 multipliziert.

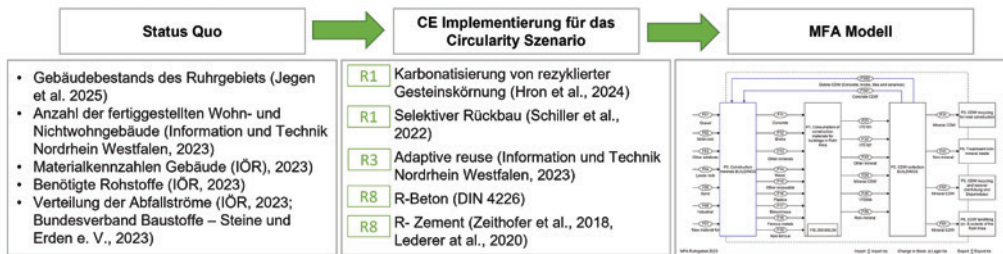


Abbildung 1: Methodik zur Aufstellung der MFA

3 Ergebnisse

Die MFA betrachtet sieben Materialflüsse zur Baustoffproduktion, neun verschiedene Baumaterialgruppen und sechs verschiedene Abfallkategorien für das Bezugsjahr 2023. Die Resultate der Stoffstromanalyse demonstrieren in der Szenariobetrachtung unter Berücksichtigung der genannten R-Strategien eine quantitative Veränderung hinsichtlich des Einsatzes von Primärrohstoffen um 58 %. Diesbezüglich ist insbesondere eine Veränderung des Kieseinsatzes von 2,1 Millionen Tonnen auf 1,0 Millionen Tonnen zu verzeichnen. Des Weiteren ist eine Reduktion der entstehenden Baurestmassen um 66 % festzustellen. Gleichzeitig zeigt das Szenario einen Anstieg des Abfallstroms 170101. Dieser Zuwachs ist in erster Linie auf die verstärkte Anwendung des selektiven Rückbaus zurückzuführen. Trotz des Rückgangs der Baurestmassen ist somit ein Anstieg von qualitativ hochwertigem Bauabfall zu verzeichnen, was die Wiederverwendung und das Recycling von Materialien potenziell fördern könnte. Insgesamt verzeichnet sich durch die Anwendung des zirkulären Bauens ein Rückgang von CO₂Emissionen. Diese Analyse zeigt, dass die Umsetzung des *adaptive reuse* einen stärkeren Einfluss auf die CO₂-Reduktion hat als die Karbonatisierung. Dies deutet darauf hin, dass Baupraktiken und deren Notwendigkeit überdacht werden müssen, bevor gebaut und CO₂ produziert wird, das im nächsten Schritt aufgefangen werden muss.

Ein weiteres interessantes Ergebnis ist, dass die Kreise und kreisfreien Städte sich bilanziell eigenständig mit Recyclingbaustoffen versorgen können, auch im Fall, wenn R-Zement und R-Beton im Ruhrgebiet implementiert werden.

4 Wissenschaftlicher Beitrag

Die Resultate dieser MFA verschaffen Entscheidungsträgern im Ruhrgebiet einen Überblick über Materialbestände und -flüsse im Städtebau unter der Betrachtung von CE Implementierung. Die MFA zeigt, dass durch die Umsetzung zirkulärer Baupraktiken der Einsatz von Primärrohstoffen reduziert, Baurestmassen

verringert und CO₂-Emissionen gesenkt werden können. Durch die detaillierte Untersuchung der Material- und Abfallströme werden gezielte Handlungsmöglichkeiten zur Verbesserung der Ressourceneffizienz, Abfallreduzierung und Förderung der Wiederverwendung von Baumaterialien aufgezeigt. Die Analyse potenzieller Veränderungen von Stoffströmen und voraussichtlicher Abfallmengen ist für die Bewirtschaftung von Recyclinganlagen und Deponien von Nutzen. Die Maßnahmen können nicht nur im Ruhrgebiet, sondern auch in anderen Regionen Anwendung finden.

Danksagung

Die Autorin Pauline Jegen bedankt sich für die Möglichkeit, Teile dieser Arbeit während ihres Forschungsaufenthalts an der TU Wien in der Forschungsgruppe Partikeltechnologie, Recyclingtechnologie und Technikbewertung unter der Betreuung von Dr. Jakob Lederer bearbeitet zu haben. Außerdem bedankt sich Pauline Jegen für das INZIN-Stipendium finanziert von Remondis.

Literatur/Quellen

- Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. (2023): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020: Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020. Berlin.
- Heinrich, M.A.; Lang, W. (2019): Capture and Control of Material Flows and Stocks in Urban Residential Buildings. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 225: 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012001>
- Hron, J; Zeman, O.; Wiessning, K.; Bergmeister, K. (2024): Methoden zur Abschätzung des CO₂Speicherpotenzials rezyklierter Gesteinskörnung. Beton- und Stahlbetonbau 119 (2024), Heft 5. doi:10.1002/best.202300097
- Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Statistisches Landesamt (n.d.): Statistische Berichte Baufertigstellungen und Bauabgänge in Nordrhein-Westfalen 2023. www.it.nrw.
- Jegen, P.; Gast, L.; Faulstich, M. (under review): Spatial material stock analysis: A case study in the Ruhr Region Germany.
- Lederer, J.; Gassner, A.; Kleemann, F.; Fellner, J. (2020): Potentials for a circular economy of mineral construction materials and demolition waste in urban areas: a case study from Vienna. Resour. Conserv. Recycl. 161: 104942. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104942>
- Leibniz-Institut für Ökologische Raumentwicklung (IÖR) (2023): Physis der gebauten: Umwelt Informationsportal zu Bauwerksdaten [Online]. Datenbank (Excel). <http://ioer-bdat.de/>.
- Meglin, R.; Kytzia, S.; Habert, G. (2022): Regional environmental-economic assessment of building materials to promote circular economy: comparison of three Swiss cantons. Resour. Conserv. Recycl. 181: 106247. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106247>
- Potting, J.; Hekkert, M.; Worrell, E.; Hanemaaijer, A. (2017): Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. PBL–Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Schiller, G.; Lehmann, I.; Gruhler, K.; Hennersdorf, J.; Lützkendorf, T.; Mörmann, K.; Knappe, F.; Muchow, N.; Reinhardt, J. (2022): Kartierung des anthropogenen Lagers IV: Erarbeitung eines Gebäudepass- und Gebäudekatasterkonzepts zur regionalisierten Erfassung des Materialhaushaltes mit dem Ziel der Optimierung des Recyclings. Konzepte für Materialinventare und -kataster. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2022, S.443 (Texte | 05/2022). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kartierung-des-anthropogenen-lagers-iv-erarbeitung>

Tazi, N.; Idir, R.; Ben Fraj, A. (2021): Towards achieving circularity in residential building materials: Potential stock, locks and opportunities. J. Clean. Prod. 281: 124489. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124489>

Zeithofer, H.; Peyerl, M.; Krispel, S. (2018): Evaluierung des Einsatzes Alternativer Rohstoffe in der Klinkerproduktion zur Minderung der Treibhausgasemissionen. Smart Minerals: Vienna, Austria, 61.

Kontakt

M.Sc., Pauline Jegen, wissenschaftliche Mitarbeiterin

TU Dortmund, Lehrstuhl Ressourcen- und Energiesysteme

Tel.-Nr. +49 231 755-2249

E-Mail: pauline.jegen@tu-dortmund.de

Zusammensetzung der Alttextilien in Wien

Abstract: Der steigende Konsum von Textilien führt zu einer immer größer werdenden Belastung für die Umwelt, welche zum einen durch die Produktion aber auch durch die Entstehung von textilem Abfall entsteht. Ein Ansatz, um eine Kreislaufwirtschaft in der Textilindustrie zu implementieren, ist der Ausbau von Faser-zu-Faser-Recyclingprozessen. Diese erfordern jedoch einen Eingangsmaterialstrom von definierter Reinheit. Um diesen gewährleisten zu können, bedarf es einer Wissensbasis über die Zusammensetzung sowie Materialgehalt der zu verarbeitenden Textilien. Diese Studie präsentiert die Ergebnisse einer umfassenden Sortieranalyse der Alttextilien der Stadt Wien für das Jahr 2022. Die Daten zeigen, dass die Zusammensetzung der Alttextilien im Restmüll sowie der getrennten Sammlung sehr ähnlich sind. Des Weiteren wurde festgestellt, dass ca. die Hälfte der analysierten Alttextilien mit Etikett Einfasermaterialien waren, welche zu einem Großteil lt. Etikett aus Baumwolle bestanden. Generell deuten die Ergebnisse darauf hin, dass hier ein großes Potential für der Verwertung in Faser-zu-Faser-Recyclingprozessen vorhanden ist.

1 Einleitung

Der Konsum von Bekleidung und Textilien erfuhr in den letzten Jahrzehnten einen starken Anstieg, welcher neben einer wachsenden Bevölkerung vor allem auf den Trend der Fast Fashion zurückzuführen ist (Bartl & Ipsmiller, 2023; Niinimäki, 2011). Dieser ansteigende Konsum bedeutet auch eine immer größer werdende Belastung für die Umwelt. Die Textilindustrie ist nicht nur energieintensiv und benötigt eine große Menge an Ressourcen, sie trägt auch zur Emission von Schadstoffen bei und die Produkte werden am Ende ihrer Lebensdauer zu textilem Abfall, welcher beseitigt werden muss (De Felice et al., 2025; Niinimäki et al., 2020). Ein Ansatz dem entgegenzuwirken wäre die Implementierung einer Kreislaufwirtschaft in der Textilindustrie. Initiativen der EU hierzu sind nicht zuletzt durch den Auftrag zur getrennten Sammlung der Alttextilien ab heuer, 2025, offensichtlich (EC, 2018, 2022). Jeder Ansatz für ein Faser-zu-Faser-Recycling erfordert einen Eingangsmaterialstrom mit definierter Reinheit. Als Basis hierfür ist eine getrennte Sammlung der nicht stark-verschmutzten, trockenen Alttextilien nötig. Um aus dieser Quelle Fraktionen mit gewünschter Reinheit zu generieren, bedarf es weiterer Prozessschritte, nämlich Sortierung und Materialaufbereitung. Die Sortierung von Textilien wird heutzutage Großteils händisch durchgeführt, vor einigen Jahren wurde eine Sortierung mittels sensorbasierter Technologie in industriellem Maßstab eingeführt (Köhler et al., 2021). Dies ermöglicht grundsätzlich eine Bestimmung der Materialien in einem Textil. Jedoch gibt es noch Herausforderungen in der korrekten Identifizierung von mehrschichtigen Textilien oder Textilien mit vielen Zusatzkomponenten (Aufdrucke, Aufnäher, Stickereien, etc.) sowie von Materialien, welche nur in geringen Mengen im Textil vorkommen (Terra for Eco TLC, 2020). Eine korrekte Erkennung und Fraktionierung ist

für eine nachfolgende Aufbereitung jedoch unumgänglich, da diese Prozesse zumeist auf die Trennung bestimmter Fasermaterialien zurechtgeschnitten sind.

Die Etablierung von Sortieranlagen und praktikablen Sortierfraktionen für ein effektives Recycling erfordert eine Wissensbasis über die Zusammensetzung und den Gehalt an (Faser-)Materialien innerhalb der zu verarbeitenden Textilien.

2 Durchführung

Um hierzu einen Beitrag zu leisten wurden im CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft Sortieranalysen in Wien durchgeführt. Es wurden Alttextilien – Textilien, Bekleidung, Schuhe und Lederwaren – aus zwei verschiedenen Alttextilquellen untersucht, nämlich aus dem Restmüll und aus der getrennten Sammlung. Die Proben aus dem Restmüll stammten aus der Wiener Restmüll- und Altstoffanalyse 2022, welche mindestens alle 6 Jahre stattfindet (MA 48 – Magistratsabteilung MA 48 City of Vienna, 2023). Die gefundene Menge an Alttextilien im Zuge dieser Analyse betrug nach dem Trocknen 240 kg. Komplementär dazu wurde die Containersammlung der karitativen Organisation Caritas der Erzdiözese Wien im selben Zeitraum beprobt, die Probemenge hier betrug 1500 kg.

Der Fokus unserer Analysen lag auf der Ermittlung des Potentials dieser Alttextilien für die Verarbeitung in einem Faser-zu-Faser-Recycling. Aus diesem Grund wurden zuerst die vorwiegend aus Fasern bestehenden Bekleidungs- und Heimtextilien von nicht-Textilien, Schuhen, Taschen und Lederwaren getrennt. Für ein Recycling ist vor allem die Information über die Zusammensetzung der Textilien von Bedeutung, welche hier dem jeweiligen Etikett entnommen wurden. In einem zweiten Schritt wurden daher Textilien mit Etikett von Textilien ohne Etikett, komplexen Textilien und stark verschmutzten Textilien getrennt. Alle Textilien mit Label wurden abschließend einzeln verwogen und nach Textiltyp, Zusammensetzung und Qualität charakterisiert.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Charakterisierung nach Qualität zeigte, dass 33 % der analysierten Alttextilien in der getrennten Sammlung makellos und damit für eine Wiederverwendung geeignet wären, was im Sinne der Abfallhierarchie zu bevorzugen ist. Für die Abschätzung des Recyclingpotentials bedeutet dies in weiterer Folge jedoch, dass diese Menge einem Recycling potentiell nicht zu Verfügung steht. Die Charakterisierung der Textilien mit Label bezogen auf deren Zusammensetzung zeigte, dass die jeweilige Gesamtmasse dieser in beiden Quellen zu einem großen Anteil aus Baumwollfasern besteht. Gegensätzlich zu den jährlichen Faserproduktionszahlen (Textile Exchange, 2023) machten hier Baumwollfasern über 60 % und PET-Fasern weniger als 20 % der gesamten Fasermasse aus. Ebenfalls wurde festgestellt, dass beide Quellen ca. zu 46 % aus Einfasermaterial-Textilien bestehen, welche für ein Recycling leicht zugänglich wären. Hingegen benötigen Textilien mit zwei oder mehr Fasermaterialien neben einer korrekten Erkennung dieser auch adäquate Materialtrennprozesse. So wären bspw. für Baumwoll-PET-Textilien, welche ca. 11 % der Masse der Textilien mit Etikett ausmachten, solche Prozesse verfügbar (Palme et al., 2017; Piribauer et al., 2021). Für Baumwoll-Elasthan-Textilien (ca. 14 %) hingegen müssen diese noch entwickelt werden.

Die Ergebnisse dieser Analysen liefern Daten über typische post-consumer Textilien in Wien und tragen dazu bei, die Anzahl der verschiedenen Sortierfraktionen abzuschätzen, welche in unterschiedliche Recyclingpfade zur Generierung hochwertiger Sekundärrohstoffe gelangen müssen. Generell geht aus den Ana-

lysen hervor, dass hier ein signifikantes Potential vorhanden ist. Um dieses jedoch vollständig ausschöpfen zu können, bedarf es weiterer Forschung zu den derzeitigen Sortier- und Recyclingprozessen.

Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Weiters bedanken wir uns sehr herzlich für die finanzielle und inhaltliche Unterstützung durch unsere Unternehmenspartner, in alphabetischer Reihenfolge: Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoff Recycling Austria AG, Brantner Österreich GmbH, Holding Graz – Kommunale Dienstleistungen GmbH, Lenzing Aktiengesellschaft, Linz Service GmbH, MM Board & Paper, Wien Energie GmbH und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H. Darüber hinaus danken wir der Magistratsabteilung 48 der Stadt Wien und der Caritas der Erzdiözese Wien für die Bereitstellung der Proben für diese Sortieranalyse.

Literatur/Quellen

- Bartl, A., & Ipsmiller, W. (2023). Fast fashion and the Circular Economy: Symbiosis or antibiosis? In *Waste Management and Research* (Vol. 41, Issue 3, pp. 497–498). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/0734242X221149639>
- Boschmeier, E., Archodoulaki, V. M., Schwaighofer, A., Lendl, B., Ipsmiller, W., & Bartl, A. (2023). New separation process for elastane from polyester/elastane and polyamide/elastane textile waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107215>
- De Felice, F., Fareed, A. G., Zahid, A., Nenni, M. E., & Petrillo, A. (2025). Circular economy practices in the textile industry for sustainable future: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 486, 144547. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144547>
- EC. (2018). DIRECTIVE (EU) 2018/851 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste (Text with EEA relevance). *Official Journal of the European Union*, 61(L150), 109–140. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0851>, abgerufen am 8.01.2025
- EC. (2022). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. EU strategy for sustainable and circular textiles. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0141>
- Köhler, A., Watson, D., Trzepacz, S., Löw, C., Liu, R., & Danneck, J. (2021). Circular economy perspectives in the EU Textile sector Final report. <https://doi.org/10.2760/858144>
- MA 48 - Magistratsabteilung MA 48 City of Vienna. (2023). Wiener Restmüll- und Altstoffanalysen 2022.
- Niinimäki, K. (2011). From Disposable to Sustainable – The Complex Interplay between Design and Consumption of Textiles and Clothing.
- Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(4), 189–200. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>
- Palme, A., Peterson, A., de la Motte, H., Theliander, H., & Brelid, H. (2017). Development of an efficient route for combined recycling of PET and cotton from mixed fabrics. *Textiles and Clothing Sustainability*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40689-017-0026-9>

- Piribauer, B., Bartl, A., & Ipsmiller, W. (2021). Enzymatic textile recycling – best practices and outlook. *Waste Management and Research*, 39(10), 1277–1290. <https://doi.org/10.1177/0734242X211029167>
- Refashion. (2023). Technical monitoring of optical sorting, recognition and disassembly technologies for textiles at European scale. https://refashion.fr/pro/sites/default/files/rapport-etude/240428_Synth%C3%A8se_Veille-technos-tri-d%C3%A9lissage_VF-EN.pdf, abgerufen am 8.01.2025
- Terra for Eco TLC. (2020). Technical monitoring on optical sorting and textile recognition technologies at a European level Summary. https://refashion.fr/pro/sites/default/files/fichiers/Terra_summary_study_on_textile_material_sorting_VUK300320.pdf, abgerufen am 8.01.2025
- Textile Exchange. (2023). Materials Market Report. <https://textileexchange.org/app/uploads/2023/11/Materials-Market-Report-2023.pdf>, abgerufen am 8.01.2025

Kontakt

Dipl.-Ing., Pablo Kählig, Projektassistent

TU Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften

Tel.-Nr.: +43 1 58801 - 166 154

E-Mail: pablo.kaehlig@tuwien.ac.at

Homepage: <https://www.tuwien.at/tch/icebe/e166-01/cd-labor-kreislaufwirtschaft>

Forschung zur Oxyfuel-Verbrennung von Abfällen

Abstract: Zur Reduktion schwer vermeidbarer CO₂-Emissionen aus Müllverbrennungsanlagen werden derzeit verschiedene Ansätze untersucht. Das sogenannte Oxyfuel-Verfahren setzt direkt am Verbrennungsprozess an und liefert einen CO₂-reichen Abgasstrom zur nachgeschalteten CO₂-Abscheidung. Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, die Oxyfuel-Verbrennung von Abfällen zu untersuchen und die Einflüsse unterschiedlicher Parameter zu analysieren. Dies erfolgt anhand eines theoretischen Modells und auf Basis experimenteller Untersuchungen in einem Laborreaktor. Die Ergebnisse sollen das Verständnis der Oxyfuel-Verbrennungsprozesse von Abfall vertiefen, um die Implementation des Oxyfuel-Verfahrens in MVA langfristig vorzubereiten.

1 Einleitung

Um das Ziel der Bundesrepublik Deutschland zu erreichen, bis zum Jahr 2045 klimaneutral zu werden, ist die Minderung von Emissionen aus schwer vermeidbaren CO₂-Punktquellen notwendig. Die klimarelevanten Effekte der Müllverbrennungsanlagen (MVA) werden maßgeblich vom freigesetzten CO₂ bedingt. Bei der thermischen Verwertung von einem Mg Abfall werden im Mittel 1,1 Mg CO₂ freigesetzt, welches etwa zur Hälfte einem biogenen Ursprung zugerechnet wird. Legt man eine CO₂-Abscheidung von 90 % zugrunde, ergibt sich für den Anlagenpark in Deutschland ein Minderungspotenzial von rund 13 Mio. Mg/a an fossilem CO₂. (Arnold et al.; CEWEP) In Zukunft sollen MVA als integraler Bestandteil einer defossilisierten, CO₂-neutralen Wasserstoffwirtschaft eine weitere zentrale Funktion übernehmen: Die CO₂-Abscheidung an MVA wird zur wichtigen Kohlenstoffquelle für die chemische Industrie, um die Kohlenstoffkreisläufe unserer Gesellschaft zu schließen. (Quicker 2023)

Die Forschungsarbeit zielt darauf ab, die Oxyfuel-Verbrennung von Abfällen hinsichtlich der Auswirkungen verschiedener Parameter wie der Gas- und Abfallzusammensetzung auf Emissionen und Aschen tiefergehend zu untersuchen. Im Fokus steht dabei der Bezug zu großtechnischen Fragestellungen, um langfristig die Durchführung von Großversuchen an industriellen Anlagen vorzubereiten.

2 Theoretischer Hintergrund

Zur Reduktion schwer vermeidbarer CO₂-Emissionen in Abfallverbrennungsanlagen ist der Einsatz verschiedener Technologien denkbar. Es werden derzeit einige Pilotprojekte im Bereich der Post-Combustion-Verfahren durchgeführt. Das bisher am weitesten entwickelte Verfahren ist die sogenannte Aminwäsche, die bereits großtechnisch in einzelnen Anlagen (z. B. MVA Duiven, Niederlande) angewendet wird. Die Aminwäsche ist jedoch mit schwerwiegenden Nachteilen verbunden, wie dem Risiko der Emission gesundheitsgefährdender Nitrosamine. Zudem ist der Betrieb von Post-Combustion-Verfahren aufgrund des

geringen CO_2 -Anteils im Abgas von MVA sehr energieintensiv. Wie in Abb. 1 dargestellt, verfolgt das Oxyfuel-Verfahren einen alternativen Ansatz, bei dem direkt in den Verbrennungsprozess eingegriffen wird. Der Brennkammer wird anstelle von Luft reiner Sauerstoff und rezirkuliertes Abgas (im Wesentlichen CO_2) zugeführt, um den N_2 -Anteil im Abgasstrom zu senken und somit einen CO_2 -reichen Abgasstrom zu produzieren. Nach der Abtrennung von Verunreinigungen verbleibt ein CO_2 -Wasserdampf-Gemisch, aus dem durch Kondensation des Wassers ein CO_2 -reicher Gasstrom erhalten wird. In Zukunft bietet sich der Einsatz von kostengünstigem Sauerstoff als Nebenprodukt aus der Elektrolyse von Wasser zur Produktion von Wasserstoff an. Weitere Synergien ergeben sich, wenn nach Abscheidung des CO_2 mithilfe des erzeugten Wasserstoffs im Rahmen einer CCU-Route, idealerweise am gleichen Standort, Basischemikalien oder Treibstoffe synthetisiert werden. (Kuckshinrichs 2013; Quicker 2023)

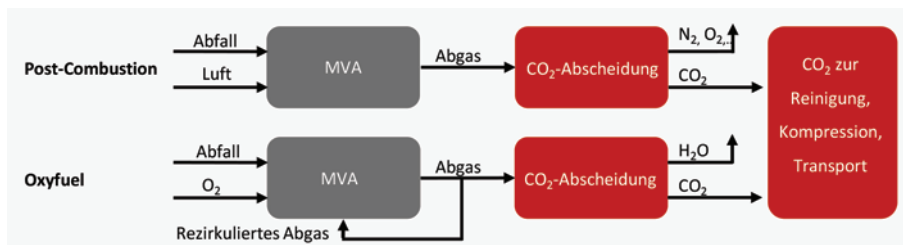


Abb. 1: Vergleich der Verfahrensrouten Post-Combustion und Oxyfuel zur CO_2 -Abscheidung an MVA
[verändert nach (Mondal et al. 2012)]

In der Vergangenheit gab es zahlreiche Studien zur Oxyfuel-Verbrennung von Kohle. Der Brennstoff Abfall mit seiner heterogenen Zusammensetzung unterscheidet sich in seinen Eigenschaften deutlich (Wienchol et al. 2020). Einzelne Untersuchungen zum Oxyfuel-Verfahren im Pilotmaßstab wurden in Wirbelschichtanlagen (EBS / Klärschlamm) sowie in Rostfeuerungen (Holzpellets / EBS) durchgeführt. Die Substitution von N_2 durch CO_2 beeinflusst die Verbrennung aufgrund unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften des CO_2 , wie einer höheren Wärmekapazität und Dichte, der chemischen Reaktivität des CO_2 sowie unterschiedlicher Strahlungswärmeübertragung. Bei der experimentellen Untersuchung verschiedener Gaszusammensetzungen wurde festgestellt, dass eine Oxyfuel-Atmosphäre aus 30 Vol.-% O_2 und 70 Vol.-% CO_2 zu ähnlichen Verbrennungsparametern führt wie die Verbrennung mit Luft. (Chen 2018; Cheng et al. 2024) Die Effekte des Oxyfuel-Verfahrens auf die Zusammensetzung der Aschen und der Emissionen des Verbrennungsprozesses wurden bisher kaum betrachtet.

2 Methodik/Projektkonzept

2.1 Modellierung des Oxyfuel-Verfahrens in MVA

Zur theoretischen Untersuchung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA wird ein Modell entwickelt, um den Einfluss verschiedener Parameter auf die Abgaszusammensetzung zu bestimmen. Die Rezirkulation des Abgases kann an verschiedenen Positionen erfolgen (siehe Abb. 2). Wird das Abgas an Position A nach Austritt aus dem Kessel bzw. vor der Abgasreinigung rezirkuliert, werden auch alle Schadstoffe rezirkuliert. Alternativ kann das Abgas an einer Position zwischen verschiedenen Verfahrensschritten der Abgasreinigung

(B) rezirkuliert werden, die je nach individueller Konfiguration der Abgasreinigung gewählt werden könnte. Falls zunächst ein Zyklon oder Gewebefilter zur Abscheidung von Partikeln durchströmt wird, könnte die Rezirkulation nach diesem Prozessschritt geprüft werden. Die dritte Option zur Rezirkulation des Abgases besteht nach erfolgter Reinigung (C). Die vierte Alternative (D) ist die Rezirkulation von trockenem CO_2 nach Abtrennung des H_2O , was mit einem hohen Energieaufwand verbunden wäre, da der kryogen zu behandelnde Abgasvolumenstrom erhöht wird. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit sollen die Auswirkungen der Rezirkulationspfade auf die Abgaszusammensetzung und Volumenströme untersucht werden. Weitere Parameter, deren Auswirkungen untersucht werden sollen, sind die O_2 -Konzentration in der Verbrennungsatmosphäre sowie die Luftzahl und die Zusammensetzung des Brennstoffs. Zudem soll der Einfluss des Falschlufteintrags ermittelt werden. (Toftegaard et al. 2010)

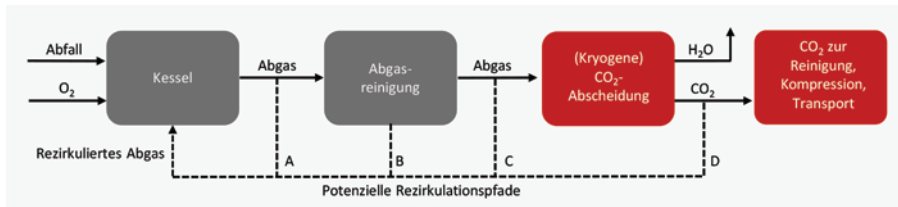


Abb. 2: Schematische Darstellung der potenziellen Abgasrezirkulationspfade (A, B, C, D) bei Integration des Oxyfuel-Verfahrens in MVA [verändert nach (Toftegaard et al. 2010)]

2.2 Oxyfuel-Verbrennung im Labormaßstab

Parallel zur theoretischen Betrachtung wurde ein Rohrreaktor im Labormaßstab konzipiert, um die Oxyfuel-Verbrennung von Abfällen experimentell zu untersuchen. Im Verbrennungsreaktor (siehe Abb. 3) wird der Brennstoff von oben hinzugegeben und im Gegenstrom mit dem Oxyfuel-Gasgemisch durchströmt. Die Abgaszusammensetzung und der Volumenstrom des Rauchgases werden messtechnisch erfasst. Die Asche wird nach Versuchsende entnommen und analysiert.

Durch die Einstellung unterschiedlicher CO_2/O_2 -Gemische als Verbrennungsatmosphären soll die optimale CO_2/O_2 -Konzentration bestimmt werden, um ähnliche Parameter wie bei der Verbrennung mit Luft zu erhalten. Dies ist erforderlich, um bei der Nachrüstung einer bestehenden MVA die Funktionsfähigkeit des Kessels und Dampfkreislaufes zu gewährleisten. Das Ziel der Untersuchungen ist es, die Effekte verschiedener Parameter, wie der O_2 -Konzentration, der Brennstoffzusammensetzung und der Temperatur auf die Emissionen und Aschen zu untersuchen. Des Weiteren soll der Einfluss von Wasserdampf in der Atmosphäre untersucht werden, um die Fragestellung einer nassen oder trockenen Rezirkulation bei der großtechnischen Umsetzung zu beantworten.

Anschließend werden die experimentellen Ergebnisse mit den theoretisch erzielten Ergebnissen verglichen und Unterschiede diskutiert.

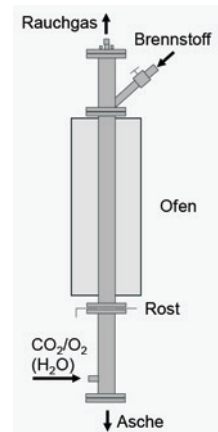


Abb. 3: Reaktordesign [Eigene Darstellung]

3 Fazit und Ausblick

Die geplanten experimentellen und theoretischen Untersuchungen sollen dazu beitragen, das Verständnis über die Wechselwirkungen verschiedener Parameter im Oxyfuel-Verbrennungsprozess zu vertiefen und eine fundierte Basis für zukünftige Großversuche an industriellen Anlagen zu schaffen. Nach Abschluss der vorgestellten Untersuchungen sollen weitere Fragestellungen zur großtechnischen Implementation des Oxyfuel-Verfahrens geprüft werden. Aufgrund der veränderten Abgaszusammensetzung durch den fehlenden Stickstoff muss geprüft werden, ob die aktuell bestehenden Abgasreinigungsanlagen weiterhin sicher Schadstoffe reduzieren, um die gesetzlichen Grenzwerte einzuhalten. Zudem könnten durch die veränderten Prozessbedingungen Komplikationen bei der Einhaltung von Vorgaben der 17. BImSchV entstehen.

Danksagung

Das Projekt wird durch die großzügige finanzielle Unterstützung der Stiftung Sustainable Industrial Society Foundation ermöglicht.

Literatur/Quellen

- Arnold, Karin; Scholz, Alexander; Taubitz, Ansgar; Wilts, Henning: Unvermeidbare Emissionen aus der Abfallbehandlung – Optionen auf dem Weg zur Klimaneutralität. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 72, 2022 Heft 6. Online verfügbar unter https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8028/file/8028_Arnold.pdf.
- CEWEP (Hg.): Interactive Map of Waste-to-Energy Plants. Online verfügbar unter <https://www.cewep.eu/interactive-map/>, zuletzt geprüft am 08.04.2024.
- Chen, Sheng (2018): Fundamentals of Oxy-fuel Combustion. In: Oxy-Fuel Combustion: Elsevier.
- Cheng, Fangqin; Zhang, Yuanyuan; Zhang, Guoqiang; Zhang, Kai; Wu, Junzhi; Zhang, Dongke (2024): Eliminating environmental impact of coal mining wastes and coal processing by-products by high temperature oxy-fuel CFB combustion for clean power Generation: A review. In: Fuel 373, S. 132341. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132341.
- Kuckshinrichs, Wilhelm (Hg.) (2013): CO₂-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung. Technische, wirtschaftliche, umweltseitige und gesellschaftliche Perspektive. Jülich: Forschungszentrum Jülich (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt, 164).
- Mondal, Monoj Kumar; Balsora, Hemant Kumar; Varshney, Prachi (2012): Progress and trends in CO₂ capture/separation technologies: A review. In: Energy 46 (1), S. 431–441. DOI: 10.1016/j.energy.2012.08.006.
- Quicker, Peter (2023): Kohlenstoff-Management in der Abfallwirtschaft der Zukunft. In: Stefanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker und Alexander Gosten (Hg.): Energie aus Abfall 20. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH (20), S. 17–29.
- Toftegaard, Maja B.; Brix, Jacob; Jensen, Peter A.; Glarborg, Peter; Jensen, Anker D. (2010): Oxy-fuel combustion of solid fuels. In: Progress in Energy and Combustion Science 36 (5), S. 581–625. DOI: 10.1016/j.pecs.2010.02.001.

Wienchol, Paulina; Szlęk, Andrzej; Ditaranto, Mario (2020): Waste-to-energy technology integrated with carbon capture – Challenges and opportunities. In: Energy 198, S. 117352. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117352.

Kontakt

Isabel Kaphahn, M. Sc., Wissenschaftliche Mitarbeiterin

L.u.F. Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft

Tel: 0241-8090714

E-Mail: kaphahn@teer.rwth-aachen.de

Homepage: www.teer.rwth-aachen.de

Recyclinggerechte Produktgestaltung von Einwegbeatmungsbeuteln

Abstract: Die Patientenbeatmung wird neben ihrer notfallmäßigen Anwendung beispielsweise bei Atem- oder Kreislaufstillstand auch bei routinemäßigen Eingriffen im OP eingesetzt. Während das eigentliche Beatmungsgerät als Mehrwegprodukt konzipiert ist, werden Verbrauchsmaterialien wie Schlauchsysteme, Filter, Tuben und Beatmungsbeutel verwendet. Diese Einwegkomponenten werden bislang i.d.R. einer thermischen Verwertung zugeführt und gehen so dem Stoffkreislauf verloren. An der Hochschule Pforzheim wurden daher kreislaufwirtschaftliche Lösungsansätze für Einwegbeatmungsbeutel entwickelt und ihre Umsetzbarkeit nach den Vorgaben der Verordnung (EU) 2017/745 über Medizinprodukte (MDR) bewertet.

1 Einleitung

Durch den Einsatz von Einwegprodukten für Diagnose und Therapie ist das Gesundheitswesen mit einer jährlichen Abfallmenge von 1,2 Millionen Tonnen der fünftgrößte Abfallerzeuger in Deutschland. Diese Abfallmengen steigen seit Jahren an und tragen auch zu negativen Klimawirkungen bei [1, p. 186]. Der Umgang mit medizinischen Abfällen wird in Deutschland durch das Merkblatt LAGA M18 geregelt [2, p. 5]. Beatmungsbeutel, welche nicht bei infektiös ansteckenden Patienten eingesetzt worden sind, werden dem Abfallschlüssel AS 18 01 04 zugeordnet. Er kennzeichnet Abfälle, an dessen Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden [2, p. 11].

Eine beispielhafte Werkstoff-Analyse eines knapp 500 g schweren Beatmungsbeutels ergab in diesem einfachen Produkt bereits die Gesamtzahl 13 verschiedener Kunststoffe [3, p. 1]. In der Praxis werden medizinische Abfälle wie Beatmungsbeutel daher nur selten dem Recycling und stattdessen der thermischen Verwertung zugeführt. Dadurch gehen die nichtmetallischen Werkstoffe für eine stoffliche Verwertung und einen weiteren Produktlebenszyklus verloren, lediglich Eisen- und Buntmetalle sind grundsätzlich verwertbar. Die Informationen über die werkstoffliche Zusammensetzung medizinischer Produkte und daraus entstehende Abfälle in Deutschland sind insgesamt lückenhaft. Viele Medizinprodukte weisen einen Materialmix auf, und die verwendeten Werkstoffe sind von außen selten zu erkennen. Daher sind Analysen heute eingesetzter Medizinprodukte erforderlich, um beginnend mit der Produktgestaltung bis hin zur hochwertigen Verwertung das kreislaufwirtschaftliche Profil der Gesundheitswirtschaft zu verbessern.

2 Methodik

Im Rahmen einer Demontagestudie wurden Einmal-Beatmungsbeutel der VBM Medizintechnik GmbH (Sulz a. N.) und der P. J. Dahlhausen & Co. GmbH (Köln) demontiert und anschließend einer Materialcharakterisierung unterzogen. Zur Identifizierung möglicher Herausforderungen bei einem nachgelagerten Recycling-

prozess wurde die VDI-Richtlinie 2243 zur recyclingorientierten Produktentwicklung genutzt [4]. Auf Basis der Demontageversuche wurden dann kreislaufwirtschaftliche Handlungsoptionen wie konstruktive Änderungen und Materialsubstitutionen identifiziert und neue Geschäftsmodelle entwickelt. Da Medizinprodukte besonderen regulatorischen Vorgaben unterliegen, werden diese technischen Optionen aus Expertensicht hinsichtlich der Anforderungen gemäß der Verordnung (EU) 2017/745 über Medizinprodukte (MDR) bewertet.

3 Ergebnisse

Im Rahmen der Demontagestudie wurde ein 489,28g schweres PVC Beatmungsbeutel-Set zum Einmalgebrauch für Erwachsene (REF: 84-10-195) manuell mit Handwerkzeug demontiert [5, p. 21]. Ein unerfahrener Demonteuer benötigt hierfür insgesamt 1400 Sekunden, was Demontagekosten von 11,68€ verursachen würde, während die Grundmaterialien preislich im Vergleich bei 0,20€ pro Beutel liegen [6]. Insgesamt konnten 9 Steckverbindungen, 5 Klebeverbindungen, 2 Schraubverbindungen (davon eine Verbindung zusätzlich verklebt), eine Schweißverbindung und eine Pressverbindung identifiziert werden. Abbildung 1 zeigt links das Masseverhältnis zwischen den einzelnen Baugruppen und rechts die Ergebnisse der Materialcharakterisierung. Diese wurde mit dem Bruker Alpha Platinum ATR-Spektrometer (Datenbanken: BPAD.S01 (Bruker Optics ATR Polymer Library) und Demolib.s01 (General Library IR)) durchgeführt und ergab, dass der Beatmungsbeutel zu 79,20% aus PVC, zu 14,36% aus PC, zu 5,01% aus PE-LD, zu 0,84% aus PP und zu 0,55% aus Silikon besteht. 0,04% der Materialien waren nicht identifizierbar [6].

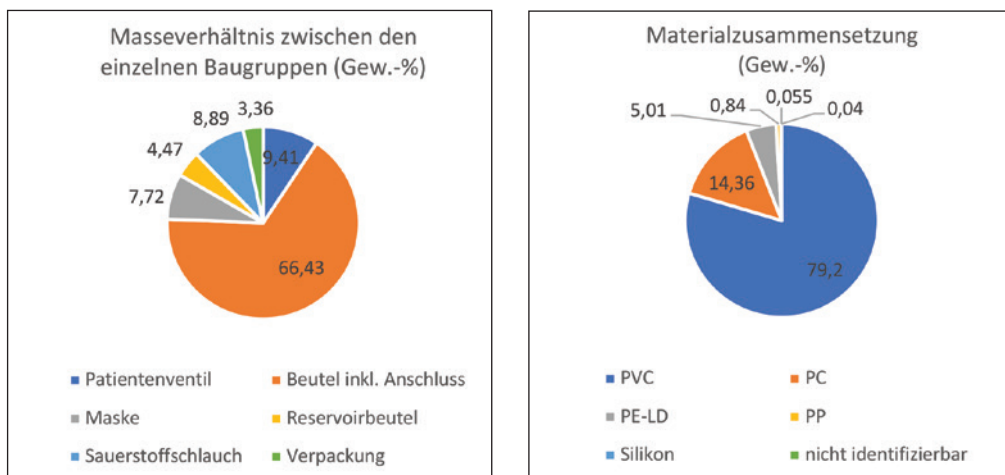


Abbildung 1: links Masseverhältnis zwischen den einzelnen Baugruppen; rechts Materialzusammensetzung (Gesamtmasse 489,27g)

Die Herausforderungen für das Recycling des Beatmungsbeutels nach VDI 2243 sind in Tabelle 1 dargestellt. Auf Basis dieser Problemfelder wurden kreislaufwirtschaftliche Handlungsoptionen entwickelt und hinsichtlich der Anforderungen der MDR bewertet (Tabelle 2), da Modifikationen an bestehenden Medizinprodukten einen neuen Zulassungsprozess erfordern, u. a. um die Patientensicherheit sicherstellen zu können.

Tabelle 1: Herausforderungen hinsichtlich der Recyclingfähigkeit des Beatmungsbeutels

Identifizierbarkeit	Werkstoffe sind ohne Prüfung nicht identifizierbar, Beschriftungen sind fehlerhaft
Stoffliche Verwertbarkeit	Erschwert durch hohen Materialmix
Verbindungsarten	Komponenten sind teilweise nicht zerstörungsfrei und sortenrein trennbar.
Demontagezeit	Langwieriger manueller Demontageprozess insbesondere beim Patientenventil (51,21% der Gesamtdemontagezeit)
Reinheit	Klebereste und Weichmacher können den Recyclingprozess beeinträchtigen; evtl. Verunreinigungen durch Körperflüssigkeiten
Werkzeuge	Werkzeuge werden zur Demontage benötigt.
Wirtschaftlichkeit	Demontagekosten >> Werkstoffkosten

Tabelle 2: Kreislaufwirtschaftliche Handlungsoptionen und Machbarkeitsbewertung gemäß MDR

Lösungen	MDR-Expertenbewertung
<i>Eingesetzte Materialien</i>	
Durch Rezyklate oder Biopolymere könnten natürliche Ressourcen geschont werden. Zudem könnte die vorhandene Metallfeder gegen eine Kunststofffeder ausgetauscht werden. Ein aufgeklebtes Metallstück auf dem Überdruckventil könnte durch einen Papieraufkleber oder einen direkten Aufdruck vermieden werden.	Der Einsatz alternativer Materialien erfordert mindestens die Überprüfung der Biokompatibilität. Bei Rezyklaten mit schwankenden Zusammensetzungen müssten einzelne Werkstoffchargen kostenintensiv überprüft und freigegeben werden.
<i>Reduktion der Materialvielfalt</i>	
Denkbar wäre es den Beutel weiterhin aus PVC, die Dichtungen aus Silikon und die Anschlüsse aus PP oder PE zu gestalten. Diese Materialien sind im Recyclingprozess über eine Schwimm-Sink-Trennung gut trennbar.	Eine Reduktion der Materialvielfalt ist möglich, wenn die „neuen“ Materialien die Patientensicherheit nicht gefährden.
<i>Materialverbindungen</i>	
Der Einsatz von Steck- und Schraubverbindungen ermöglicht eine zerstörungsfreie Demontage. Für den Sauerstoff- und Patientenanschluss ist ein Bajonettverschluss denkbar. Der Reservoirbeutel kann durch einen Haltering mit Clip am Beatmungsbeutel anstelle des geklebten Halterings befestigt werden.	Der Einsatz von alternativen Verbindungen ist möglich, darf jedoch die Patientensicherheit nicht gefährden.
<i>Materialkennzeichnungen</i>	
Es erfolgt eine Materialkennzeichnung auf den Einzelteilen zur direkten Identifizierung.	Eine Materialkennzeichnung ist durchaus möglich, auch ohne Neuzulassung.

Modularer Aufbau	
Durch einen modularen Aufbau des Beatmungsbeutels könnten bestimmte Baugruppen nach einer Aufbereitung für eine gewisse Zyklenzahl wiederverwendet werden. Das Produkt soll mit einem Indikator für eine definierte Anzahl an Aufbereitungen ausgestattet sein. Das kontaminierte System wird entsorgt und der Rest wird aufbereitet.	Ein modularer Aufbau von Medizinprodukten ist durchaus möglich. Allerdings muss das System für eine Aufbereitung ausgelegt und das Aufbereitungsverfahren validiert sein.
Digitaler Produktpass	
Informationen über die verwendeten Materialien, Verbindungen und Entsorgung (Recycling) bereitstellen	Ein digitaler Produktpass ist durchaus möglich. Informationen zu den verwendeten Materialien sind in den Gebrauchsanweisungen bereits enthalten.
Produktverpackung	
Vermeidung (zusätzlicher) Folienverpackungen bei Beatmungsmasken, Reservoirbeutel und O ₂ -Schlauch	Da die Produktverpackung Teil des Medizinproduktes ist, muss ein Verzicht kritisch überprüft werden.
Geschäftsmodelle	
Etablierung eines Rücknahmesystem für Einweg-Medizinprodukte.	

4 Fazit

Die Verwendung von Einwegprodukten trägt deutlich zum Abfallaufkommen von 1,2 Millionen Tonnen in der deutschen Gesundheitswirtschaft bei. Nur die wenigsten Medizinprodukte wurden nach dem „Design for Recycling“-Ansatz gestaltet, und aufgrund der MDR-Zulassungserfordernisse ist es meist auch nicht wirtschaftlich, bestehende Produkte zu modifizieren. Allerdings können durch konkrete Produktuntersuchungen kreislaufverbessernde Ansätze für Produkt-Neuentwicklungen generiert und verankert werden.

Literatur/Quelle

- [1] M. Franke und A. Hofmann, „Circular Economy für Kunststoffe im Gesundheitswesen,“ in Green Health - Nachhaltiges Wirtschaften im Gesundheitswesen, Berlin, MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 2023, pp. 193-198.
- [2] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall, Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 18: Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes, 2021.
- [3] Ambu GmbH, Ambu® Spurl II Einweg-Beatmungsbeutel - Datenblatt, Bad Nauheim: Ambu GmbH, 2023.
- [4] Verein Deutscher Ingenieure, „VDI 2243 - Recyclingorientierte Produktentwicklung, Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2002.

- [5] VBM Medizintechnik GmbH, „Airway Management,“ [Online]. Available: https://media.vbm-medical.de/kat/KAT003_DE.pdf. [Zugriff am 8 Januar 2025].
- [6] S. Can, M. A. Jebari und A.-S. Walz, Rezyklierbarkeit eines Beatmungsbeutels, Pforzheim, 2024

Kontakt

Marcel Kern

Hochschule Pforzheim – Fakultät für Technik, 75175 Pforzheim, Deutschland

Marcel.Kern@hs-pforzheim.de.

Enhancing Circularity – The Role of Temporary Material Hubs: A Conceptual Framework

Abstract: *This new conceptual framework introduces temporary material hubs (TMHs), a novel concept possibly enhancing circularity in the long-term. This conceptual framework strives to optimize resource recovery by providing the option to store prospectively valuable waste for future recycling capabilities and avoiding premature disposal; the value of materials/waste is unlocked over time. The conceptual framework is complemented by final sinks, which are perceived as a crucial part of a well-functioning circular economy and a prerequisite for clean cycles. Three recycling pillars were proposed as a reaction to the lack of a clear definition of recyclability; these shall serve as guiding principles in the context of TMHs: environmental and health protection, availability of adequate recycling technologies, and economic feasibility including the existence of markets. This study prepares the ground for future research on technical, economical, and societal factors in order to implement TMHs on an industrial scale to ensure enhancement of the circular economy and a sustainable future.*

1 Introduction

Waste management is a cornerstone of a functioning circular economy, prolonging resource use and protecting material cycles from contamination. However, the current system is far from flawless. Despite the strong emphasis on waste prevention and reduction, the generation of waste cannot be fully omitted. Preferred options of waste management are reuse, recycling and energy recovery; however, especially on a global scale, the current waste management still relies on disposal - landfilling.

The circularity rate is still substantially low - 7.2% on a global scale in 2023 (Fraser et al., 2024) and 11.5% in Europe in 2022 (European Environment Agency, 2024). Meanwhile, consumption has been increasing steadily (Fraser et al., 2024). It is estimated that 3.78 billion tonnes of municipal solid waste per year will be generated by 2050 in the business-as-usual scenario (United Nations Environment Programme, 2024).

The EU has been implementing plans and regulations facilitating a transition towards a circular economy, including the New Circular Economy Action Plan, the adapted Waste Framework Directive and the Landfill Directive. These set reuse and recycling goals as well as restrict landfilling for the European waste management sector. Besides the benefits such regulations bring, they also create a gap between the amount of waste that is diverted from disposal and the available recycling capacities and technologies.

While some materials can be well recycled and enter functioning secondary raw materials markets (e.g., aluminium, glass and paper), markets for some other secondary raw materials are much less developed (e.g., construction waste, textiles) (European Environment Agency, 2023). Materials that are not valuable or cannot be recycled at the moment are often either thermally recovered or landfilled, despite bearing

potential future value and prospective recyclability. Materials/waste with the prospects of future feasible recycling should be stored in so-called temporary material hubs (TMHs). These serve to store material/waste for longer periods than those allowed by the current legislation (in Austria and Germany up to 3 years) (Lehmphul, 2014; Wagner and Bilitewski, 2009; Wirtschaftskammer Österreich, 2016). After the defined time in storage, these materials/waste can be feasibly recycled and enter secondary raw markets, if suitable technologies and markets have been developed in the meantime.

On the other hand, some materials that are not suitable for recycling (e.g., are contaminated) might be pressured to enter material cycles under legislation aiming to increase the amount of material/waste being materially recovered. Contaminated materials pose a risk to the environment, human health, and material cycles and require safe disposal (Kral et al., 2013). To sustain a functioning circular economy, such materials need to find their safe final sinks - currently either waste-to-energy facilities or landfills.

The proposed conceptual framework enhances circularity in the mid- to long- term by the introduction of TMHs for prolonged/interim storage of materials/waste. It is complemented by final sinks ensuring safe final disposal of non-recyclable (e.g., asbestos), contaminated (e.g., textiles containing perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances) or degraded materials (e.g., cellulose, polymer or carbon fibres after several recycling cycles) in order to sustain clean material cycles and protect the environment. Given the lack of a clear definition of recyclability at the European level, this study suggests the adoption of "recycling pillars" as guiding principles for TMHs. The development of the conceptual framework was based on a comprehensive analysis including literature screening of similar concepts, the current regulations and recycling issues. Discussions among diverse expert and peer groups played a strong supporting role. Two case studies of waste materials with shortened recyclability were chosen to demonstrate the necessity of a new storage concept and the two proposed types of TMHs (static vs. dynamic).

2 Results and Discussion: A Conceptual Framework

The recycling pillars defined in this study serve as guiding principles in the context of TMHs (Fig. 1). The pillars are understood as key factors determining recyclability, and these are: (1) contribution to environmental and health protection, (2) availability of adequate recycling technologies and (3) economic feasibility, including the existence of markets. Overarching this is legislation that supports (or hinders) the pillars by setting targets and restrictions that drive or hamper recycling efforts. When all pillars are available, the materials/waste is perceived as recyclable. In case one or more pillars are missing, they cannot be currently feasibly recycled and thus are energetically recovered or disposed.

The developed conceptual framework aims to enhance the circular economy in the mid- to long-term. This is done by the implementation of TMHs and the emphasis on the inclusion of safe final sinks. The concept distinguishes between two types of TMHs - static and dynamic. Static TMHs shall store inert waste that can be further processed in the form in which it was stored; some sort of treatment might be preceding or following the storage. A candidate material for this type of storage is composites used to produce wind blades. On the other hand, dynamic TMHs shall store waste that can and shall undergo certain changes during the storage process before it can be remined and subsequently recycled. This approach is based on the ASPIRE concept described by Sapsford et al. (2023), where mineral-rich waste such as incineration residues are stored to undergo natural weathering and pedogenetic processes, which can even lead to CO₂ mitigation through the process of carbonation. For example, in the case of boiler ash, the uptake is approximately 84.3 kg of CO₂ per ton of material (Schinnerl et al., 2024). After storage time, the materials/waste can be further processed or directly used as secondary raw materials.

When both TMHs and final sinks are employed, they can fill in the gaps (grey triangles) in missing recycling pillars, see Fig. 1. Fig. 1 shows that, e.g., if recycling is not economically feasible, it is perceived as “long-term infeasible” and material/waste is prone to be disposed of in landfills or thermally treated (see upper left grey triangle); e.g., some types of plastic waste (Lim et al., 2023). Similarly, some materials/waste lack adequate recycling technologies (upper right grey triangle in Fig. 1), e.g., the recycling outputs do not reach sufficient quality – such as in the case of composites (European Commission, 2023). The lack of feasible recycling options can be filled in by TMHs. Conversely, if recycling technologies are available and secondary raw materials markets exist but the recycling outputs do not comply with existing environmental standards (bottom grey triangle in Fig. 1), final sinks should be employed to keep the material cycles clean; e.g., contaminated PET or paperboard recyclates (Mofokeng et al., 2024; Zhong et al., 2025).



Fig. 1 Temporary material hubs and final sinks effectively filling in the gaps in recycling pillars/a circular economy

There are several areas of future considerations that need to be studied in order to implement the concept of TMHs on an industrial scale. The key areas include duration of storage, technical properties (design and infrastructure), and the estimation of costs/revenues. These areas will be explored in further stages of this project.

3 Conclusions

A proposal of an EU-wide definition of recyclability would support recycling efforts; the proposed recycling pillars in this study are filling in this gap. The concept of TMHs has a potential to enhance circularity in the mid- to long-term by temporary storing currently non-valuable or feasibly non-recyclable materials. Final sinks provide a safe final disposal for materials that cannot be recycled now or even in future. Enhancing circularity and ensuring that resources are used thoroughly before disposal are pathways towards circular and sustainable future. Technical specifications and economic factors need to be studied thoroughly to support the implementation of this concept on an industrial level.

Acknowledgement

This project is financed by the BOKU University. The author is employed at the Institute of Waste Management and Circularity (ABF-BOKU).

Sources

- European Commission. More circular, less carbon: chemical recycling holds promise for wind-turbine blade waste 2023. https://environment.ec.europa.eu/news/more-circular-less-carbon-chemical-recycling-holds-promise-wind-turbine-blade-waste-2023-10-19_en (accessed December 18, 2023).
- European Environment Agency. Now is the time to accelerate the shift to a more circular Europe 2024. <https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/now-is-the-time-to> (accessed October 3, 2024).
- European Environment Agency. Markets for many commonly recycled materials struggle in the EU. European Environment Agency 2023. <https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/markets-commonly-recycled-materials-struggle> (accessed May 22, 2024).
- Fraser M, Conde Á, Laxmi H. The Circularity Gap Report 2024. <https://www.circularity-gap.world/2024#-download> (accessed July 9, 2024).
- Kral U, Kellner K, Brunner PH. Sustainable resource use requires “clean cycles” and safe “final sinks.” *Sci Total Environ* 2013;461–462:819–22. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.094>.
- Lehmpful K. Landfill. Umweltbundesamt 2014. <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/waste-resources/waste-disposal/landfill> (accessed July 11, 2024).
- Lim J, Ahn Y, Kim J. Optimal sorting and recycling of plastic waste as a renewable energy resource considering economic feasibility and environmental pollution. *Process Safety and Environmental Protection* 2023;169:685–96. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.027>.
- Mofokeng NN, Madikizela LM, Tiggelman I, Chimuka L. Chemical profiling of paper recycling grades using GC-MS and LC-MS: An exploration of contaminants and their possible sources. *Waste Management* 2024;189:148–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.08.014>.
- Sapsford DJ, Stewart DI, Sinnott DE, Burke IT, Cleall PJ, Harbottle MJ, et al. Circular economy landfills for temporary storage and treatment of mineral-rich wastes. *Proc Inst Civ Eng: Waste Resour Manag* 2023. <https://doi.org/10.1680/jwarm.22.00008>.
- Schinnerl F, Sattler T, Noori-Khadjavi G, Lehner M. Direct aqueous mineral carbonation of secondary materials for carbon dioxide storage. *J CO₂ UTIL* 2024;88:102942. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102942>.
- United Nations Environment Programme. Global Waste Management Outlook 2024 | UNEP - UN Environment Programme 2024. <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024> (accessed July 16, 2024).
- Wagner J, Bilitewski B. The temporary storage of municipal solid waste – Recommendations for a safe operation of interim storage facilities. *Waste Manag* 2009;29:1693–701. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.018>.
- Wirtschaftskammer Österreich. Zeitweilige Lagerung von Abfällen auf dem Gelände ihrer Entstehung. wko. at 2016. <https://www.wko.at/oe/information consulting/entsorgungs-ressourcenmanagement/zeitweilige-lagerung-von-abfaellen-auf-dem-gelaende-ihrer-e> (accessed July 11, 2024).
- Zhong H-N, Su Q-Z, Chen S, Li D, Sui H, Zhu L, et al. Revealing contaminants in China's recycled PET: Enabling safe food contact applications. *Resources, Conservation and Recycling* 2025;212:107947. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107947>.

Contact

Romana Kopecká, MSc

University Assistant at the Institute of Waste Management and Circularity, BOKU University

Tel.-Nr. +43 1 47654-81312

E-Mail: romana.kopecka@boku.ac.at

Homepage: <https://boku.ac.at/en/wau/abf>

The potential of a small-scale treatment system for the management of pig slurry

Abstract: *The management of livestock waste, such as pig slurry, presents significant environmental and operational challenges due to the high volume generated and nutrient load faced by the farmers. Large pig farms typically manage slurry through separation and anaerobic treatment processes, but only 11% of the pig slurry was used in biogas plants, indicating a great potential for energy recovery. For medium-sized pig farms, high transportation costs and strict standards for organic fertilizer application innovative approaches to slurry management are needed. Therefore, this study, conducted within the framework of the AMANDA (Anaerobic Manure Digestion Array) project, explores a small-scale treatment for the handling of pig slurry, presenting an option for on-farm waste management. The independent treatment system aims to recover valuable manure components, such as phosphate and nitrogen, transforming them into fertilisers, compost additives or bio-based products.*

1 Introduction

Livestock farming contribute to an estimated 14,5 % of the greenhouse gases (Cardador et al. 2022). Among other things, it escapes during the storage of animal slurry (FNR 2024). The swine industry in Germany generates a substantial amount of pig slurry, accounting for approximately 30,6 million cubic meters of liquid farm manure applied to agricultural land in 2015 (Destatis). While animal manure is a source of agricultural fertiliser, overuse can lead to groundwater pollution and impact air quality. Therefore, sustainable options for the management of the slurry should be provided to farmers and environmental regulators to avoid harm to the environment (Méité et al. 2024).

The AMANDA project aims to develop a modular technology for the treatment of farm manure to reduce methane-forming substances before field application. The process consists of two containers where the separation, and biogas process will be performed. The process begins with the separation of the liquid and solid fractions. The liquid fraction undergoes hydrolysis followed by anaerobic fermentation to generate biogas or heat. This research investigates more sustainable alternatives for the management of solid fractions, including composting and bio-based products, contributing to a closed farm nutrient loop. This should enable agricultural and livestock farms to optimally treat the farm manure and to derive energy and material benefits from the resulting material flows.

2 Methodology

2.1 Characterization of the substrate

A characterization of the pig slurry fractions (solid and liquid phases) was conducted. Moisture content was determined by oven drying at 105°C (DIN EN 13040), and organic matter composition was assessed through loss on ignition at 550°C (DIN EN 13039). Nutrient content was analysed using a CHNS Analyzer.

2.2 Determination of the biogas and methane formation potential

In order to monitor and measure the gas production of the solid and liquid fractions of pig slurry, the ANKOM system was used for an GB₂₁ test. The system measures evolved gases during anaerobic fermentation. Triple repetition was carried out in 0,5-litre bottles according to the VDI 4630. The test was carried out at 37 °C in a water bath.

2.3 Compost trials

To address the management of the solid fraction of pig slurry, 10-litre reactors will operate over five weeks to compose the residue, assessing its potential as a phosphate-rich compost additive. In Figure 1, the schema of the compost reactor is shown, the reactor includes two thermocouples to measure the temperature on the centre and the side. It was placed in a heating chamber maintained at 30 °C during the whole experiment. Oxygen supply (1 L/min) was maintained via a peristaltic pump and monitored with a flow meter. The reactor counts with a valve for the measurement of gases, such as CO₂, and O₂ to monitor the composting process using a Visit 03 gas analyzer (Messtechnik EHEIM GmbH, Schwaigern, Germany).

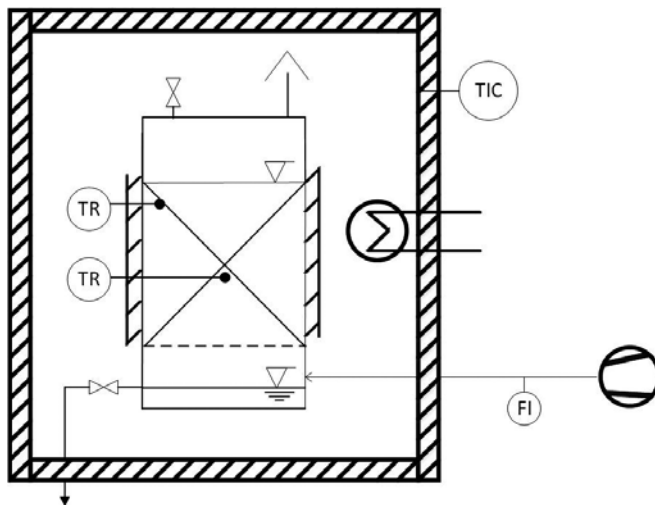


Figure 1: Schema of composting reactor

2.4 Bio-based products

The feasibility of bio composite or bio-based products will be investigated by incorporating co-substrates from the agro-food industry, such as coffee grounds, egg shells and wood chips. The methodology included a characterization of the materials, including cellulose, hemicellulose and lignin content (Fibretherm FT 12). Second, a pre-treatment process to ensure hygienic quality and odour control of the materials. After that, the mixture of the solid fraction of pig slurry with the co-substrates, followed by the production and characterization of the bio-material will be done.

3 Results

3.1 Characterization of the fractions

The characterization of the pig slurry fractions is shown in Table 1. The solid fraction contains a significantly higher DM percentage (21,0%) compared to the liquid fraction (3,7%), indicating its suitability for processes such as composting or bio-based material production. Total bound nitrogen (TNb), both organic and inorganic nitrogen, is significantly higher in the liquid fraction (1950 mg/L) compared to the solid fraction (383,2 mg/L), indicating its potential use as a liquid fertilizer after appropriate treatment.

Table 1: Characterisation of the solid and liquid fractions of pig slurry.

Parameter	Einheit	Pig slurry	
		Solid	Liquid
DM	%FM	21	3,7
VM	%FM	17,9	2,5
Ash	%FM	3,2	1,1
TNb	mg/l	383,2	1950
C	%VM	45,2	-
N	%VM	2,3	-
S	%VM	0,4	-

FM: Fresh mass, DM: Dry matter, VM: Volatile matter

3.2 Biogas production

Over a 21-day, the biogas yield was 1156 L(N)/kg_{VS} for the liquid phase, clearly outperforming the solid phase at 487 L(N)/kg_{VS}. These data highlight the potential efficiency gains in optimising biogas production by selecting the appropriate phase of the waste material. The values obtained for the solid phase could be compared to those reported in the literature for pig slurry or pig manure, which average around 400 L(N)/kg_{VS} (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft).

3.3 Composting outcomes

The composting process with three different pig slurry proportions (25%, 50% and 75%) show that the reactors could reach a temperature higher than 50 °C, which is important in the composting process for the sanitation process. The C/N ratio decreased significantly in all reactors (KR3 from 27,25 to 13,02), indicating active nitrogen mineralization and organic matter decomposition. This is a sign of successful compost maturation. In addition, lignin, cellulose, and hemicellulose concentrations decreased in all reactors, suggesting effective degradation of structural materials.

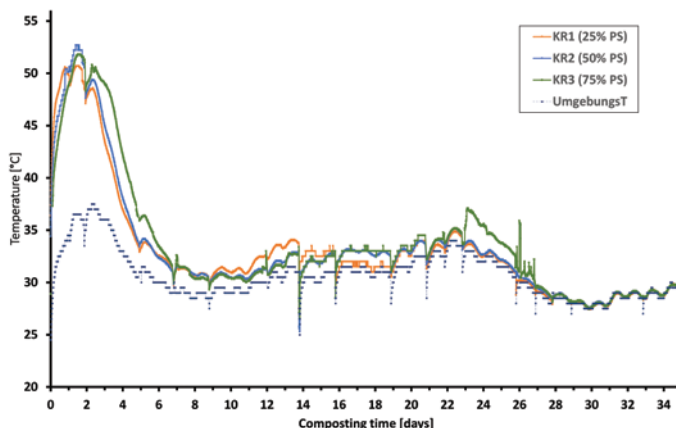


Figure 2: Compost trial with different proportions of pig slurry (25%, 50% and 75%)

3.4 Bio-based materials

Table 2 summarizes the material characterization for bio-based products. Notably, the solid pig slurry fraction exhibited the highest cellulose (34.28%) and hemicellulose (30.36%) content among the tested materials, highlighting its suitability as a primary component in bio-based product development. A preliminary test shows that the solid fraction alone does not present good structural stability therefore, to enhance the structural integrity of the intended products, incorporating other agricultural residue could be advantageous. Preliminary trials in which the solid fraction of pig slurry was treated with different concentrations of a citric acid solution and then mixed with wood chips and corn starch show a reduction of the odour and good structural stability.

Table 2: Characterisation of the materials for the production of bio-based materials [%DM].

Biomass type	Cellulose	Hemicellulose	Lignin
Eggshell	0,30	3,04	2,94
Coffee grounds	27,96	24,84	14,06
Wood chips	32,09	14,22	–
Solid fraction pig slurry	34,28	30,36	14,36

4 Conclusion

The modular approach to slurry management developed in the AMANDA project shows a pathway for reducing greenhouse gas emissions and enhancing nutrient recycling in medium-sized farms. By optimizing the use of fractions, the system supports energy recover and reduces environmental impact. Furthermore, by transforming the solid fraction of the pig slurry into biobased materials, there is not only a reduction in agricultural waste but also the creation of a valuable product.

Acknowledgements

This study was conducted under the framework of the project AMANDA, funded by the Agency for Renewable Resources (FNR). We gratefully acknowledge their support, which made this research possible.

Literature

- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: Biogasausbeuten verschiedener Substrate. In: Lfl. Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=51%2CI&anker0=substratanker#s-substratanker, zuletzt geprüft am 14.01.2025.
- Cardador, María José; Reyes-Palomo, Carolina; Díaz-Gaona, Cipriano; Arce, Lourdes; Rodríguez-Estévez, Vicente (2022): Review of the Methodologies for Measurement of Greenhouse Gas Emissions in Live-stock Farming: Pig Farms as a Case of Study. In: *Critical reviews in analytical chemistry* 52 (5), S. 1029–1047. DOI: 10.1080/10408347.2020.1855410.
- Destatis: Die Hälfte der Landwirte düngt mit Gülle. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Produktionsmethoden/aktuell-duengen.html>, zuletzt geprüft am 14.01.2025.
- FNR (2024): Wirtschaftsdüngervergärung. Energetische und emissionsmindernde Nutzung von Wirtschaftsdüngern, 2024. Online verfügbar unter <https://biogas.fnr.de/wirtschaftsduenger/wirtschaftsduengervergaelung>, zuletzt geprüft am 14.01.2025.
- Méité, René; Artner-Nehls, Astrid; Uthes, Sandra (2024): Farm adaptation to stricter nutrient management legislation and the implications for future livestock production: a review. In: *Nutr Cycl Agroecosyst* 129 (3), S. 557–584. DOI: 10.1007/s10705-024-10341-0.
- VDI 4630, November 2016: VDI 4630.

Contact

Cinthyä Lara (Research associate)

University of Rostock

Department of Waste and Resource Management

E-Mail: cinthya.lara@uni-rostock.de

Wasted potential? A look back on carbon offsetting development projects within the waste management sector in Sub-Saharan Africa

Abstract: *Using a publicly available dataset from the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), Clean Development Mechanism projects under sectoral scope 13, "waste handling and disposal", were evaluated based on a derived project performance quotient and specific costs for issued certified emission reductions (CER) to determine if there was a discernable relationship between the two variables, and to compare projects within Sub-Saharan Africa against other geographic sub-regions.*

1 Introduction

The United Nations-organized carbon offsetting scheme, the Clean Development Mechanism (CDM), which was first established by the Kyoto Protocol in 1997 (UNFCCC, 1997), is undergoing an unprecedented transition. Since the second commitment period of the Kyoto Protocol ended in 2020, the baton has been passed on to the Paris Agreement of 2015, which established its own, updated crediting mechanism, the "Paris Agreement Crediting Mechanism" (UNFCCC, 2016). Eligible CDM projects wishing to transition to this new carbon crediting mechanism, were given until the end of 2023 to submit transition request applications for review and approval by the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) Secretariat and the Article 6.4 Supervisory Body, respectively (UNEP CCC, 2025).

This presents a unique opportunity to reflect on the past successes and shortcomings of the CDM, along with the future and fate of projects transitioning to the new mechanism under the Paris Agreement—especially regarding projects within sectoral scope 13, "waste handling and disposal" (UNFCCC, 2025). Within this sectoral scope, for example, 12 composting facilities in Uganda have been set up between 2010 and 2015 (Tumuhairwe & Kakeeto, 2015). The current status of these facilities ranges from "not operational" to "operational with challenges" (based on project reporting, personal interviews, and onsite observations) and the issuance of further carbon credits in the foreseeable future is unlikely due to several of them serving as uncontrolled dumpsites, rather than as industrial composting facilities (Okori, 2023).

By accessing the database on all CDM projects (UNFCCC, 2024), the authors attempted to assess the broader performance of all projects under sectoral scope 13, to determine if there were regional differences in project performance and to eventually determine the fate of those projects that did not successfully transition to the new carbon crediting mechanism under the Paris Agreement, like the Uganda Municipal Waste Compost Programme. Initial results are presented.

2 Methodology

2.1 Criteria for inclusion in the analysis

2.1.1 Project performance quotient

Projects under 1) sectoral scope 13, “waste handling and disposal” (and all the methodologies thereunder); with 2) website project status of “Registered”; 3) reported ex-ante reductions (as determined by the project design document (PDD)); and 4) at least one issuance of certified emission reductions (CER) were included. Of the 963 registered projects under sectoral scope 13, only 428 were selected for inclusion.

2.1.2 Specific cost per certified emission reduction (CER)

The same criteria for the project performance quotient were ascribed for the determination of CER specific costs. Additionally, projects had to have reported “Total capital investment (USD)” or “Total O&M costs (USD/year)”, to be included. Of the pre-filtered 428 projects, only 280 were selected for inclusion.

The included projects were categorized into six geographical subregions in order to compare them.

2.2 Project performance quotient determination

A project’s “performance” was assessed by the number of issued CERs against its total ex-ante reductions, as determined by the PDD, across the entire duration of the project. That is, actually generated CERs as compared to the pre-determined, design CER output. Given that projects provided annual ex-ante reductions over the course of three potential, non-concurrent credit periods, formulas were written in Excel to provide for these differences. For any given credit period, the duration was truncated exactly to 10 October 2024, the most recent date when the dataset was updated.

The project performance quotient was then derived by dividing the “Total CERs issued” by the determined “TOTAL ex-ante Reductions for CP1-CP3 (until 10 Oct 2024)”, for all projects.

2.3 Specific cost per certified emission reduction (CER)

Specific costs per CER were determined with the following formula (one CER represents 1 tonne of CO₂eq):

$$CER_s = \frac{(CAPEX + (OPEX \times (CP_1 + CP_2 + CP_3)) - REV)}{CER_i}$$

Where:

- CER_s = Specific cost per certified emission reduction
- CAPEX = Total capital investments (USD)
- OPEX = Annual operating and maintenance costs (USD/year)
- CP_x = Crediting period “x” given in years
- REV = Project revenues (USD)
- CER_i = Total issued certified emission reduction

3 Results

3.1 Project Performance Distribution by Geographic Subregion

Figure 1 shows that on average the project performance quotient among the 428 considered projects is 0.30. Thus, on average only 30% of design CER output was actually issued. However, there is a large amount of variation amongst the projects, indicated by e.g. the median of 0.20 and a standard deviation of 0.28. Only 4.4% (19 projects) of the projects reached the design CER output or overperformed (Project Performance Quotient ≥ 1). The data also show that the performance between the sub-regions is not distinctly different based on the mean performance quotient (ANOVA p-value of 0.1334). The same is true between Sub-Saharan Africa and the aggregated distribution (t-test two-tailed p-value of 0.8695).

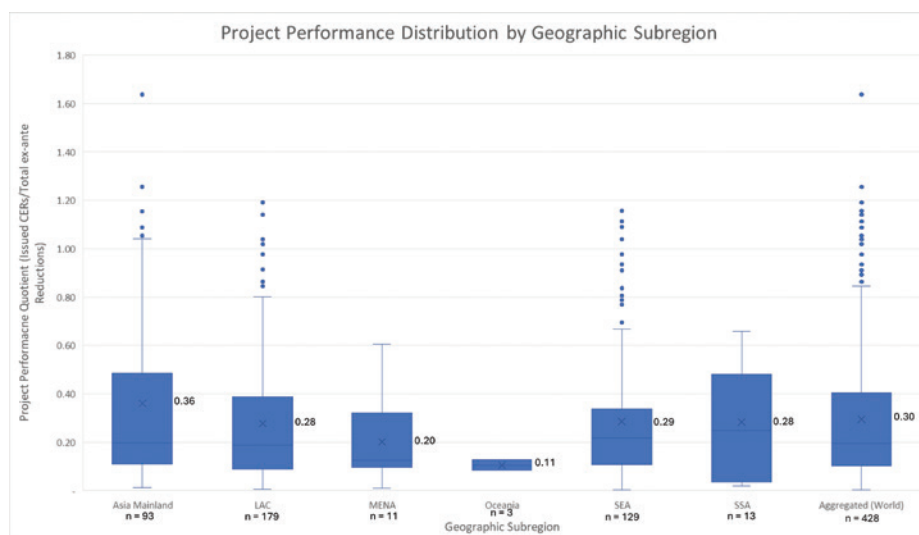


Figure 1: Project Performance Distribution by Geographic Subregion

3.2 Specific CER Cost Distribution by Geographic Subregion

The results for the specific CER Costs (Table 1) show that they vary extremely among the considered projects (from \$0.15 to \$13,863 per certified emission reduction). Nevertheless, the specific costs between subregions and the specific costs between Sub-Saharan Africa and the aggregated distribution are not distinctly different from the respective means (ANOVA p-value of 0.7836; t-test two-tailed p-value of 0.3136, respectively). In a further analysis, the costs will be compared to the actual market value of certificates.

Table 1: Specific CER Cost Distribution by Geographic Subregion

Sub-region	Sample Size	Min	Median	Max	Outliers (#)	Avg	Std Dev
Asia Mainland	n = 69	\$4.2	\$59.1	\$2,057.0	4	\$154.7	\$305.5
Latin America & Caribbean	n = 105	\$0.15	\$8.5	\$4,428.3	15	\$103.4	\$476.3
Middle East & North Africa	n = 6	\$5.0	\$13.4	\$144.8	0	\$46.3	\$58.6
Oceania	n = 2	\$116.6	\$123.4	\$130.2	0	\$123.4	\$9.6
Southeast Asia	n = 91	\$4.4	\$38.7	\$13,863.7	10	\$294.4	\$1,476.7
Sub-Saharan Africa	n = 7	\$4.2	\$11.2	\$495.2	1	\$85.7	\$181.6
Aggregated (World)	n = 280	\$0.15	\$28.3	\$13,863.7	31	\$176.6	\$904.9

3.3 Correlation between Project Performance and Specific CER Cost

When correlating the project performance quotient with the specific CER costs (Figure 2), a significant negative relationship was determined (p-value well below 0.05). I.e., with increasing project performance, a decrease in specific CER costs is observed. However, the very low R^2 value indicates a poor fit of the linear model. This is even after the CER costs have been logarithmically adapted to reduce the effect of outliers.

Further analysis will include comparing these initial results against the projects under sectoral scope 13 that successfully transitioned to the Paris Agreement Crediting Mechanism.

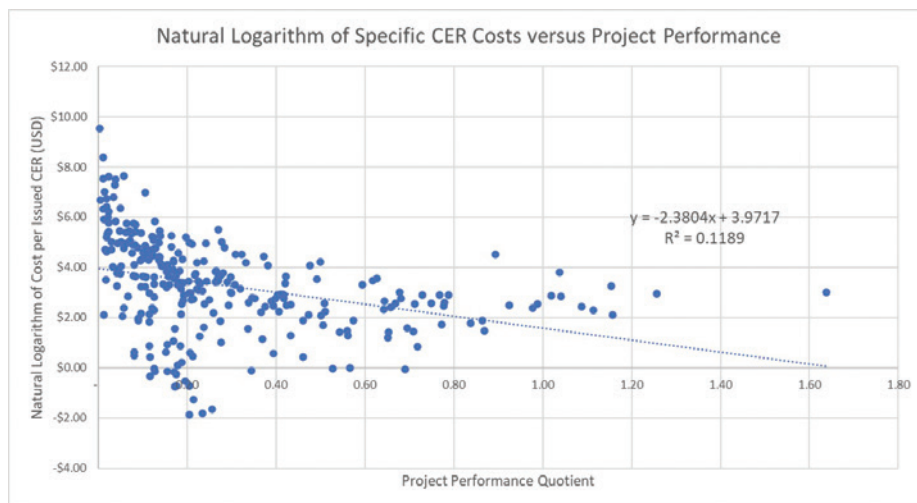


Figure 2: Specific CER Cost vs. Project Performance (natural log to account for outliers)

Acknowledgements

This work is funded by the Austrian Partnership Programme in Higher Education and Research for Development (APPEAR). APPEAR is a programme of the Austrian Development Cooperation (ADC). This study is part of the APPEAR project "Clean and Prosperous Uganda (CPUG)" (Project No. 256, 2022).

Literature

- Okori, J. (2023, April 18). Criteria for Selecting CDM Composting Plants in Uganda. (R. Lee, Interviewer)
- Tumuhairwe, J., & Kakeeto, J. (2015). Monitoring report form for CDM programme of activities: Uganda Municipal Waste Compost Programme (2956). Kampala: UNFCCC.
- UNEP CCC. (2025, January). CDM Pipeline. Retrieved from UNEP Copenhagen Climate Centre: <https://unepccc.org/cdm-ji-pipeline/>
- UNFCCC. (1997, December 11). Kyoto Protocol. Kyoto, Japan: UNFCCC.
- UNFCCC. (2016, April 22). Paris Agreement. Paris, France: UNFCCC.
- UNFCCC. (2024, October 10). Database for PAs and PoAs. Bonn, North Rhine-Westphalia, Germany. Retrieved from <https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>
- UNFCCC. (2025, January). CDM Methodologies: Sectoral Scope Linkage. Retrieved from CDM UNFCCC: <https://cdm.unfccc.int/DOE/scopes.html>

Contact

Richard David Lee, MSc., Associate Researcher
Vienna University of Technology (TU Wien)
Institute for Water Quality and Resource Management
Tel: +43 (1) 58801-22658
E-Mail: Richard.Lee@tuwien.ac.at
<https://www.tuwien.at/en/cee/iwr>

Landwirtschaftliche Bioressourcen Energetisch und Stofflich Nutzen (BESN)

Abstract: Das Projekt BESN untersucht die Potenziale der Nutzung biogener Reststoffe zur Förderung einer nachhaltigen Energieproduktion und Kreislaufwirtschaft in Tirol. Im Rahmen der europäischen Klimaneutralitätsziele und des Tiroler Plans zur Energieautonomie bis 2050 adressiert das Projekt die Nutzung von Wirtschaftsdüngern, Ernterückständen und organischen Abfällen durch anaerobe Behandlung. Ziel ist die Produktion von Biomethan, das in das Gasnetz eingespeist wird. Dadurch sollen klimaschädliche Emissionen reduziert, die Bodenfruchtbarkeit durch Gärreste erhöht und die Abhängigkeit von fossilen Ressourcen verringert werden. Eine zentrale Herausforderung ist die kleinstrukturierte Landwirtschaft in Tirol, die die Wirtschaftlichkeit einzelner Biogasanlagen einschränkt. BESN strebt daher die Umsetzung von regionalen Gemeinschaftsanlagen an, die organische Reststoffe effizient bündeln. Mittels GIS-gestützter Analysen wurden potenzielle Standorte für solche Anlagen identifiziert, wobei die Nähe zu Infrastrukturen wie Gasnetzen und die Minimierung von Transportwegen berücksichtigt wurden.

1 Einleitung

Mit dem „Green Deal“ strebt die Europäische Union an, bis 2050 netto CO₂-neutral und der erste klimaneutrale Kontinent zu werden (Europäische Kommission, 2024). Für alle Sektoren, die nicht am europäischen Emissionshandel (ETS) teilnehmen, ist die zu erreichende Reduktion der Treibhausgas (THG)-Emissionen im jeweiligen nationalen Klima- und Energieplan vorgeschrieben. Für Österreich bedeutet dies eine Reduktion der THG-Emissionen von 48% gegenüber 2005, für den Zeitraum 2021-2030 (Bundesministerium für Klimaschutz, 2024b). Der Sektor Landwirtschaft war im Jahr 2022 für 8,2 Mio. Tonnen Co₂-Äquivalente verantwortlich, was rund 17,8% der nationalen THG-Emissionen ohne ETS entspricht (Bundesministerium für Klimaschutz, 2024a). Der größte Teil der Emissionen stammt aus der Verdauung in Tiermägen (52%), gefolgt von der Düngung (21%) und dem Wirtschaftsdünger-Management (13%) (Bundesministerium für Klimaschutz, 2024a). Insbesondere bei der offenen Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern entstehen klimaschädliche Emissionen und Stickstoffverluste, die auch die Düngewirkung beeinträchtigen (Aguirre-Villegas and Larson, 2017).

Um den Energiebedarf ohne fossile Energieträger decken zu können, ist es neben der Verbrauchsreduktion notwendig, alle verfügbaren biogenen Reststoffe, die nicht für eine höherwertige Nutzung geeignet sind, für die Erzeugung erneuerbarer Energie zu nutzen. Die Landwirtschaft verfügt über ein erhebliches Potenzial an biogenen Reststoffen wie Wirtschaftsdünger, Ernterückstände und Zwischenfrüchte. Die anaerobe Behandlung dieser Reststoffe bietet eine effiziente Möglichkeit, mehrere Nachhaltigkeitsziele gleichzeitig zu erreichen. Dazu gehören die Produktion von erneuerbarer Energie in Form von Biogas, eine

kostengünstige Abfallwirtschaft, die Reduktion klimaschädlicher Gase wie Methan, Ammoniak und Lachgas, die Reduktion des Mineraldüngerbedarfs sowie die Förderung nachhaltiger landwirtschaftlicher Praktiken. Gärreste aus der anaeroben Behandlung sind wertvolle organische Dünger, die das Pflanzenwachstum fördern, die Bodenfruchtbarkeit verbessern und zur Kohlenstoffspeicherung beitragen. Langfristig stärken sie die Bodenstruktur und erhöhen die Widerstandsfähigkeit gegen extreme Wetterereignisse (European Biogas Association, 2024). Auch das Land Tirol hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2050 energieautonom zu werden (Energieagentur Tirol, 2024). In der kleinstrukturierten Tiroler Landwirtschaft sind jedoch hofeigene Biogasanlagen aufgrund der hohen Gestehungskosten oft nicht wirtschaftlich. Das Projekt BESN zielt darauf ab, regionale organische Reststoffe aus Landwirtschaft und Lebensmittelindustrie gemeinsam mit Wirtschaftsdünger in Gemeinschaftsanlagen zur Biogasproduktion zu nutzen. Ziel ist es, aus Gärresten hochwertigen organischen Dünger herzustellen und das Biogas zu Biomethan für die Einspeisung in das Gasnetz aufzubereiten. Damit wird die Kreislaufwirtschaft gefördert und die Abhängigkeit von Energie- und Nährstoffimporten verringert.

2 Methodik

2.1 Potenzialerhebung für Tirol

Im Rahmen des Projektes „BESN“ wurden in einem ersten Schritt die Energiepotenziale der in Tirol anfallenden landwirtschaftlichen Reststoffe erhoben. Als Grundlage dienten Studien und Erhebungen, die im Rahmen der Zielvereinbarung „Tirol 2050 Energieautonom“ und anderer Projekte durchgeführt wurden. Für die Planung der Anlage(n) werden die Standortdaten der Großvieheinheiten (GVE) in einer Tiroler Region mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) analysiert. Unter Berücksichtigung der geographischen, infrastrukturellen, sozialen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen werden mögliche Standorte identifiziert. In einem weiteren Schritt werden die möglichen Standorte mit Stakeholdern wie der Landwirtschaftskammer, den Gemeinden und dem Maschinenring diskutiert.

3 Ergebnisse und Ausblick

Als Grundlage für die theoretisch verfügbaren Energiepotenziale aus biogenen Reststoffen für Tirol dient der Bericht: „Energie-Ziel-Szenarien Tirol 2050 und 2040 mit Zwischenzielen 2030“ (Ebenbichler et al., 2021). Die Datenbasis wurde auf den aktuellen Wissensstand (2024) aktualisiert und ist in Tabelle 1 den Werten aus der genannten Studie gegenübergestellt.

Die Kategorie der biogenen Abfälle weist aufgrund der schwierigen Datenlage die größten Unsicherheiten auf. Diese beinhaltet Bioabfälle aus Haushalten und Gastronomie, Bioabfälle aus Industrie und Landwirtschaft, Grünschnitt, Baum- und Strauchschnitt, Fettabscheiderinhalte und Bioabfälle aus dem Restmüll. Als Datengrundlage in Ebenbichler et al. (2021) diente eine Arbeit von Lindorfer et al. (2017), während in der vorliegenden Arbeit die Daten gemeinsam mit der Abteilung Abfall des Landes Tirol erhoben und abgestimmt wurden. In der aktuellen Erhebung fehlt lediglich der Anteil der Eigenkompostierung, der nicht seriös abgeschätzt werden kann. Derzeit werden in Tirol bereits ca. 57 % der biogenen Reststoffe der anaeroben Behandlung zugeführt, teils als Co-Substrat in Faultürmen von Kläranlagen, teils in Monovergärungsanlagen. Beim Wirtschaftsdünger wurden in der Studie von Ebenbichler et al. (2021) nur Betriebe ab 50 GVE berücksichtigt, was einem Erfassungsgrad von ca. 33% aller verfügbaren GVE entspricht. In der aktuellen

Tab. 1: Gegenüberstellung der theoretisch verfügbaren Energiepotenziale in Tirol (in TJ/a), die für eine anaerobe Behandlung zur Verfügung stehen (gerundet).

TJ/a	2020 (Ebenbichler et al., 2021)	2024 (aktuelle Betrachtung)
Biogene Abfälle	674*	704***
Wirtschaftsdünger	590**	700
Klärschlamm	265	287
Nachwachsende Rohstoffe	7	18
Summe	1536	1709

* ohne Hauskompostierung, Lebensmittelindustrie und Abfälle aus Restmüll, ** nur Betriebe mit mehr als 50 GVE,

*** ohne Hauskompostierung

Erhebung wurde davon ausgegangen, dass 50% des theoretisch verfügbaren Potenzials in die anaerobe Behandlung eingebracht werden können. Wirtschaftsdünger werden in Tirol derzeit nur vereinzelt in der Vergärung eingesetzt und weisen daher mit 700 TJ/a das größte noch erschließbare Potenzial auf. Die nachwachsenden Rohstoffe wurden in der aktuellen Erhebung um die verfügbaren Gemüseabfälle ergänzt, wodurch sich ein deutlich höheres Potenzial ergibt. Würden alle verfügbaren biogenen Reststoffe anaerob verwertet, stünden insgesamt 1709 TJ/a (entspricht 475 GWh) an erneuerbarem Biomethan zur Verfügung. Der derzeitige Erdgasverbrauch in Tirol beträgt rund 3800 GWh pro Jahr. Mit biogenen Reststoffen könnten somit rund 12,5 % des Methanbedarfs in Tirol gedeckt werden.

Für die Analyse der GVE in den Tiroler Regionen wurde die Software QGIS (QGIS.org, 2024) verwendet. Die grafische Darstellung erfolgte mit Hilfe der „Heatmap“-Funktion (Abbildung 1). Für die Auswertung wurde ein potenzieller Standort für eine Biogasanlage anhand infrastruktureller und geographischer Gegebenheiten (z.B. Nähe zum Gasnetz, Verkehrsinfrastruktur) ausgewählt. Um die Transportwege möglichst kurz zu halten, wurden für die Auswertung nur Betriebe in einem Umkreis von 10 km, unter Berücksichtigung der topographischen Verhältnisse (Berge), berücksichtigt. Insgesamt befinden sich 5699 GVE, verteilt auf 186 Betriebe im Umkreis der geplanten Biogasanlage. Dies entspricht einem Methanpotential von etwa 16,4 GWh. Diese Kurzanalyse dient einer ersten Abschätzung und soll mögliche Standorte für landwirtschaftliche Biogasanlagen aufzeigen. In einem weiteren Schritt können so die potenziellen Standorte mit den Stakeholdern diskutiert und geeignete Betreiberformen gefunden werden.

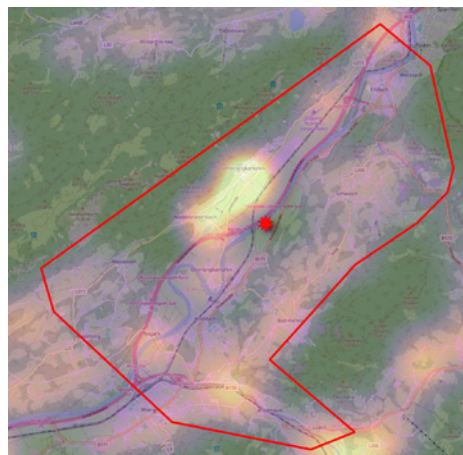


Abb. 1: „Heatmap“ der GVE in einer Tiroler Region. Helle Bereiche zeigen eine hohe Anzahl an GVE. Der rote Punkt markiert den Standort der Biogasanlage, die rote Linie markiert den 10 km Umkreis unter Berücksichtigung der topographischen Gegebenheiten. Karte: © OpenStreetMap, CC-BY-SA

Danksagung

Das Projekt Landwirtschaftliche Bioressourcen Energetisch und Stofflich Nutzen (BESN) wird durch die Europäische Union, Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung, Interreg Österreich-Bayern 2021-2027 gefördert. Förderzeitraum: 05/2024- 04/2027.

Literatur/Quellen

- Aguirre-Villegas, H.A., Larson, R.A., 2017. Evaluating greenhouse gas emissions from dairy manure management practices using survey data and lifecycle tools. *Journal of Cleaner Production* 143, 169-179.
- Bundesministerium für Klimaschutz, U., Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024a. Fortschrittsbericht 2024 nach § 6 Klimaschutzgesetz. Wien.
- Bundesministerium für Klimaschutz, U., Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024b. Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- Ebenbichler, R., Hertl, A., Hofmann, A., Streicher, W., Mailer, M., Tosatto, A., Anton, I., Reith, F., Schaaf, N., Rzehak, S., Ochs, F., 2021. Energie-Szenarien Tirol 2050 und 2040 mit Zwischenziel 2030.
- Energieagentur Tirol, 2024. Tirol 2050 energieautonom. <https://www.tirol2050.at/>. (Accessed 19.12. 10:00 2024).
- Europäische Kommission, 2024. Der Europäische Grüne Deal. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de. (Accessed 19.12. 11:00 2024).
- European Biogas Association, 2024. Exploring digestate's contribution to healthy soils, in: Mieke Decorte (EBA), G.P.E., Marina Pasteris (EBA), Lucile Sever (EBA), Chiara Gaffuri (EBA) and Giulia Cancian (EBA), with the collaboration of Ulysse Bremond (Air Liquide) and Cyril Flamin (ENGIE) (Ed.). *European Biogas Association*, p. 40.
- Lindorfer, J., Fazeni, K., Tichler, R., Steinmüller, H., 2017. Erhöhung des Einsatzes von erneuerbarem Methan im Wärmebereich. *Energieinstitut an der Johannes-Kepler-Universität Linz*
- QGIS.org, 2024. QGIS Geographic Information System., Open Source Geospatial Foundation Project.

Kontakt

Thomas Lichtmanegger, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Universität Innsbruck/ Institut für Infrastruktur

Tel.-Nr. +43 512 507 62196

E-Mail: thomas.lichtmanegger@uibk.ac.at

Homepage: <https://www.uibk.ac.at/de/umwelttechnik/forschung/abfallbehandlung-und-ressourcenmanagement/besn/>

Zirkuläre Absichten, lineare Realitäten? Eine Evaluierung der Kreislaufwirtschaft von Verpackungsabfällen in Österreich

Abstract: Die Einführung von Vorgaben der EU-Recyclingquoten zur Messung der Kreislaufwirtschaft in den Mitgliedsstaaten stellt einen bedeutenden Schritt zur Förderung der Ressourcenschonung und der Reduzierung von Abfällen dar. Ab dem Jahr 2025 werden die zu erreichenden Quoten deutlich erhöht und die Berechnungsvorgaben der Quoten verschärft. In diesem Beitrag wird eine Materialflussanalyse der österreichischen Verpackungsabfälle für das Jahr 2020 durchgeführt, um die Erfassungsgrade, Recycling-, Verbrennungs- und Deponierungsquoten zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigen, dass Österreich die EU-Recyclingziele 2025 für Aluminium-, Eisen-, Glas- und Papierverpackungen bereits 2020 erreichen konnte, während Kunststoffe weiterhin eine bedeutende Herausforderung darstellen. Die Analyse hebt die Bedeutung verschiedener Abfallbehandlungsstrategien hervor und verdeutlicht, dass das Abfallmanagement von Verpackungen aus Papier und vornehmlich Kunststoffen zur Zielerreichung 2030 verbessert werden muss, insbesondere in der getrennten Sammlung. Die Studie zeigt jedoch auch Einschränkungen, da sich die Quotenvorgaben stark auf Recycling konzentrieren und andere wichtige Aspekte wie Abfallreduktion, Wiederverwendung und Produktdesign vernachlässigt werden. Zukünftige Forschung sollte diese Aspekte stärker beleuchten und auch die Frage von potenziell gesundheitlichen Risiken durch Recyclingmaterialien einbeziehen.

1 Einleitung

Ressourcenverlust und Umweltverschmutzung – Auswirkungen einer linearen, nicht nachhaltigen Wirtschaftsweise. Um dem entgegen zu wirken sowie die Zirkularität innerhalb der Mitgliedsstaaten zu fördern, hat die EU das Kreislaufwirtschaftspaket ins Leben gerufen. Der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft erfordert dabei robuste Datensätze, aussagekräftige Indikatoren und geeignete Bewertungsmethoden. Der aktuelle Diskurs wird stark durch die Recyclingquoten geprägt, die an die Erhebung und Meldung von Abfall- und Recyclingdaten an Eurostat gekoppelt sind (EC, 2019; EEA, 2016). Hierbei ist eine fundierte Analyse der Materialflüsse innerhalb von Volkswirtschaften von zentraler Bedeutung, um Recyclingquoten präzise zu berechnen und Zielerreichung zu messen (Amadei et al., 2023). Die Mehrheit der nationalen Materialflussanalysen (MFAs) zu Verpackungsabfällen konzentriert sich vor allem auf Kunststoffe (Gonçalves et al., 2024; Picuno et al., 2021; Thomassen et al., 2022). Nur wenige Studien befassen sich mit metallischen Verpackungsabfällen (Lederer & Schuch, 2024; Van Caneghem et al., 2019); Glas- und Papierverpackungsabfälle sind in der wissenschaftlichen Literatur ebenfalls unterrepräsentiert (Mattson et al., 2024). Insgesamt erschweren oder verhindern unzureichende Datenverfügbarkeit und -qualität die Einhaltung der EU-Berechnungsvorgaben. Des Weiteren werden Potentiale übersehen und Fortschritte nicht evaluiert. Ziel

dieses Beitrages ist eben diese Potentialerhebung und Erkennung von Defiziten mithilfe einer Analyse der österreichischen Verpackungsabfallströme sowie die Bewertung hinsichtlich der Erfassung, des Recyclings, der Verbrennung und der Deponierung. Dies bildet nicht nur eine Basis zur Berechnung von Recyclingquoten, sondern auch für weiterführende Evaluierungen jenseits der Quotenanalyse.

2 Methodik

Dieser Beitrag basiert auf einer umfassenden MFA der österreichischen Siedlungsabfallwirtschaft für das Jahr 2020 (Lipp & Lederer, 2025). Im Fokus der Untersuchung stehen die Prozesse der Sammlung, Sortierung, Aufbereitung, Verbrennung, Verwertung und Deponierung von Abfällen. Darüber hinaus umfasst die Analyse die Behandlung von Restmüll, Gewerbeabfällen, Sperrmüll und Baustellenabfällen sowie die Untersuchung von Müllverbrennungsanlagen (MVA) einschließlich nachgelagerter Aschesortierung. Schwerpunkte der MFA liegen auf den Materialströmen und Verwertungswegen für Aluminium-, Eisen-, Papier-, Pappe- und Karton- (PPK), Glas- sowie Kunststoffverpackungen.

Zur Bestimmung präziser Erfassungsgrade, Recycling-, Verbrennungs- und Deponierungsquoten wurden eigene Datenerhebungen und Probenahmen in Restmüllsplittingsanlagen (RMS), mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) sowie bei der Aufbereitung von Ersatzbrennstoffen (EBS) durchgeführt. Da die Erhebung von Stoffströmen gemäß der EU-Abfallverzeichnisverordnung für die Nachvollziehbarkeit gemischter Siedlungsabfälle unzureichend ist, wurden in Kooperation mit österreichischen Anlagenbetreibern (RMS, MBA, EBS) zusätzliche Umfragen zu den Input-, Output- und Verwertungswegen der Materialien durchgeführt.

3 Ergebnisse

Laut den Ergebnissen erreicht Österreich schon im Jahr 2020 die EU-Recyclingziele 2025 für Verpackungen insgesamt sowie für Aluminium-, Eisen-, Glas- und PPK-, während Kunststoffverpackungen weiterhin eine erhebliche Herausforderung darstellen. Die Erfassungsgrade sowie Verbrennungs- und Deponierungsquoten für alle untersuchten Materialien sind in Abbildung 1 dargestellt.

Für eine präzise Berechnung der Aluminiumquoten sind weitere Untersuchungen zur Oxidation in MVAs empfehlenswert. Diese sind entscheidend, um zu beurteilen, ob die Zielquote für 2030 erreicht werden kann. In Österreich funktioniert das Management von Eisenverpackungen hervorragend und übertrifft sogar die Best-Practice-Beispiele innerhalb der EU (Tallentire & Steubing, 2020). Der Erfassungsgrad von Glasverpackungen ist vergleichsweise hoch, jedoch geht Glas verloren, sobald es im Restmüll landet, da kaum Recycling von Glas aus Restmüll bzw. Müllverbrennungsaschen stattfindet, Letzteres wird jedoch derzeit ausgebaut (Mühl et al., 2024). Die PPK-Quote wird voraussichtlich für 2025 erreicht, für das Jahr 2030 wird jedoch eine Sammelsteigerung erforderlich sein, da die festgelegten Zielvorgaben eine erhöhte Herausforderung darstellen. Die Ausweitung von PPK-Verbundverpackungen mit Kunststoffen könnte in Zukunft die Recyclingquote negativ beeinflussen. Bei Kunststoffen stellt die weitere Erhöhung der getrennten Sammlung eine große Herausforderung – vor allem in urbanen Regionen – dar, weshalb auch alternative Quellen wie der Restmüll erschlossen werden müssen, um die Quote zu erreichen.

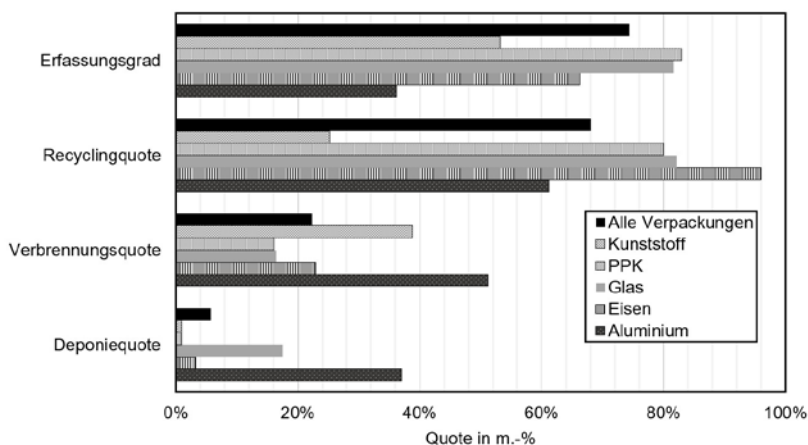


Abbildung 1: Erfassungsgrad, Recycling-, Verbrennungs- und Deponiequote von Verpackungsabfällen in Österreich 2020

4 Conclusio

In der vorliegenden Studie wurde die Methode MFA eingesetzt, um die Kreislaufwirtschaft von Verpackungsabfällen in Österreich für das Jahr 2020 anhand von Erfassungsgraden, Recycling-, Verbrennungs- und Deponierungsquoten zu evaluieren. Die Relevanz verschiedener Abfallbehandlungsstrategien zur Förderung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft werden durch die Ergebnisse hervorgehoben. Die Resultate deuten darauf hin, dass Österreich in der Lage ist, alle EU-Recyclingziele für Aluminium, Eisen, Glas und PPK bis 2025 zu erreichen, während die Herausforderung im Bereich der Kunststoffe weiterhin bestehen bleibt.

Die Untersuchung zeigt jedoch bestimmte Einschränkungen auf, da sie sich primär auf Recycling als zentralen Prozess der Kreislaufwirtschaft konzentriert und dabei andere wichtige Aspekte wie Reduzierung, Wiederverwendung und Produktdesign außer Acht lässt. Künftige Forschung sollte demnach diese Faktoren stärker betrachten. Zudem bleibt die Frage unbeantwortet, ob Recycling immer die beste Lösung darstellt, insbesondere im Hinblick auf eine potenzielle Akkumulation gesundheitsschädlicher Stoffe.

Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Weiters bedanken wir uns sehr herzlich für die finanzielle und inhaltliche Unterstützung durch unsere Unternehmenspartner, in alphabetischer Reihenfolge: Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoff Recycling Austria AG, Brantner Österreich GmbH, Holding Graz – Kommunale Dienstleistungen GmbH, Lenzing Aktiengesellschaft, Linz Service GmbH, MM Board & Paper, Wien Energie GmbH und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H. Weiters bedanken wir uns bei unserem strategischen Partner, der Magistratsabteilung MA 48, zuständig für Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrparkmanagement der Stadt Wien.

Literatur/Quellen

- Amadei, A. M., Rigamonti, L., & Sala, S. (2023). Exploring the EU plastic value chain: A material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 197, 107105. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107105>
- EC. (2019). Commission Implementing Decision (EU) 2019/665 of 17 April 2019 amending Decision 2005/270/EC establishing the formats relating to the database system pursuant to European Parliament and Council Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste (notified under document C(2019) 2805). *OJ L*, 112, 26–46.
- EEA. (2016). *Circular Economy in Europe: Developing the Knowledge Base* [EEA Report No 2/2016]. Publications Office of the European Union.
- Gonçalves, M., Freire, F., & Garcia, R. (2024). Material flow analysis and circularity assessment of plastic packaging: An application to Portugal. *Resources, Conservation and Recycling*, 209, 107795. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107795>
- Lederer, J., & Schuch, D. (2024). The contribution of waste and bottom ash treatment to the circular economy of metal packaging: A case study from Austria. *Resources, Conservation and Recycling*, 203, 107461. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107461>
- Lipp, A.-M., & Lederer, J. (2025). The circular economy of packaging waste in Austria: An evaluation based on statistical entropy and material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 217, 108193. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108193>
- Mattson, K. R., Pettersen, J. B., & Brattebø, H. (2024). Incineration economy: Waste management policy failing the circular economy transition in Norway. *Resources, Conservation and Recycling*, 210, 107838. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107838>
- Mühl, J., Hofer, S., Blasenbauer, D., & Lederer, J. (2024). Recovery of aluminum, magnetic ferrous metals and glass through enhanced industrial-scale treatment of different MSWI bottom ashes. *Waste Management*, 190, 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.10.025>
- Picuno, C., Allassali, A., Chong, Z. K., & Kuchta, K. (2021). Flows of post-consumer plastic packaging in Germany: An MFA-aided case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105515. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105515>
- Tallentire, C. W., & Steubing, B. (2020). The environmental benefits of improving packaging waste collection in Europe. *Waste Management*, 103, 426–436. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.045>
- Thomassen, G., Van Passel, S., Alaerts, L., & Dewulf, J. (2022). Retrospective and prospective material flow analysis of the post-consumer plastic packaging waste management system in Flanders. *Waste Management*, 147, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.05.004>
- Van Caneghem, J., De Coster, E., Vandenbergh, K., De Broyer, S., Lambrix, N., & Weemaels, L. (2019). Closing the household metal packaging cycle through recovery of scrap from waste-to-energy bottom ash: The case study of Flanders. *Resources, Conservation and Recycling*, 144, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.028>

Kontakt

Dipl.-Ing.ⁱⁿ Anna-Maria Lipp, Projektassistentin

Christian Doppler Labor für recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und techn. Biowissenschaften, TU Wien

Getreidemarkt 9/166, 1060 Wien, Österreich – Tel.-Nr.: +43 1 58801 166156

E-Mail: anna-maria.lipp@tuwien.ac.at – www.tuwien.at/tch/icebe/e166-01/cd-labor-kreislaufwirtschaft

Getrennte Sammlung und Rückgewinnung von Aluminium aus Siedlungsabfällen

Abstract: Aluminium hat aufgrund seiner vielseitigen Eigenschaften eine breite Palette an Anwendungsmöglichkeiten. Insbesondere Verpackungen führen zu einem Eintrag an Aluminium in lokale Siedlungsabfallwirtschaftssysteme, aus welchem Aluminium teilweise getrennt gesammelt oder rückgewonnen wird, um es dem Recycling zuzuführen. Nicht-recyceltes Aluminium stellt einen Verlust an Ressourcen dar und sollte in einer Kreislaufwirtschaft auf ein Minimum beschränkt werden. Diese Studie untersucht die Mengen an Aluminium, die in der Stadt Wien getrennt gesammelt, aus Müllverbrennungsaschen rückgewonnen und über die Rückstände der Aschenaufbereitung sowie über die Flugaschen der Müllverbrennung deponiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass derzeit 15% des gesamten Aluminiums (Verpackungen) getrennt gesammelt und 48% aus den Müllverbrennungsaschen (Verpackungen und Nicht-Verpackungen) rückgewonnen werden. Mit einer gesamt Aluminiumrückgewinnung von 63% können die Recyclingziele der Europäischen Union für 2030 bereits heute erreicht werden. Weiters konnte ermittelt werden, dass durchschnittlich 7% des Aluminiums in der Verbrennung oxidiert wird und derzeit noch 30% des Aluminiums in metallischer Form in den Verbrennungsrückständen verbleiben und damit deponiert werden.

1 Einleitung

Aluminium gehört zu den meist genutzten Metallen weltweit, was auf seine weitreichenden Eigenschaften zurückzuführen ist. Dazu zählen eine geringe Dichte, metallische Duktilität, elektrische sowie thermische Leitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit bei Umgebungsbedingungen sowie Licht- und Gasundurchlässigkeit. Dies führt zu einer weiten Anwendungspalette von Bauindustrie, Automotive, Elektronik bis hin zur Verpackungsindustrie (Vollmer et al., 2019). Durch Letztere fallen große Post-Consumer-Abfallmengen aus Aluminium an, die in lokale Siedlungsabfallwirtschaftssysteme eingetragen werden. Da die Primärherstellung von Aluminium sehr ressourcen- und energieintensiv ist, sollte Aluminium bestmöglich getrennt gesammelt und aus Abfällen rückgewonnen werden, um Verluste zu vermeiden. Verlustquellen von Aluminium sind insbesondere Oxidationsverluste, die bei der Abfallverbrennung auftreten, sowie Einträge in die Deponie über Verbrennungsrückstände. Jedoch ist über die Aluminiumverluste im Siedlungsabfallwirtschaftssystem wenig bekannt. In der Literatur wird von Oxidationsraten von 20% für Getränkedosen bis zu 60% für Aluminiumfolien in der Müllverbrennung berichtet (Biganzoli et al., 2012; Hu et al., 2011). Warrings and Feller (2018) berichteten hingegen von einer Oxidationsverlustrate von 10% sowie von einer Verlustrate von 49% über die Deponierung, während Lederer und Schuch (2024) nur 20% Verlust über die Deponierung bestimmt hatten. Dies zeigt, dass keine einheitlichen Daten in der Literatur existieren, die für etwaige Be-

rechnungen dienlich sein könnten. Da diese Daten jedoch wichtige Erkenntnisse über das städtische Siedlungsabfallwirtschaftssystem darstellen, hatte die durchgeführte Studie das Ziel, diese Daten zu ermitteln.

Die Forschungsfragen lauten: (i) Welche Mengen an Aluminium werden derzeit getrennt gesammelt? (ii) Welche Mengen an Aluminium werden derzeit aus den Müllverbrennungsaschen rückgewonnen? (iii) Welche Mengen an Aluminium werden in der Müllverbrennung zu Aluminiumoxid oxidiert? (iv) Welche Mengen an metallischem Aluminium werden über die Rückstände der Aschenaufbereitung und die Flugaschen deponiert?

2 Methodik

2.1 Betrachtetes Abfallwirtschaftssystem

Ein großes Problem bei der Bilanzierung von Aluminiumflüssen in Abfallwirtschaftssystemen stellt die schlechte Datenlage dar (Lederer & Schuch, 2024). Im Gegensatz dazu ermöglicht die ausgezeichnete Datenlage in der betrachteten mitteleuropäischen Großstadt eine komplette Bilanzierung der Aluminiumflüsse. Aluminiumabfälle werden einerseits als Altstoffe getrennt gesammelt, gelangen jedoch andererseits auch in den gemischten Siedlungsabfall sowie in den Sperrmüll und damit in die Müllverbrennung. In allen vier Müllverbrennungsanlagen (MVAs) der Stadt wird überwiegend der kommunale, gemischte Siedlungsabfall verbrannt. Sonstige Abfälle, die verbrannt werden, umfassen beispielsweise Klärschlamm, organische Sortierreste aus der Kompostaufbereitung oder nicht-gefährliche medizinische Abfälle. Da die Zusammensetzung dieser Abfälle nicht im Detail bekannt ist, wurde vereinfachend angenommen, dass diese keine signifikanten Aluminiumfrachten in die Verbrennungsanlagen einbringen. Dies kann dadurch gerechtfertigt werden, dass diese Abfälle nur geringe Mengen im Vergleich zum gemischten Siedlungsabfall und Sperrmüll ausmachen, und gewisse Kenntnisse über diese Abfälle vorliegen (z.B. sicher kein Eintrag von metallischem Aluminium über Klärschlamm). Eine mechanische Siedlungsabfallaufbereitungsanlage produziert den Brennstoff für die städtische Wirbelschichtmüllverbrennungsanlage, während für die Verbrennung in den drei städtischen Rostfeuerungsanlagen keine mechanische Vorbehandlung notwendig ist. In der Auf-

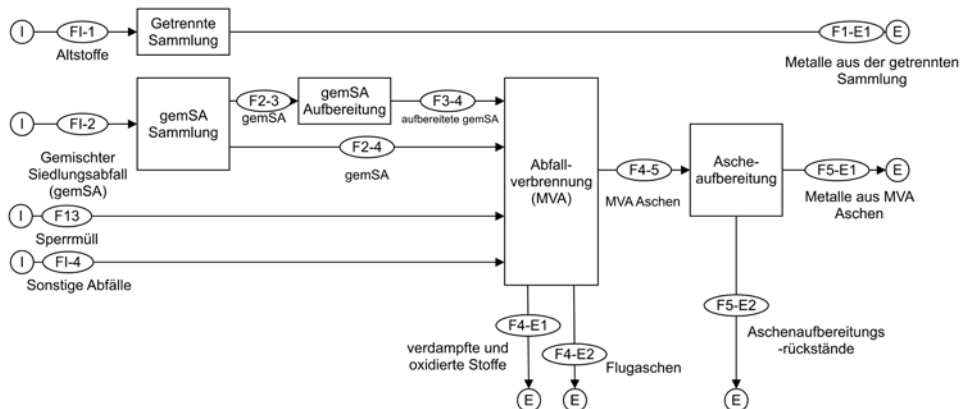


Abbildung 1: Betrachtetes Siedlungsabfallwirtschaftssystem (modelliert mit Software STAN 2.7).

bereitungsanlage für Müllverbrennungsrückstände werden ausschließlich städtische Müllverbrennungsrückstände aufbereitet. Die Aschenaufbereitungsrückstände sowie die Flugaschen werden routinemäßig auf ihren metallischen Aluminiumgehalt analysiert. Beide Reststoffe werden derzeit deponiert. Abbildung 1 zeigt das Wiener Siedlungsabfallwirtschaftssystem in einer vereinfachten Darstellung.

2.2 Datenerhebung und Modellierung

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden Daten zum jährlichen Aufkommen an getrennt gesammelten Altstoffen, gemischt gesammelten Siedlungsabfällen und Sperrmüll sowie den Aluminiumgehalten in diesen Abfällen bei der Stadt angefragt. Weiters wurden die unterschiedlichen Abfälle sowie Mengen, die in den verschiedenen MVAs verbrannt werden, angefragt, sowie die Mengen der verschiedenen Verbrennungsrückstände. Ebenso wurde der Gehalt an metallischem Aluminium in den Aufbereitungsrückständen und den Flugaschen vom Betreiber zu Verfügung gestellt. Der Gehalt an Aluminium in den Bett- und Rostaschen vor sowie nach der Aufbereitung wurde in der Vergangenheit in wissenschaftlichen Studien untersucht und für diese Studie herangezogen (Blasenbauer et al., 2023; Huber et al., 2020). Die Modellierung erfolgte als Materialflussanalyse (MFA) nach Brunner and Rechberger (2016), welche mit drei Grundformeln dargestellt wird. Zunächst müssen die Güterflüsse bilanziert werden, wobei Güter alle jene Materialflüsse mit einem positiven oder negativen ökonomischen Wert darstellen (bspw. Abfälle, Sekundärrohstoffe, ect.). Formel 1 beschreibt die Massenerhaltung der Güterflüsse.

$$\sum \dot{m}_{j,input} = \sum \dot{m}_{j,output} + \dot{m}_{j,Lager} \quad (\text{Formel 1})$$

Formel 1 stellt jeweils den Massenfluss des Gutes j dar. Die Bilanzierung der Sub-Güterflüsse (bspw. Aluminium) erfolgt über den Zusammenhang in Formel 2. Gleichzeitig setzt sich jedes Gut j aus seinen Subgütern i zusammen, sodass der Zusammenhang in Formel 3 gilt.

$$\dot{x}_{i,j} = \dot{m}_j \cdot c_{i,j} \quad (\text{Formel 2}) \quad \text{und} \quad \dot{x}_{i,j} = \dot{m}_j \cdot c_{i,j} \quad (\text{Formel 3})$$

Formel 2 stellt den Massenfluss des Sub-Gutes i, welches im Güterfluss j enthalten ist dar und weiters den Gütermassenfluss j und den Massenanteil des Sub-Gutes i am Gut j.

3 Ergebnisse

Die ermittelten Netto-Mengen an Aluminium betrugen 1.300 t/a in der getrennten Sammlung sowie 6.600 t/a im gemischten Siedlungsabfall und 400 t/a im Sperrmüll, welche in die Müllverbrennung eingebracht werden (Abbildung 2). Davon gelangten 490 t/a in die Flugaschen und 6.000 t/a in die Bett- und Rostaschen der MVAs. Weiters konnte eine durchschnittliche Oxidationsrate von 7% für Aluminium bestimmt werden. Dabei ist anzumerken, dass Aluminium in der Rostfeuerung zu einem höheren Anteil (9%) oxidiert wird als in der Wirbelschicht (2%). Im Vergleich in einer Rostfeuerungsanlage wird in einer Wirbelschicht die dreifache Menge an Aluminium in die Flugaschen eingebracht und somit deponiert. Aus den Bett- und Rostaschen werden derzeit 4.000 t/a rückgewonnen. Über die Aschenaufbereitungsrückstände werden weitere 2.000 t/a deponiert, was 24% des gesamten Aluminiumeintrages in das Siedlungsabfallwirtschaftssystem darstellt.

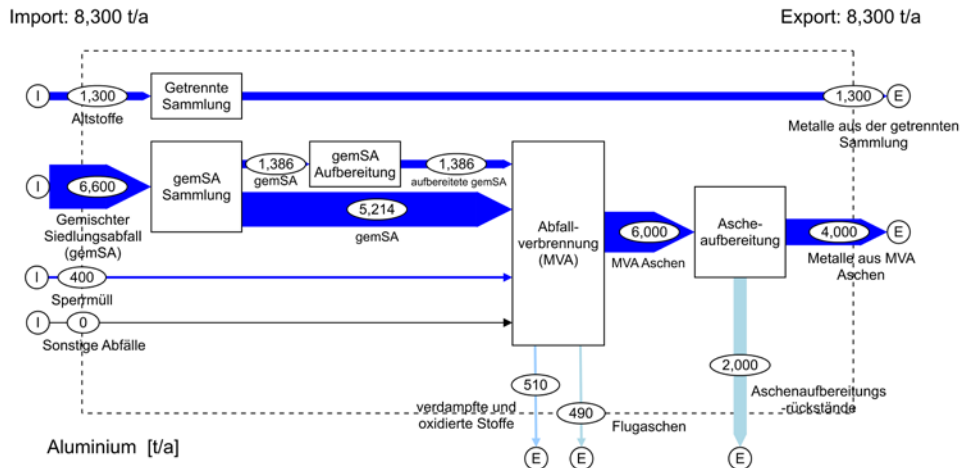


Abbildung 2: Aluminiumflüsse im Siedlungsabfallwirtschaftssystem in t/a (Software STAN 2.7).

Aus den Materialflüssen konnte berechnet werden, dass über die getrennte Sammlung und die Bett- und Rostascheaufbereitung 63% des Aluminiums dem Recycling zugeführt werden. Nachdem es sich hier überwiegend um Aluminiumverpackungen handelt, und die Verluste in der Metallsortierung und dem Recycling gering sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Stadt schon heute seinen Beitrag zu den Recyclingziele der EU, welche eine Recyclingrate von 60% für Aluminium für ihre Mitgliedsstaaten bis 2030 vorsieht, erfüllt. Aus Abbildung 2 geht auch hervor, dass in den Rückständen der Aschenaufbereitung relevante Mengen an Aluminium enthalten sind, die derzeit noch nicht rückgewonnen werden können.

Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Weiters bedanken wir uns sehr herzlich für die finanzielle und inhaltliche Unterstützung durch unsere Unternehmenspartner, in alphabetischer Reihenfolge: Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoff Recycling Austria AG, Brantner Österreich GmbH, Holding Graz – Kommunale Dienstleistungen GmbH, Lenzing Aktiengesellschaft, Linz Service GmbH, MM Board & Paper, Wien Energie GmbH und Wopfner Transportbeton Ges.m.b.H. sowie der Stadt Wien.

Literatur/Quellen

Biganzoli, L., Gorla, L., Nessi, S., & Grosso, M. (2012). Volatilisation and oxidation of aluminium scraps fed into incineration furnaces. *Waste Management*, 32(12), 2266-2272. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.06.003>

- Blasenbauer, D., Huber, F., Mühl, J., Fellner, J., & Lederer, J. (2023). Comparing the quantity and quality of glass, metals, and minerals present in waste incineration bottom ashes from a fluidized bed and a grate incinerator. *Waste Management*, 161, 142-155. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.02.021>
- Brunner, & Rechberger. (2016). *Handbook of Material Flow Analysis: For Environmental, Resource, and Waste Engineers*, Second Edition (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315313450>
- Hu, Y., Bakker, M. C. M., & de Heij, P. G. (2011). Recovery and distribution of incinerated aluminum packaging waste. *Waste Management*, 31(12), 2422-2430. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.021>
- Huber, F., Blasenbauer, D., Aschenbrenner, P., & Fellner, J. (2020). Complete determination of the material composition of municipal solid waste incineration bottom ash. *Waste Management*, 102, 677-685. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.036>
- Lederer, J., & Schuch, D. (2024). The contribution of waste and bottom ash treatment to the circular economy of metal packaging: A case study from Austria. *Resources, Conservation and Recycling*, 203, 107461. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107461>
- Vollmer, A., Habermeyer, M., Redaktion, R., Sitzmann, H., & Schwab, E. (2019). Aluminium RÖMPP. <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-01-01786>
- Warrings, R., & Fellner, J. (2018). Current status of circularity for aluminum from household waste in Austria. *Waste Management*, 76, 217-224. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.034>

Kontakt

DI, Simon Mika, wissenschaftlicher Mitarbeiter

TU Wien, CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft

Tel.-Nr. +43 1 58801 166093

E-Mail: simon.mika@tuwien.ac.at

Homepage: <https://www.tuwien.at/tch/icebe/e166-01/cd-labor-kreislaufwirtschaft>

DACE – Data Competence Center for Circular Economy Data

Abstract: *The circular economy (CE) has emerged as a strategic pillar in many sustainability-oriented policies, prominently featured in the European Green Deal. The transition to a sustainable CE requires a holistic view of product life cycles and material systems, considering environmental, social, and economic aspects. A major obstacle for comprehensive assessments is data availability and uncertainty e. g. due to data privacy issues, incompatibilities, or lack of data collection systems. The project DACE addresses these challenges by creating a network (DACE Hub), developing a certification program to increase data literacy (DACE Academy), and conducting fundamental research to enhance knowledge in this field (DACE Space). The first task of DACE is defining the term "CE data" and developing a typology for its classification. Subsequently, case studies on best practices in CE data collection and processing are conducted. These approaches aim to enable more effective CE assessments and support data-driven strategies. Our poster presents the research structure, results so far, and ambitions of the DACE project with particular emphasis on its central component: the DACE Space.*

1 Introduction

The circular economy (CE) has emerged as a strategic pillar in many sustainability-oriented policies, prominently featured in the European Green Deal (European Parliament, 2022). According to Potting et al. (2017) there exists a great variety in strategies towards a CE which can be ordered by priority depending on their level of circularity. However, the transformation towards a sustainable CE requires to not only enhance circularity but also consider environmental, social and economic aspects (BMUV, 2023). Therefore, CE necessitates a holistic view of product life cycles, material systems and their impacts through a systemic approach, which relies on extensive data across the value chain for effective implementation (Ahmed et al., 2022; Jansen et al., 2023; Luthin et al., 2023).

Two major obstacles for holistic assessments are data availability and uncertainty occurring due to various reasons such as data privacy, incompatibility or even lack of data collection and management systems (Corona et al., 2019; Jansen et al., 2023; Teigiserova et al., 2023). Some players require enhanced data literacy skills, some lack incentives to make use of already existent databases and sets in the context of CE (Pascale et al., 2021). Unfortunately, reporting and monitoring efforts obliged by legislation such as the European Sustainability Reporting Standards (ESRS) are often perceived as financial burdens instead of opportunities to increase their competitiveness by leveraged transparency along value chains enabling more sustainable optimizations (European Commission, 2023).

The project DACE – Data Competence Center for Circular Economy Data – aims to tackle the described challenges from different angles. The project is structured in three pillars: Hub, Space and Academy. The DACE Hub's overarching goal is to create a network of all stakeholders (including researchers, industry and

politics) and enable fruitful discussions and exchanges via an online platform and various events and workshops. The *DACE Academy* is establishing a certification program consisting of multiple courses divided into three fields from “data and AI basics” and “CE-basics” to more “advanced CE data” related courses. The aim is to offer participants the opportunity to enhance or complement their data literacy skills self-paced and individually by not dictating the sets of chosen courses. This way the program offers maximal flexibility, ideally addressing various stakeholders from different fields and with varying background knowledge achieving diverse groups. The *DACE Space* is the heart of the project as it is in charge of conducting basic research to create new knowledge that can be transferred via the DACE Hub and Academy (DACE, 2024). In this way, the main objective of our poster is to present the research structure, partial results, and ambitions of the whole DACE project, emphasizing the central part of the project represented in the DACE Space.

2 Methodology

2.1 Defining and developing a typology for “CE data”

The first assignment of DACE Space is to precisely define the term “CE data”, due to the lack of a widely accepted definition from literature creating ambiguity in understanding and application within and beyond the project DACE (Kirchherr et al., 2017). We aim to address this gap by exploring CE data across various levels, from product-specific to macroeconomic scales, and propose a novel typology. It aims to clarify the data underpinning CE performance metrics, fostering better standardization and communication of CE data. This research is of conceptual nature since it elaborates and proposes new relationships among well-known constructs (Gilson & Goldberg, 2015). The typology is developed following four steps. The first step is bibliographical research and consecutive selection of relevant reference models for performance measurement in CE. As a second step CE indicators are retrieved from these reference models and deconstructed into their components referred to as (CE) data points. The third step of this research focuses on exploring the similarities and differences between CE data points within the sample and on identifying patterns. The goal is to establish a categorization of CE data that forms a coherent and explanatory set of dimensions, characteristic of typological studies (Stapley et al., 2022). The final step of conceptualizing the CE data typology comprises the analysis of the CE data sample within the dimensions. To facilitate this analysis, Excel and Power BI software were used for data analysis and visualization.

2.2 “Best practice” case studies on CE data collection and processing

Apart from the above-mentioned typology of CE data, we aim to conduct case study specific CE assessments at different scales from nano (product) to macro (industry / national / global) level (Kirchherr et al., 2017; Sassanelli et al., 2019) together covering the evaluation of all R-strategies (Potting et al., 2017) to demonstrate a form of “best practice” in the collection, processing and use of CE data, i. e., performance measurement systems that are widely adopted (e. g. by companies), while also covering essential circularity aspects at all levels. The methodology used to implement the case study CE assessments (on nano level) is based on previous literature suggesting a combination of Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) and circularity assessment (International Organization for Standardization [ISO], 2023), also referred to as a circular life cycle sustainability assessment (C-LCSA) framework by Luthin et al. (2023). However, in DACE the focus is on environmental impacts which is why only LCAs are conducted (and not full LCSA).

3 Preliminary results & Outlook

The above described efforts to establish a CE data typology result in the identification and classification of characteristic CE data types, organized according to eight dimensions (with different possible values) such as CE Levels (Kirchherr et al., 2017; Sassanelli et al., 2019), stakeholder groups (Chiappetta Jabbour et al., 2020; Eisenreich et al., 2022), specific value chain stages (European Commission, 2022; Prieto-Sandoval et al., 2018) and CE strategies (Bocken et al., 2016; Potting et al., 2017). The approach provides a clear definition of what constitutes CE data. By offering a typology for classifying and understanding CE data, our first study contributes to more effective circularity performance evaluation and supports the development of data-driven strategies. Within the study of the typology, the data sample was analyzed according to the eight dimensions and their values in order to validate the proposed model and also assess the current state of completeness of the reference models for evaluating circularity. This approach offered insights on potential data hotspots and gaps. For instance, further development of environmental-economic accounting systems is supported, as they are not yet sufficiently prepared to measure particularly the higher R-strategies (according to the CE data sample investigated). This is in line with previous literature on CE indicators, e.g. (Moraga et al., 2019). The data typology sheds light on a largely unexplored aspect of the literature and ultimately contributes to the planning and transition to a Circular Economy. Preliminary results on the first case study on nano level indicate that necessary CE data is to a large extent internally available but rarely retrievable impeding external assessments.

As a next step, it is planned to continue implementing case studies on each CE level and link all conducted case studies (from nano to macro level) by developing a “data space” connected to a semantic layer enabling holistic CE data management as a potential data basis for future CE assessments. Due to the overarching goal to create the interconnected “data space”, all case studies are intentionally related to the plastic sector, to be able to feed the data space with semantically related data sets. This is a very multifaceted task which will be presented as an outlook describing major challenges we face such as data incompatibility and our respective solutions so far.

Acknowledgements

The DACE project is funded by the *German Federal Ministry of Education and Research* as part of the directive on “*Strengthening the data competences of young scientists*”.

References

- Ahmed, A. A., Nazzal, M. A., Darras, B. M., & Deiab, I. M. (2022). A comprehensive multi-level circular economy assessment framework. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 700–717. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.025>
- BMUV. (2023). *Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS): Grundlagen für einen Prozess zur Transformation hin zu einer zirkulären Wirtschaft*. www.bmuv.de
- Bocken, N. M. P., Pauw, I. de, Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>

- Chiappetta Jabbour, C. J., Seuring, S., Lopes de Sousa Jabbour, A. B., Jugend, D., Camargo Fiorini, P. de, Latan, H., & Izeppi, W. C. (2020). Stakeholders, innovative business models for the circular economy and sustainable performance of firms in an emerging economy facing institutional voids. *Journal of Environmental Management*, 264, 110416. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110416>
- Corona, B., Shen, L., Reike, D., Rosales Carreón, J., & Worrell, E. (2019). Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104498. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104498>
- DACE. (2024). Über uns – DACE. <https://dace-info.de/ueber-uns/>
- Eisenreich, A., Füller, J., Stuchtey, M., & Gimenez-Jimenez, D. (2022). Toward a circular value chain: Impact of the circular economy on a company's value chain processes. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134375>
- European Commission (Ed.). *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC*.
- European Commission. (2023, July 31). Q&A adoption of European Sustainability Reporting Standards [Press release]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_23_4043
- European Parliament. (2022). *Green Deal: key to a climate-neutral and sustainable EU*. <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20200618STO81513/gruner-deal-schlüssel-zu-einer-klimaneutralen-und-nachhaltigen-eu#förderung-der-kreislaufwirtschaft-7>
- Gilson, L. L., & Goldberg, C. B. (2015). Editors' Comment: So, What Is a Conceptual Paper? *Group & Organization Management*, 40(2), 127–130. <https://doi.org/10.1177/1059601115576425>
- International Organization for Standardization (ISO) (2023). *Circular economy — Measuring and assessing circularity* (ISO/DIS 59020).
- Jansen, M., Meisen, T., Plociennik, C., Berg, H., Pomp, A., & Windholz, W. (2023). Stop Guessing in the Dark: Identified Requirements for Digital Product Passport Systems. *Systems*, 11(3), 123. <https://doi.org/10.3390/systems11030123>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Luthin, A., Traverso, M., & Crawford, R. H. (2023). Circular life cycle sustainability assessment: An integrated framework. *Journal of Industrial Ecology*, Article jiec.13446. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/jiec.13446>
- Moraga, G., Huysveld, S., Mathieux, F., Blengini, G. A., Alaerts, L., van Acker, K., Meester, S. de, & Dewulf, J. (2019). Circular economy indicators: What do they measure? *Resources, Conservation, and Recycling*, 146, 452–461. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>
- Pascale, A. de, Arbolino, R., Szopik-Depczyńska, K., Limosani, M., & Ioppolo, G. (2021). A systematic review for measuring circular economy: The 61 indicators. *Journal of Cleaner Production*, 281, 124942. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124942>
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). CIRCULAR ECONOMY: MEASURING INNOVATION IN THE PRODUCT CHAIN: Policy Report.
- Prieto-Sandoval, V., Ormazabal, M., Jaca, C., & Viles, E. (2018). Key elements in assessing circular economy implementation in small and medium-sized enterprises. *Business Strategy and the Environment*, 27(8), 1525–1534. <https://doi.org/10.1002/bse.2210>

- Sassanelli, C., Rosa, P., Rocca, R., & Terzi, S. (2019). Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 229, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.019>
- Stapley, E., O'Keeffe, S., & Midgley, N. (2022). Developing Typologies in Qualitative Research: The Use of Ideal-type Analysis. *International Journal of Qualitative Methods*, 21, Article 16094069221100633. <https://doi.org/10.1177/16094069221100633>
- Teigiserova, D. A., Reit, C. A., & Schraven, D. F. (2023). Does PSS help to increase circularity? A framework for the circular design process and case study of five pilots in the Dutch infrastructure sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 199, 107230. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107230>

Contact

M. Sc., Annalisa Nolte, Research assistant
Department of Anthropogenic Material Cycles
Tel.-Nr. +49 241 80-95710
E-Mail: annalisa.nolte@ants.rwth-aachen.de
Homepage: www.ants.rwth-aachen.de

Analyse und Entwicklung eines Indikatoren-Sets für die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie

Abstract: Diese Studie entwickelt ein neues strukturiertes Indikatoren-Set für die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS), um den Erfolg der darin enthaltenen Maßnahmen zu messen, da die bislang in der NKWS enthaltenen Indikatoren nicht für alle Maßnahmen anwendbar sind und ohne eine übergeordnete Struktur aufgelistet werden.

Für die Überarbeitung des NKWS-Indikatoren-Sets wurden zwei Methodiken kombiniert: die Leitlinien für die Erstellung eines Indikatoren-Sets der Ressourcenkommission des UBA und das kausale Netzwerkmodell nach Niemeijer und de Groot. Das neue Indikatoren-Set umfasst Zielindikatoren wie die Circular Material Use Rate und DIERec und ergänzt sie um operative Indikatoren, darunter Rohstoffproduktivität, Rezyklateinsatzquoten und produktdesignspezifische Kennzahlen. Diese Struktur verbindet Ziel- und Maßnahmenebene, adressiert bestehende Lücken und stärkt die Anwendbarkeit in bislang unterrepräsentierten Bereichen wie dem Produktdesign.

1 Einleitung

Die Abkehr von der bisherigen linearen Produktionsweise hin zu einer Circular Economy erhielt in den letzten Jahren zunehmend Aufmerksamkeit. Mit der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz 2024) soll nun eine Strategie zur Transformation zur Circular Economy in Deutschland geliefert werden. Einen essenziellen Bestandteil zum Monitoring der Fortschrittsentwicklung der in der NKWS enthaltenen Maßnahmen stellen dabei Indikatoren dar. Teilweise schon in Anwendung befindlich, wurde zu solchen Indikatoren in den letzten Jahren intensiv geforscht. Mit steigender Anzahl von Indikatoren sank jedoch gleichzeitig die Übersichtlichkeit über diese. Dies ist auch in der NKWS erkennbar, denn die bisherigen Indikatoren werden lediglich voneinander losgelöst erwähnt, jedoch besteht keinerlei Ordnung zwischen diesen. Zusätzlich sind viele Maßnahmen bislang ohne Indikator hinterlegt. Diese Probleme zu adressieren ist das Ziel dieser Arbeit. Dafür soll ein strukturiertes Indikatoren-Set für die NKWS auf Basis der bisherigen Indikatoren und zusätzlicher neuer Indikatoren entwickelt werden.

2 Methodik

Zur besseren Überprüfung des Fortschrittes der in der NKWS enthaltenen Maßnahmen soll wie oben bereits erwähnt ein neues Indikatoren-Set aus den bisherigen Indikatoren der NKWS und neuen Indikatoren erarbeitet werden. Hierzu wurde zunächst eine umfassende Indikatoren-Datenbank entwickelt, um einen

Überblick über den derzeitigen Stand der CE-Indikatoren zu erhalten und somit potenzielle Indikatoren für die NKWS zu sichten. Der Input für diese stammt aus einer Literaturrecherche, welche sich aus drei Säulen zusammensetzt. Zuerst erfolgte eine systematische Literaturrecherche nach Page et al. (2021). Dabei war das Ziel Review Paper über die bisherigen Circular Economy Indikatoren zu finden, um so eine breite Basis für die spätere Indikatoren Datenbank zu erhalten. Ergänzend dazu wurden als zweite Säule bestehende Rahmenwerke, Normen und Gesetze mit dem Fokus auf Deutschland und Europa gesichtet, um einen Überblick über die derzeit in Anwendung befindlichen CE-Indikatoren zu erlangen. Zuletzt wurde auf Basis der Ergebnisse der ersten beiden Schritte eine vorwärts- und rückwärts gerichtete Literaturrecherche durchgeführt, um sicherzustellen, dass auch benachbarte oder interdisziplinäre Perspektiven bei der Zusammenstellung der Indikatoren-Datenbank berücksichtigt werden.

Für die aus der Literaturrecherche erhaltenen Indikatoren wurden folgende Kriterien auf Basis eigener Überlegungen zur Aufnahme in die Indikatoren-Datenbank festgelegt: Der Indikator muss einen Bezug zu den in der NKWS behandelten Themenfelder besitzen, der Indikator muss einen konkreten Bezug zur Circular Economy haben, für den Indikator muss eine konkrete Berechnungsmethode vorliegen und idealerweise eine Case Study und zuletzt muss der Indikator allgemeingültig sein und nicht nur auf spezifische Stoffströme anwendbar sein.

Die dadurch erhaltenen Indikatoren wurden in einer Datenbank zusammengetragen mit weiterführenden Informationen zu diesen, wie die Definition, die Berechnungsmethodik, das Vorkommen in gesetzlichen Anwendungen, Chancen und Limitationen des Indikators sowie die notwendige Datenbasis.

Weiterhin erfolgte eine Zuteilung der einzelnen Indikatoren zu den Kategorien zugehörige R-Strategie, Einheit des Outputs, Anwendungsebene und Normierungsgrad. Dadurch soll einerseits für die spätere Analyse der NKWS eine zielgerichtete Suche nach potenziellen Indikatoren für den jeweiligen Anwendungsfall ermöglicht werden. Andererseits wird dadurch eine Übersicht über den derzeitigen Entwicklungsstand der Circular Economy Indikatoren gegeben.

Zur Analyse der bisherigen Indikatorik der NKWS wurde zunächst ein Überblick über den derzeitigen Status Quo erarbeitet. Hierzu wurde untersucht, wie viele Maßnahmen und Ziele in der NKWS enthalten sind und welche dieser Maßnahmen durch einen CE-Indikator messbar und bereits mit einem Indikator hinterlegt sind.

Nachdem der Status Quo dargestellt wurde, erfolgt die Analyse der NKWS auf Basis von zwei zusammengeführten Methodiken: Die bisherigen Indikatoren der NKWS wurden hinsichtlich ihrer Struktur auf Basis von der Ressourcenkommission des UBA vorgeschlagenen Methodik untersucht (Schebek et al. 2024). Zusätzliche Indikatoren für das Indikatoren-Set wurden mittels der Methodik von Niemeijer und de Groot (2008) ausgewählt.

In der Methodik der Ressourcenkommission werden sieben Leitlinien vorgestellt, welche bei der Erstellung eines Indikatoren-Sets berücksichtigt werden sollten:

1. Unterscheidung zwischen Indikatoren auf der Zielebene und Indikatoren auf der operativen/Maßnahmenebene
2. Auswahl von Indikatoren auf der Zielebene
3. Indikator und Zielwert
4. Kategorisierung von Maßnahmen der CE
5. Konkretisierung eines Indikatorensystems für die CE
6. Umgang mit Zielkonflikten bei der Bewertung von CE-Maßnahmen
7. Datengrundlagen

Bei der Erstellung eines Indikatoren-Sets stellt die Auswahl neuer Indikatoren einen integralen Bestandteil dar. Um diesen Prozess einheitlich und nachvollziehbar zu gestalten wurde die Methodik von Niemeijer und De Groot (2008) angewandt. Bei dieser wird ein kausales Netzwerk für ein zu untersuchendes Themenfeld erstellt auf Basis des "Driving Forces – Pressure – State – Impact – Response" (DPSIR)-Modelles. In diesem kausalen Netzwerk werden die Beziehungen und Einflüsse zwischen potenziellen Indikatoren dargestellt. Diese Visualisierung unterstützt beim Auswahlprozess, indem die einflussreichsten Indikatoren ersichtlich werden.

Nach der Auswahl der neuen Indikatoren für die NKWS werden diese mit den bestehenden Indikatoren in einem strukturierten Indikatoren-Set zusammengeführt.

3 Vorläufige Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern einen neuen Vorschlag für ein strukturiertes Indikatoren-Set für die NKWS. Dieses Indikatoren-Set ist anstatt von derzeit 28 Maßnahmen der NKWS auf 85 Maßnahmen anwendbar. Durch die Erstellung der Indikatoren-Datenbank konnte ein Einblick in die bisherige Entwicklung von CE-Indikatoren gewonnen werden, dies wird im Folgenden dargestellt:

Insgesamt umfasst die Indikatoren-Datenbank 78 CE-Indikatoren. Dabei lässt sich bei diesen ein starker Schwerpunkt auf der R-Strategie Recycling feststellen: 40 der 78 Indikatoren lassen sich dieser zuordnen. Mit 22 zugeordneten Indikatoren ist die R-Strategie Reduce die am zweithäufigsten vertretene. Eine weitere Auffälligkeit ist die Anzahl der nicht normierten Indikatoren, nämlich 44 von 78 Indikatoren. Dadurch gibt es noch einen breiten Spielraum für die gesetzliche Anwendung von Indikatoren in bislang unterrepräsentierten Bereichen, wie z.B. dem Produktdesign. Weiterhin wurden die Indikatoren hinsichtlich ihrer Anwendungsebene (Mikro- oder Makro) zugeordnet, dabei wird sich der Definition von Kirchherr et al. (2017) bedient. Hierbei zeigte sich das Bild, dass die Mehrheit der aufgelisteten Indikatoren nur auf der Mikro-Ebene anwendbar sind (47 Indikatoren) und somit eine gute Eignung für potenzielle operative Indikatoren aufweisen. 28 Indikatoren sind für eine Anwendung auf der Makro-Ebene geeignet und 8 Indikatoren bespielen beide Ebenen.

Auf der anderen Seite sieht der Status Quo der NKWS wie folgt aus: In dem Entwurf der NKWS werden 153 Maßnahmen und Ziele aufgelistet, davon sind 89 mit einem quantitativen Indikator messbar, von diesen 103 wiederum sind bislang lediglich 28 Maßnahmen mit einem Indikator hinterlegt. Insgesamt werden in dem Entwurf der NKWS 15 Indikatoren als Messgrundlage vorgeschlagen. Diese 15 Indikatoren sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Die dick geschriebenen Indikatoren stellen dabei die bisherigen Zielindikatoren der NKWS dar.

Bei der Gestaltung des neuen Indikatoren-Sets erfolgte zunächst eine Abänderung der Zielindikatoren: Anstatt den in Abbildung 1 gelisteten vier Zielindikatoren gibt es im neuen Indikatoren-Set nur noch drei, für jedes Leitziel der Circular Economy einen. Dabei werden die Circular Material Use Rate (CMU) und der DIERec (Dietrich 2021) als Zielindikatoren beibehalten. Als dritter Zielindikator wird die globale Umweltinanspruchnahme durch Konsum privater Haushalte gewählt, dieser Indikator wird bereits in der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (*Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Weiterentwicklung 2021*) verwendet. Die Raw Material Consumption (RMC) wird als zentraler Bestandteil der operativen Indikatoren gesehen, da diese nicht nur wichtige Erkenntnisse über den Fortschritt der Circular Economy liefert, sondern auch einen wichtigen Dateninput für weitere Indikatoren darstellt. Die zentralen operativen Indikatoren stellen neben der RMC, die Gesamtrohstoffproduktivität, Rezyklateinsatzquoten, das Siedlungsabfallaufkommen pro Kopf und der Raw Material Input (RMI) dar. Die ökonomischen CE-Indikatoren, welche auch in der NKWS vorgeschlagen wurden, werden mit den durch die Methodik von Niemeijer und de Groot (2008) ausgewählten

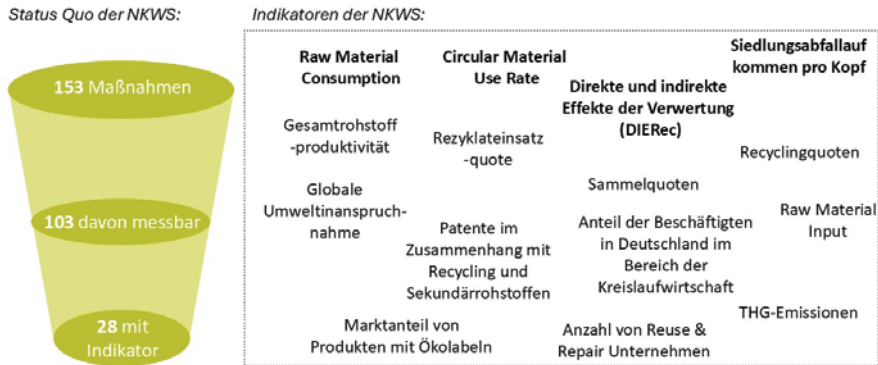


Abbildung 1: Visualisierung des Status Quo der NKWS (links) und der in der NKWS vorgeschlagenen Indikatoren (rechts)

Produktdesign Indikatoren als ergänzendes Rahmenwerk zu den zentralen operativen Indikatoren angesehen. Diese bieten auch alleinstehend Aussagekraft über den Stand der Circular Economy, jedoch liefern diese Daten für die zentralen operativen Indikatoren und geben weiterhin eine zweite Verifikationsbasis.

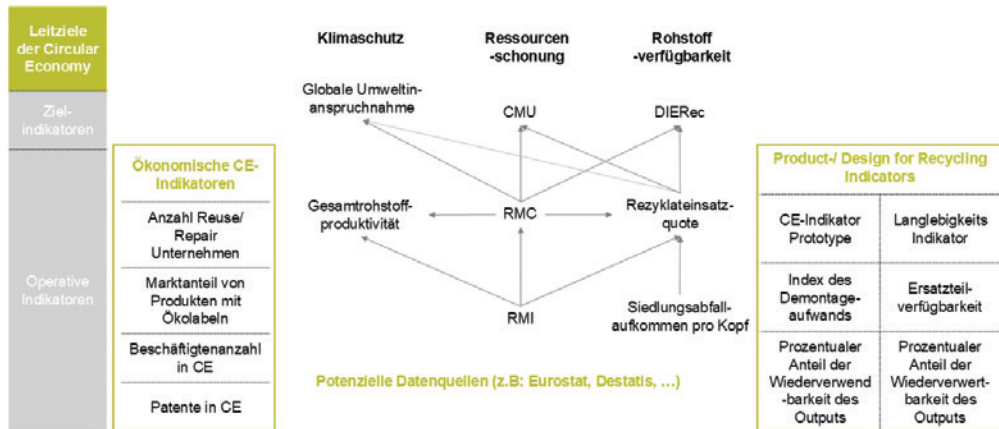


Abbildung 2: Vorschlag für ein neues Indikatoren-Set für die NKWS

Die Ergebnisse sind zunächst vorläufig und sollen noch um weitere CE-Indikatoren für Spezialbereiche ergänzt werden, z.B. sollen für den Baubereich auf Basis der von Segara et al. (2024) erstellten Übersicht spezifische CE-Indikatoren ausgewählt werden.

Literatur/Quellen

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. 2024. *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS)*.
- Deutsche Bundesregierung. 2021. *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Weiterentwicklung*.
- Dietrich, M.; Limberger, S.; Jedelhauser, M.; Roth, S. (2021): Sekundärrohstoffe in Deutschland, p. 3.
- Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. (2017): 'Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions', *Resources, Conservation and Recycling*, 127, pp. 221–232.
- Niemeijer, D; De Groot, R.S. (2008): 'A conceptual framework for selecting environmental indicator sets', *Ecological Indicators*, 8(1), pp. 14–25.
- Page, M.J.; McKenzie, J.; Bossuyt, P.M.; Boutron, I.; Hoffmann, T.; Mulrow, C.; Shamseer, L.; Tetzlaff, J.; Akl, E.A.; Brennan, S.E.; Chou, R.; Glanville, J.; Grimshaw, J.; Hróbjartsson, A.; Lalu, M.M.; Li, T.; Loder, E.; Mayo-Wilson, E.; McDonald, S.; McGuinness, L.A.; Stewart, L.A.; Thomas, J.; Tricco, A.C.; Welch, V.A.; Whiting, P.; Mother, D. (2021): 'The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews', *Systematic Reviews*, 10(1), p. 89.
- Schebek, L; Dosch, K.; Faulstich, M.; Hagelüken, C.; Jaeger-Erben, M.; Nuss, P.; Schmidt, M. (2024): 'Indikatoren im Themenfeld Ressourcenschonung und Circular Economy', p. 36
- Segara, S.; Li, Q.; Gallotta, A.; Wang, Y.; Gosling, J.; Rezgui, Y. (2024): 'Taxonomy of circularity indicators for the built environment: Integrating circularity through the Royal Institute of British architects (RIBA) plan of work', *Journal of Cleaner Production*, 446, p. 141429.

Kontakt

Daniel Ohl, Promotionsstipendiat & Referent

Institut: INZIN e.V.

Tel.-Nr.: 016099106187

E-Mail: daniel.ohl@inzin.de

Unverkaufte Textilien in der EU – Ein Ansatz zur Quantifizierung der Materialflüsse und Routen aus Rücksendungen

Abstract: Die europäische Textilindustrie steht vor erheblichen Herausforderungen durch Überproduktion und steigende Rücksendequoten, insbesondere im E-Commerce. Im Jahr 2020 wurden in der EU-27 rund 3,9 Millionen Tonnen Kleidung und Schuhe (im Weiteren auch Textilien genannt) auf den Markt gebracht, wovon etwa 822.000 Tonnen unverkauft blieben. Rücksendungen im E-Commerce erreichten mit durchschnittlich 20 % signifikant höhere Quoten als im stationären Handel (10 %). Die Rücksendequoten variieren stark zwischen den Produktkategorien, wobei Casual-Kleider (39,3 %) und Winterstiefel (28,5 %) die höchsten Rücksendequoten aufweisen. Neben den logistischen Herausforderungen und Kosten der Rücksendungen werden über 51 % der unverkauften Textilien zerstört, was die Notwendigkeit nachhaltigerer Prozessketten verdeutlicht. Deshalb werden im Folgenden die Materialflüsse unverkaufter Textilien, die Rücksendequoten nach Kategorien und einige wichtige Aspekte, die zur aktuellen Situation und den dargestellten Flüssen unverkaufter, zerstörter Textilien führen, aufgezeigt.

1 Einleitung

Es gibt wohl nur wenige weniger nachhaltige Praktiken, als Produkte herzustellen, die ohne eine Nutzungsphase zerstört werden. Genau dieses Phänomen ist jedoch mittlerweile weit verbreitet und existiert nicht nur in Bezug auf Textilprodukte, sondern auch in Bezug auf Elektro- und Elektronikprodukte, Kosmetik und weitere Produktkategorien. Zahlreiche Aspekte wie Veränderungen im Konsumverhalten, der Aufstieg von E-Commerce und eine anhaltend hohe Produktion von Textilien¹ mit deutlich gesunkenen Preisen pro Kleidungsstück, sind nur einige Elemente des komplexen Problems unverkaufter Produkte und ihrer Zerstörung. Um sich diesem Problem und den möglichen Lösungen anzunähern, werden in diesem Artikel die Materialflüsse nach der Produktion und dem Import quantifiziert, wodurch die Größenordnungen der einzelnen Prozessstufen und ihrer Materialflüsse besser verständlich werden. Da Textilprodukte sich stark in Bezug auf Wertigkeit, Masse, Potenzial für den Wiederverkauf, Handhabung und weitere in Bezug auf Rücksendungen relevante Parameter unterscheiden können, können die Massenflüsse der Rücksendungen und ihrer Routen sehr unterschiedlich sein. Diese Unterschiede werden im Folgenden u. a. anhand von Primärdaten, die durch Web-Scraping einer E-Commerce-Plattform in Bezug auf Rücksendungen gewonnen wurden, dargestellt. Außerdem beleuchtet die vorliegende Untersuchung die Faktoren, die zu Rücksen-

¹ Textilien werden im Folgenden als Synonym zu Kleidung und Schuhen verwendet.

dungen und Lagerbeständen führen, und ermöglicht über einen Gesamtüberblick des Systems Ansätze zur Minimierung des Problems abzuleiten.

2 Methodik

2.1 Methoden zur Quantifizierung von unverkauften Textilien und ihrer Routen

Die Analyse relevanter Studien und Berichte zu unverkauften Textilprodukten erfolgt durch eine systematische Literaturrecherche. Dabei liegt ein Fokus auf harmonisierten Methoden zur Erhebung und Darstellung von Daten. Die Untersuchung kombiniert Primärdaten, die mithilfe von Web-Scraping auf E-Commerce-Plattformen wie Galaxus gewonnen wurden, mit Sekundärquellen wie Berichten der Europäischen Umweltagentur (EEA, 2024) und Duhoux et al. (2024). Ein wesentlicher Bestandteil der Methodik umfasst semi-strukturierte Interviews mit Akteuren entlang der Prozesskette, die unverkaufte Produkte aufnehmen, verarbeiten, verkaufen etc. können. Um die Konsistenz und Aussagekraft der Ergebnisse zu gewährleisten, erfolgt eine Systematisierung der Daten über eine Materialflussanalyse.

2.2 Quantifizierung von unverkauften Textilien

Die Analyse der Materialflüsse von Kleidung und Schuhen in der EU-27 für das Jahr 2020 zeigt, dass von 5,79 Millionen Tonnen importierter oder produzierter Textilien, 3,89 Millionen Tonnen final auf dem europäischen Markt verbleiben, nachdem 1,9 Millionen Tonnen wieder exportiert werden (EEA, 2022; Duhoux et al., 2024). Von den verbleibenden Textilprodukten werden 3,47 Millionen Tonnen über den stationären Handel verkauft, während 429.000 Tonnen über E-Commerce-Plattformen abgesetzt wurden. Der Anteil der Rücksendungen betrug dabei insgesamt ca. 433.000 Tonnen, wobei 85.000 Tonnen aus dem E-Commerce und 347.000 Tonnen aus stationären Geschäften resultierten. Die verbleibenden Lagerbestände von unverkauften Produkten beliefen sich auf 822.000 Tonnen.

Von den 822.000 Tonnen unverkaufter Produkte waren 775.100 Tonnen funktionstüchtig und 49.000 Tonnen waren beschädigt (Duhoux et al., 2024). Funktionstüchtige Textilien wurden zu 106.000 Tonnen über Rabatte und eigene (interne) Outlets, zu 279.000 Tonnen über Zwischenhändler und zu 225.000 Tonnen über (externe) Outlets anderer Akteure weiterverkauft. Ca. 155.000 Tonnen wurden an soziale Organisationen gespendet. Aus jeder dieser Routen resultieren Anteile, die nicht verkauft und zerstört werden. Insgesamt wurden ca. 421.100 Tonnen zerstört, wovon 237.000 Tonnen dem Recycling, 149.000 Tonnen der Verbrennung und 35.000 Tonnen Deponien zugeführt wurden.

Die Rücksendequoten lagen im E-Commerce bei durchschnittlich 20 %, wobei diese im stationären Handel deutlich geringer sind und ca. 10 % betragen (Duhoux et al., 2024). Im Ländervergleich kann die Rücksendequote jedoch stark schwanken. So erreicht diese in Deutschland im E-Commerce ca. 30 %, während sie in Italien bei ca. 15 % liegt (Asdecker et al., 2022). Produkte, die nicht verkauft werden, wurden zu 51 % zerstört. Da die Datenlage sehr unzufriedenstellend ist, sind neben den absoluten Werten auch die relativen Anteile sowie die Schwankungsbereiche aus den verfügbaren Quellen in Abbildung 1 dargestellt.

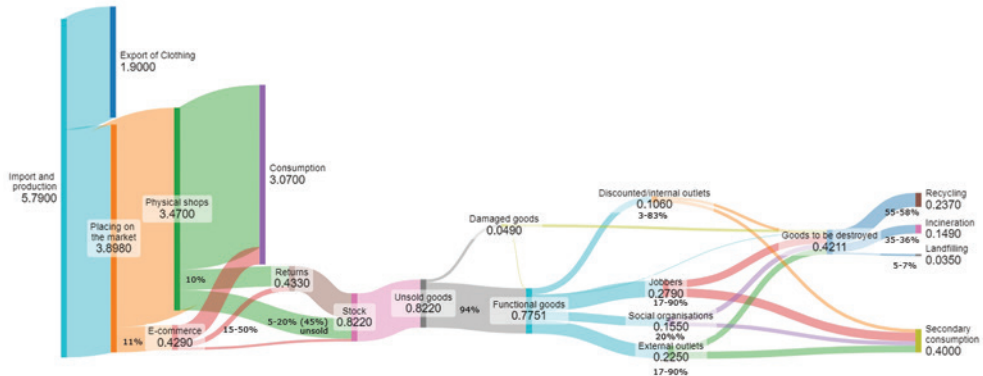


Abbildung 1: Materialflüsse von unverkaufter Kleidung und Schuhen im Basisjahr 2020, basierend auf einer breiten Palette geprüfter Quellen und eigenen Berechnungen, Werte für die EU-27 in Millionen Tonnen (eigene Berechnung)

2.3 Rücksendungen – nach Produktkategorie

Die Rücksendequoten im E-Commerce-Bereich zeigen erhebliche Unterschiede zwischen verschiedenen Produktkategorien, die sowohl durch Produktmerkmale als auch durch Preisklassen beeinflusst werden. Die in etwa doppelt so hohe Rücksendequote für online gekaufte Kleidung kann u. a. auf die einfache Rückgabe von Artikeln und großzügigen Rückgabebedingungen im E-Commerce zurückgeführt werden.

Für Kleidung zeigen Daten der Galaxus-Plattform, dass die Rücksendequoten stark zwischen den einzelnen Produktkategorien variieren. Casual-Kleider verzeichnen mit 39,3 % die höchsten Rücksendequoten, gefolgt von Jacken mit 26,6 % und Jeans mit 25,1 %. Diese Produkte weisen häufig hohe Preise auf, was darauf hindeutet, dass Verbraucher bei höherpreisigen Artikeln besonders auf Passform und Qualität achten und bei Abweichungen diese eher zurücksenden. In niedrigeren Preisklassen, wie bei T-Shirts (6,7 %) und Unterwäsche (1,9 %), sind die Rücksendequoten deutlich geringer.

Ähnliche Trends zeigen sich im Bereich der Schuhe, wo Winterstiefel (28,5 %) und Stiefel (25,1 %) die höchsten Rücksendequoten aufweisen, während Sandalen und Sneakers geringere Quoten von 23,2 % bzw. 17,5 % haben. Diese Quoten spiegeln auch die Bedeutung des Preissegments wider.

Ein wichtiger Grund für die Zerstörung von Rücksendungen spielen die nicht unerheblichen wirtschaftlichen Kosten, die Rücksendungen verursachen können. Die Bearbeitungskosten für eine Rücksendung liegen zwischen 10 und 20 Euro pro Artikel, unabhängig davon, ob der Artikel erneut verkauft werden kann oder zerstört werden muss (Roland Berger, 2023; Duhoux et al., 2024). Diese Kosten umfassen Logistik, Prüfung, gegebenenfalls Neubepreisung oder Wiederverpackung der Artikel. Besteht der Verdacht auf Kontamination oder weist das Produkt Schäden auf, steigen die Kosten nochmals deutlich an, sodass es wirtschaftlich nicht sinnvoll ist diesen zu reparieren oder zu reinigen. Über eine einfache Schätzung von Duhoux et al., (2024) erreichen Produkte mit einem Verkaufspreis von 34 Euro oder weniger einen negativen wirtschaftlichen Ertrag.

Das Geschäftsmodell des E-Commerce, das auf kostenlose Rücksendungen setzt, trägt maßgeblich zur Höhe der Rücksendequoten bei. Große Plattformen wie z.B. Zalando haben diesen Trend etabliert oder zumindest verstärkt, um Marktanteile zu gewinnen (ECOS, 2023). Dies zwingt kleinere Anbieter, ähnliche Rückgabegerichtlinien anzubieten, was die Problematik zusätzlich verschärft. Im Gegensatz dazu haben phy-

sische Geschäfte niedrigere Rücksendequoten, da Verbraucher die Produkte vor dem Kauf anprobieren und begutachten können. Zurückgegebene Artikel werden hier eher direkt wiederverkauft, wodurch zusätzliche Bearbeitungskosten minimiert werden.

Die Rücksendequoten nach Kategorien verdeutlichen, dass viele Aspekte darüber entscheiden, ob Produkte zurückgesendet werden. Kundenfreundliche Rückgabebedingungen, v. A. im E-Commerce-Sektor, erlauben das einfache, fast anonyme Zurücksenden, ohne große Wege und Transaktionskosten für die Rücksender zu generieren. Im aktuellen Wirtschaftsmodell, in dem Rohstoffe, Umweltkosten und Arbeitskraft deutlich weniger kosten als im Land, wo vorwiegend der Konsum stattfindet, scheinen die wirtschaftlichen Verluste für Händler (durch die Zerstörung weiter hinten in der Prozesskette) unverkaufter Produkte geringer zu sein als der Verlust von Umsätzen durch striktere Rücknahmebedingungen. Außerdem zeigt die Prozesskette, dass Händler schon im heutigen System wenige Textilprodukte selbst zerstören, diese jedoch auf Umwegen über weitere Akteure einer Zerstörung zugeführt werden, wodurch die Situation vermutlich weiterhin problematisch bleiben könnte.

Danksagung

Die Studie zur Zerstörung unverkaufter Produkte (Study on the Destruction of Unsold Products, EC-JRC/SVQ/2024/MVP/0220) wurde vom Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission in Auftrag gegeben, wofür wir uns herzlich bedanken.

Literatur/Quellen

- Asdecker, B.; Adlhoch, J.; Mader, M.; Kleiner, P. (2022): European Return-o-Meter - Results Part 1: Germany vs. Remaining EU. Online: <http://www.retourenforschung.de/forschungsprojekt-eurom-2122.html>.
- Beretta, E.; Neuberger, D.; Senner, R. (2023): Do product returns in the retail sector affect the price level? Evidence from the equation of exchange. *Eurasian Economic Review* 13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40822-023-00239-7>.
- Dahlbom, M.; Gyllenhammar, H.; Jacobsson, S.; Hedberg, S.; Wenström, A. (2023): Sustainable clothing futures: Mapping of textile actors in sorting and recycling of textiles in Europe. IVL Swedish Environmental Research Institute. Online: <https://www.ivl.se/english/ivl/publications/publications/sustainable-clothing-futures---mapping-of-textile-actors-in-sorting-and-recycling-of-textiles-in-europe.html>.
- Duhoux, T.; Bekkevold Lingas, D.; Fogh Mortensen, L. (2024): Volumes and destruction of returned and unsold textiles in Europe's circular economy. ETC/CE Report 4/2024. Online: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-ce/products/etc-ce-report-2024-4-volumes-and-destruction-of-returned-and-unsold-textiles-in-europes-circular-economy>.
- ECOS (2023): Erhebung zu unverkauften Waren im Textil- und Bekleidssektor in der Schweiz und Maßnahmen zur Reduktion der Umweltbelastung. Bundesamt für Umwelt BAFU. Online: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wirtschaft-konsum/externe-studien-berichte/unverkaufte-waren-im-textil-und-bekleidungssektor_2022.pdf.
- EEA (2022): Textiles and the environment: The role of design in Europe's circular economy. European Environment Agency. Online: <https://www.eea.europa.eu/publications/textiles-and-the-environment-the>.
- EURATEX (2022): Facts and Figures 2022. European Apparel and Textile Confederation. Online: https://euratex.eu/wp-content/uploads/EURATEX_FactsKey_Figures_2022rev-1.pdf.

- EURATEX (2024): Facts and Figures 2024. European Apparel and Textile Confederation. Online: <https://euratex.eu/wp-content/uploads/EURATEX-Facts-Key-Figures-2024.pdf>.
- Makov, T.; Roichman, R.; Sprecher, B.; Blass, V.; Meshulam, T. (2023): The Hidden Environmental Costs of Consumer Product Returns. Online: 10.21203/rs.3.rs-3355404/v1.
- Roland Berger (2023): Fashion's product returns. The British Fashion Council's Institute of Positive Fashion. Online: <https://instituteofpositivefashion.com/uploads/files/1/Report---Solving-fashion's-product-returns-March-2023.pdf>.

Kontakt

Dr. Alexej Parchomenko, Senior Consultant
Ramboll Deutschland GmbH
Tel.-Nr. +49 152 254 729 12
E-Mail: alexej.parchomenko@ramboll.com
Homepage: <https://www.ramboll.com/de-de>

Potenzialstudie zum End-of-Life von E-Bike-Akkumulatoren

Abstract: Im Hinblick auf die anstehenden gesetzlichen Veränderungen mit Verabschiedung der EU-Batterieverordnung besteht ein erheblicher Optimierungsbedarf des Sammelsystems von E-Bike-Akkumulatoren, um bis 31. Dezember 2028 die laut Artikel 60 EUBattV geltende Sammelquote von 51 % für LV-Batterien zu erfüllen. Bisher besteht weitgehend Unwissen über den Endverbleib der Akkus. Verschiedene Projekte in Kooperation mit der Stiftung GRS Batterien haben das Ziel, den Kenntnisstand zu erweitern. Im Rahmen von Sortierungen bei Batterierecyclern und Wertstoff- beziehungsweise Recyclinghöfen werden alte E-Bike-Akkus auf verschiedene Parameter untersucht. Die Auswertung der erhobenen Daten schafft ein klareres Bild zur realen Nutzung der Akkus, zum Beispiel bezogen auf die Lebensdauer. Um die aktuell niedrige Sammelquote von ca. 3% besser nachvollziehen zu können, werden an E-Bike-Nutzer, Händler und Akku-Refurbisher gerichtete Umfragen durchgeführt. Diese dienen zur Datenerhebung und beinhalten auch Fragen zum Kenntnisstand und Nutzungsverhalten. Die erzielten Ergebnisse aus Sortierungen und Umfragen bilden eine Grundlage für die Erarbeitung von Handlungsoptionen zur Weiterentwicklung und Optimierung des Branchensystems.

1 Einleitung

Die Verwertung von Batterien gewinnt immer mehr an Bedeutung, was sowohl auf rechtliche Vorschriften als auch auf die Mobilitätswende zurückzuführen ist. Dabei ist der Absatzmarkt für E-Bikes im Gegensatz bspw. zur aktuellen Absatzkrise bei Elektroautos (vgl. ADAC, 2025) weiterhin auf hohem Niveau. 2023 wurden in etwa so viele E-Bikes verkauft wie im durch die Corona-Pandemie beeinflussten Boom-Jahr 2020. Somit erreichte der Bestand an E-Bikes in Deutschland im Jahr 2023 mit ca. 11 Millionen Stück einen neuen Höchststand (ZIV, 2024). Als häufigste Gründe für den Kauf von E-Bikes geben Kunden dabei Zeitersparnis im Vergleich zur Nutzung konventioneller Fahrräder, Ersatz von Auto oder ÖPNV für den Arbeitsweg, Umweltgedanken oder auch einfach den Wunsch, etwas Neues auszuprobieren, an (Straßburger, C. & Jüster, M., 2022). Gleichzeitig erfordern neue gesetzliche Regelungen wie die EU-Batterieverordnung strengere Standards für die Entsorgung von Batterien und Rückgewinnungsraten, um Umweltauswirkungen zu minimieren. Ein wesentlicher Punkt für eine nachhaltige Batteriebranche ist die Gewährleistung einer flächendeckenden, umfassenden Rücknahme von End-of-Life-Batterien. Aktuell besteht in Deutschland eine erhebliche Diskrepanz zwischen in Verkehr gebrachten und gesammelten E-Bike-Akkumulatoren. Erst mit der EUBattV wurde die neue Kategorie der LMT-Batterien (Batterien für leichte Verkehrsmittel) definiert (Artikel 3 EUBattV, 2023). Zuvor war unklar, ob alte E-Bike-Batterien über die Stoffströme der Gerätebatterien oder die der Industriebatterien zu erfassen sind (Giern & Weishaupt, 2022), was die Implementierung eines effizienten Sammelsystems erheblich erschwerte. Zudem besteht Unkenntnis darüber, nach welcher Lebensdauer und in welchem Zustand die Batterien nach ihrer Nutzungsphase zurückgegeben werden.

Das Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft (IAK) kooperiert mit der Stiftung GRS Batterien im Rahmen von Projekten mit dem Ziel, den Kenntnisstand zum End-of-Life von E-Bike-Akkumulatoren zu verbessern. „GRS eMobility“ hat sich hierzulande mit über 2700 Sammelstellen und mehr als 160 an das System angeschlossenen Herstellern bzw. Importeuren als Branchenlösung für die Rücknahme von alten E-Bike-Akkus etabliert. Im Rahmen von Stichproben bei verschiedenen Recyclingunternehmen und Wertstoffhöfen in ganz Deutschland wurden von August 2023 bis Februar 2024 zurückgegebene E-Bike-Batterien sortiert. Die dabei getätigten Beobachtungen sowie erfassten Daten ermöglichen ein umfassenderes Bild zum End-of-Life der E-Bike-Batterien. In einem aktuellen Projekt werden auf den Erkenntnissen aufbauend mit Unterstützung der Stiftung GRS Batterien erstmals spezifische Umfragen durchgeführt, in der Händler, Reparatoren und Refurbisher sowie E-Bike-Nutzer in Deutschland zu ihrem Wissen und Umgang mit den alten Batterien befragt werden. Dies soll dazu beitragen, das Zustandekommen der aktuell niedrigen Sammelquoten besser zu verstehen und stichhaltig begründen zu können.

2 Methodik

2.1 Stichprobennahmen innerhalb des Sammelsystems „GRS eMobility“

Die Sortierkampagne umfasste Stichprobenahmen bei drei an das Sammelssystem angeschlossenen Recyclingunternehmen sowie kleinere Sortiertermine bei Recycling- und Wertstoffhöfen. Letztere sollen mit dem Inkrafttreten des neuen Batterierecht-Durchführungsgesetzes im August 2025, welches hierzulande das Batteriegesetz ablösen wird und die EUBattV in nationales Recht überführt, verpflichtend als Rücknahmestellen fungieren (BMUV, 2024). Insgesamt wurden bei den Sortierterminen 143 Sammelfässer mit 1055 zurückgegebenen E-Bike-Batterien erfasst. Dies entsprach etwa 3 % der im Jahr 2023 im Branchensystem „GRS eMobility“ erfassten Jahresmenge. Gemessen an den Vorgaben „LAGA PN 98“ bezüglich der Mindestanzahl der zu beprobenden Fässer bei Probenahmen aus verpackten Materialien (hier die Batterie-Sammelfässer) ist die Stichprobe repräsentativ (LAGA, 2019). Dabei wurden zahlreiche Informationen zu den Fässern (u.a. Herkunft, Fehlwürfe) und den Batterien selbst (z. B. Alter, Hersteller, SOH, SOC, Zustand) erfasst.

Gemessen nach der in der neuen EU-Batterieverordnung definierten Berechnungsgrundlage (berücksichtigt den Absatz der letzten 3 Jahre) beträgt die Sammelquote des Jahres 2023 lediglich 1,8 % und ist damit sehr weit von der bis 31.12.2028 geltenden Pflichtquote von 51 % für LV-Batterien entfernt (Artikel 60 EU-BattV, 2023). Bei den Stichproben wurde die fehlende Sorgfalt vieler Sammelstellen als ein Problem erkannt (u.a. Fehlwürfe, ordnungsgemäße Verpackung). Falsch sortierte E-Bike-Batterien gelangen nicht in das System „GRS eMobility“ und werden daher nicht bei der Berechnung der Sammelquote berücksichtigt. Die Datenauswertung zeigte zudem, dass zahlreiche Akkus erst viel später zurückgegeben werden als angenommen: Etwa 70 % waren älter als drei Jahre. Diese Diskrepanz zur aktuellen Berechnungsgrundlage muss bei der Beurteilung der Sammelquote Beachtung finden. Hersteller geben die durchschnittliche Lebensdauer von E-Bike-Akkus in der Regel mit drei bis fünf Jahren beziehungsweise 500 bis 1.000 Ladezyklen an (vgl. Diamant, 2022; AvD, 2023). Bei guter Pflege und fachgerechter Lagerung kann die Lebensdauer erheblich verlängert werden (Bosch eBike systems, 2025). Die These ist, dass Akkus oft länger in Benutzung sind, als allgemein angenommen wird. Dabei finden Aspekte wie ein mögliches Horten als „Ersatzakku“ oder die Nutzung von Reparatur- bzw. Refurbishment-Angeboten noch nicht einmal Berücksichtigung. Dennoch ist offensichtlich, dass der Großteil der in Verkehr gebrachten E-Bike-Akkumulatoren auch nach verlängerter Nutzungsdauer nicht den geordneten Weg ins Sammelssystem findet. Eine mögliche Ursache hierfür ist die unsachgemäße Entsorgung der Altbatterien.

2.2 Umfrage

Mit dem Ziel der Beantwortung nach der Sortierkampagne offen gebliebener Fragen sowie zur Belegung getroffener Vermutungen (bspw. bezüglich der allgemein vermuteten verlängerten Akku-Nutzungszeit) läuft noch bis Juli 2025 ein Folgeprojekt. In diesem sollen beteiligte Akteure des End-of-Life von E-Bike-Batterien über Umfragen erreicht werden. Dabei wird die Rolle von Refurbishern und Reparateuren erstmals genauer untersucht. Deren Angebote verlängern im Sinne der Nachhaltigkeit die Nutzungsdauer, was allerdings Einfluss auf die Sammelquote nimmt. Neben der schlichten Verzögerung der Rückgabe ins Recyclingsystem sorgen Reparaturen, die bspw. Zelltausch inkludieren, dafür, dass die Akkus nicht mehr im Branchenlösungssystem „GRS eMobility“ erfasst werden. Denn hier darf nur die Annahme unbeschädigter, transportunkritischer Alttakkus erfolgen (GRS Batterien Service GmbH, o.D.).

Um unter anderem die These zu untersuchen, dass viele Nutzer nicht ausreichend über die Entsorgungsmöglichkeiten ihrer Altbatterien Bescheid wissen, richtet sich eine weitere Umfrage direkt an Inverkehrbringer. Diese werden neben Stoffmengen auch dazu befragt, inwiefern Kunden beim Kauf, online oder im Geschäft, auf Rückgabemöglichkeiten aufmerksam gemacht werden.

In der dritten Umfrage, die sich direkt an E-Bike-Nutzer richtet, werden diese wiederum bspw. gefragt, ob sie sich ausreichend über Rückgabemöglichkeiten informiert fühlen. Außerdem beinhaltet der Fragenkatalog konkrete Fragen zum E-Bike-Nutzungsverhalten sowie den Erfahrungen mit Akkureparaturen beziehungsweise Rückgaben. Bei allen Umfragen besteht das Ziel, Repräsentativität zu erreichen (Berechnung auf Grundlage von Bartlett et al., 2001). Der Kontakt zu Händlern und Refurbishern erfolgt direkt via Mail oder Anruf. Die Nutzerumfrage ist hingegen anonymisiert, lediglich Alter und Postleitzahl werden abgefragt. Um so viele Teilnehmer wie möglich zu erreichen, sind insbesondere Social-Media-Posts, verbunden mit dem Aufruf zum Weiterleiten, ein wirksames Instrument. Dabei hilft die Unterstützung größerer Netzwerke, unter anderem von der Stiftung GRS Batterien und dem ADFC.

Für den Social-Media-Post wurde eine KI-generierte Darstellung mit integriertem QR-Code zur Umfrage erstellt (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Social-Media-Umfrageaufruf (KI-generiert)

3 Fazit und Ausblick

Der Bestand an E-Bikes in Deutschland wächst immer mehr. Folglich werden in den kommenden Jahren immer mehr Akkus im Sammelsystem landen, insbesondere da die Projektergebnisse zeigen, dass die mittlere Nutzungsdauer der zugehörigen Akkus oft deutlich länger ist als allgemein angenommen. Angebote von Reparateuren und Refurbishern verlängern die angenommene Nutzungszeit von Batterien. Dieser negative Einfluss auf die Sammelquoten, der allerdings dem Nachhaltigkeitsgedanken entspricht, sollte stärker berücksichtigt werden. Es bedarf viel Arbeit, um bis 2028 die EU-BattV-Sammelquote von 51 % für LMT-Batterien erfüllen zu können. Optimierungen (bspw. bessere Schulung von Mitarbeitern in Rücknahmestellen) und eine Erweiterung des Sammelnetzwerks können dazu beitragen, die Quote zu erhöhen, ebenso wie bessere Aufklärung der Bürger über Rückgabemöglichkeiten oder Anreize zur Abgabe (bspw. ein Pfandsystem), um das Horten alter Akkus und unsachgemäße Entsorgung zu verhindern.

Literatur/Quellen

- ADAC (2025): Pkw-Neuzulassungen 2024: E-Auto-Boom jäh beendet. Online: <https://www.adac.de/news/neuzulassungen-kba/>, abgerufen am 09.01.2025
- Automobilclub von Deutschland (AvD, 2023): E-Bike: Nutzungsdauer und Akkulebensdauer. Online: <https://avd.de/wissensbasis/rund-ums-auto/artikel/e-bike-nutzungsdauer-und-akku-lebensdauer>, abgerufen am 02.01.2025
- Bartlett, J. E., Kotrlik, J. W. & Higgins, C. C. (2001): Organizational Research: Determining Appropriate Sample Size in Survey Research. *Learning and Performance Journal*, 19, 43-50.
- Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV, 2024): Entwurf eines Gesetzes zur Anpassung des Batterierechts an die Verordnung (EU) 2023/1542
- Diamant (2022): E-Bike-Akku Lebensdauer: Wie lange hält ein Fahrrad-Akku?. Online: <https://www.diamanttrad.com/blog/e-bike-akku-faq/lebensdauer/>, abgerufen am 02.01.2025
- EU-Batterieverordnung (EU-BattV, 2023): Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG
- Giern, S.; Weishaupt, H. (2022): Abfallnachweis- und Registerführung. *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft*: 53-73
- GRS Batterien Service GmbH (o.D.): Sortierung. Online: <https://www.grs-batterien.de/sicherheit/sicherheitsforum/sortierung/>, abgerufen am 03.01.2025
- LAGA – Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (2019): LAGA PN 98 - Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen
- Straßburger, C. & Jüster, M. (2022): E-Bike Studie 2021/22: Mobilitätsverhalten, Motive zur Nutzung und mittelfristiger Erfüllungsgrad von Erwartungen
- Zweirad-Industrie-Verband (ZIV, 2024): Marktdaten 2023: Fahrradbranche trotz negativem Konsumklima, Pressemitteilung, Online: <https://www.ziv-zweirad.de/2024/03/13/marktdaten-2023-fahrradbranche-trotz-negativem-konsumklima/>, abgerufen am 02.01.2025

Kontakt

M. Sc., Johannes Preuß, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Technische Universität Dresden / Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Tel.-Nr.: +49 351 463-44155

E-Mail: johannes.preuss1@tu-dresden.de

Homepage: <https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/iak>

The LIB Recycling Challenge – Pathways Achieving Efficiency Rates

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, nickel and lead, 80 % for lithium. Additionally, a stricter requirement for comprehensive data collection and verification from recycling companies is obligatory. The 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 of the module. 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). 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		70 % of the average weight (battery system)	31 December 2030
Material recovery	cobalt	95 %	31 December 2031
	copper	95 %	
	lead	95 %	
	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		

Recycling Efficiency Rate (r_{RE})

Disassembled parts have the potential contributing a significant share to the calculated **recycling efficiency rate (rRE)** 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 (rRE)

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

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

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

Recovery Rate of Materials (r_{RM})

The EBR 2023 furthermore introduces the recovery rate (rRM) 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 (rRM)

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

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

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

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

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 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 r_{RE} 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.

Joining technology

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

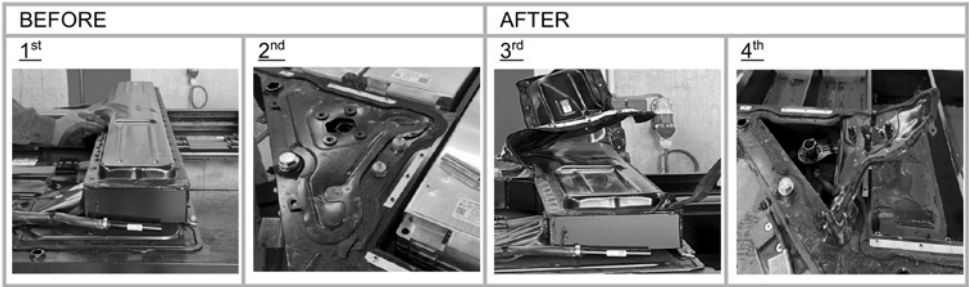


Fig 2. Challenging joining technology: 1st & 2nd: housing cover; 3rd & 4th: cover could only be removed with non-destructive efforts; 3rd: modules in silver visible; 4th: bonding of modules by adhesives visible

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

Publicity available information	Accessible with legitimate interest & to commission
Material composition	Composition cathode, anode, electrolyte
Composition hazardous & critical substances: Hg, Cd, Pb	Dismantling:
Recyclate content (Article 8 (1))	→ 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

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.

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.

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 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.

Acknowledgement

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 Montanuniversität Leoben.

Literature

- 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 Ausschuss 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 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

Dipl.-Ing. Cornelia Rutkowski

Cornelia.rutkowski@unileoben.ac.at

Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Montanuniversität Leoben

+43 / 650 890 64 57

<http://avaw.unileoben.ac.at>

Abfallwirtschaft 2.0: Kunststoff-Aufbereitungsanforderungen der Zukunft

Abstract: Die Kunststoffindustrie steht vor der Herausforderung, den Einsatz von Rezyklaten zu erhöhen, um gesetzliche Vorgaben und gesellschaftliche Forderungen zu erfüllen. In dieser Arbeit werden zukünftige Anforderungen an die Kunststoffkreislaufwirtschaft analysiert und innovative Technologiekombinationen identifiziert, die eine effiziente und nachhaltige Verarbeitung von Kunststoffabfällen ermöglichen. Basierend auf einer Analyse des Sekundärmarktes, der aktuellen Abfallströme, der gesetzlichen Rahmenbedingungen und der Nutzung von Zukunftsszenarien werden Lösungskonzepte für die zukünftige Sammlung, Sortierung und Aufbereitung von Kunststoffen erarbeitet. Die Ergebnisse werden durch Experteninterviews mit Stakeholdern der gesamten Wertschöpfungskette validiert und ergänzt. Erwartete Resultate sind praxisnahe Anforderungen, effiziente Lösungsszenarien und validierte Technologiekombinationen, die als Grundlage für strategische Planungen in der Kunststoffindustrie dienen können.

1 Einleitung

Die Kunststoffindustrie, insbesondere die Sortierung und das Recycling von Kunststoffen, steht zunehmend unter Druck nachhaltigere und zirkuläre Lösungen zu entwickeln und umzusetzen. Im Jahr 2021 wurden in Deutschland ca. 35% der Kunststoffabfälle stofflich und ca. 64 % energetisch verwertet. Lediglich 9% der in Verkehr gebrachten Kunststoffe wurden wieder als Rezyklate in neuen Produkten eingesetzt [1,2]. Gesetzliche Vorgaben wie die europäische Kunststoffstrategie, die eine Erhöhung des Rezyklateinsatzes auf 10 Millionen Tonnen und damit eine Verdopplung der Mengen aus dem Jahr 2019 anstrebt, der EU New Circular Economy Action Plan und die nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie Deutschlands fordern höhere Rezyklateinsatzquoten in der Kunststoffindustrie [3]. Mit dem Entwurf der Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) diskutiert die Europäische Union eine europaweite Verordnung, die unter anderem produktspezifische Rezyklateinsatzquoten für Verpackungen ab dem Jahr 2030 vorsieht [4]. Neben gesetzlichen Vorschriften drängen auch Konsumenten und Brands auf einen erhöhten Rezyklateinsatz. Es stehen derzeit jedoch nicht genügend Rezyklate zur Verfügung, um die Marktnachfrage langfristig zu decken [5]. Neben technischen Herausforderungen erschweren die Konkurrenz mit günstigeren Primärkunststoffen und Unsicherheiten bei Verfügbarkeit und Qualität den Einsatz der Rezyklate [6].

Die Beibehaltung des Status quo und Pfadabhängigkeiten in der Recyclingindustrie führen zur Bevorzugung etablierter Technologielösungen und -systeme. Um die politisch und gesellschaftlich geforderten Ziele der Kreislaufwirtschaft zu erfüllen und die zukünftige Rezyklatnachfrage zu decken, scheinen inkrementelle Verbesserungen bestehender Ansätze nicht auszureichen – es sind komplett neuartige Lösungen erforderlich. Technologieinnovationen in den Bereichen der Sortierung und Recycling,

wie digitale Wasserzeichen [7], Tracer-Based Sorting [8], Objekterkennung [9] und Hyperspektral-Imaging [10], sowie chemisches Recycling [11] bieten neue technische Möglichkeiten. Diese Technologien oder Kombinationslösungen daraus können das Potenzial bieten, die zukünftige Rezyklatnachfrage zu decken und den Abfallstrom umweltfreundlich und effizient zu verwerten.

Mit dieser Arbeit werden zukünftige Aufbereitungsanforderungen an die Kunststoffkreislaufwirtschaft ermittelt und potenzielle Technologiekombinationen identifiziert, mit denen die Anforderungen effizient und nachhaltig erfüllt werden können.

2 Methodik

Zunächst werden dazu die zukünftigen Anforderungen an Arten und Qualitäten von Sekundärkunststoffen auf Basis des Sekundärmarkts abgeleitet. Dies erfolgt durch eine umfassende Literaturrecherche zu den aktuellen Stoffströmen von Kunststoffabfällen sowie durch die Auswertung der Verpackungsstudie 2019 und der Verpackungsstudie 2024 der Hochschule Pforzheim [12]. Ergänzend wird eine Analyse der gesetzlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen durchgeführt, um Anforderungen an die Sortierung und Aufbereitung von Kunststoffen festzulegen. Mit einem Zeithorizont von 10 Jahren werden Zukunftsszenarien aus Fachveröffentlichungen übernommen, bei Bedarf kombiniert und erweitert, um die zukünftigen Sortier- und Aufbereitungsanforderungen zu prognostizieren.

Auf dieser Grundlage werden Lösungsszenarien entwickelt, die eine effiziente und nachhaltige Kunststoffkreislaufwirtschaft ermöglichen. Anschließend werden Technologiekombinationen für die abgeleiteten Lösungsszenarien ermittelt, die eine nachhaltige und effiziente Umsetzung ermöglichen. Abschließend werden die Lösungsansätze qualitativ anhand definierter Kriterien bewertet.

Ein zentraler Teil der Arbeit ist die Validierung und Ergänzung der Ergebnisse mithilfe von Experteninterviews. Diese Fachexperten repräsentieren relevante Stakeholder entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Kreislaufwirtschaft in der Kunststoffindustrie. Durch die Verwendung halbstrukturierter Interviews mit offenen Fragestellungen wird sowohl Expertenwissen der Industrie gesammelt sowie eine Validierung der Ergebnisse ermöglicht, um praxisnahe Erkenntnisse zu gewinnen.

Die erwarteten Ergebnisse umfassen spezifische Aufbereitungsanforderungen für die Zukunft, Lösungsszenarien zur Erfüllung dieser Anforderungen sowie qualifizierte und durch Experten validierte Technologiekombinationen.

3 Ausblick

Die Kombination aus Bedarfsanalyse des Sekundärmarktes, technologiegestützten und stakeholderübergreifenden Lösungsansätzen zur effizienten Verarbeitung des Abfallstroms und gleichzeitigen Marktdeckung der Sekundärkunststoff Nachfrage mit dem Ziel der Gesamtsystemoptimierung existiert in dieser Form bislang nicht (eine aktuelle Studie des Forum Rezyklat hebt die Potenziale und Grenzen der einzelnen Sortiertechnologien hervor [13]). Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten eine praxisnahe, durch Experten validierte Grundlage welche als Ausgangspunkt für strategische Innovations- und Technologieplanungen von Unternehmen im Bereich der Kunststoff Kreislaufwirtschaft genutzt werden kann.

Literatur/Quellen

- [1] Lindner, C., Schmitt, J., Fischer, E., & Hein, J. (2022). Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Conversio Market & Strategy.
- [2] Umweltbundesamt. (2023). Kunststoffabfälle. Abgerufen am 17. Oktober 2024, von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#hohe-verwertungsquoten>
- [3] Europäische Kommission. (2018). Eine europäische Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft.
- [4] Europäische Kommission. (2022). Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Verpackungen und Verpackungsabfälle, zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020 und der Richtlinie (EU) 2019/904 sowie zur Aufhebung der Richtlinie 94/62/EG. COM/2022/677 final.
- [5] Voit, A.-K. (2022). Alles Müll? Plastikmüll und Recycling in Deutschland – Kann das Verpackungsgesetz die Nachhaltigkeit erhöhen? In B. G. Jeschke & T. Heupel (Hrsg.), Bioökonomie (S. 279–297). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [6] OECD. (2018). Improving Markets for Recycled Plastics – Trends, Prospects and Policy Responses. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264301016-en>
- [7] AIM - European Brands Association. Digital Watermarks Initiative HolyGrail 2.0. Abgerufen am 14. Oktober 2024.
- [8] Woidasky, J., et al. (2020). Kunststoffidentifikation und -sortierung in der Circular Economy durch Fluoreszenz-marker. Chemie Ingenieur Technik, 92(4), 1–12. <https://doi.org/10.1002/cite.201900126>
- [9] Recycleye. Recycleye Webseite. Abgerufen am 18. Oktober 2024, von <https://recycleye.com/de/>
- [10] Beel, H. (2017). Sortierung von schwarzen Kunststoffen mit Hyperspectral-Imaging-Technologie. In K. J. Thomé-Kozmiensky, S. Thiel, E. Thomé-Kozmiensky & D. Goldmann (Hrsg.), Recycling und Rohstoffe (S. 175–191). Neuruppin: TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.
- [11] Chen, S. (2024). Advancements and future directions in waste plastics recycling: From mechanical methods to innovative chemical processes. Chemical Engineering Journal, 493. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152727>
- [12] Schmidt, J., et al. (2021). Challenges and Solutions for Plastic Packaging in a Circular Economy. Chemie Ingenieur Technik, 93(11), 1751–1762. <https://doi.org/10.1002/cite.202100110>
- [13] Kuchta, K., et al. (2022). Vergleich innovativer Identifikationsverfahren für Post-Consumer Leichtverpackungen. Forum Rezyklat. Abgerufen am 18. Oktober 2024, von https://www.forum-rezyklat.de/fileadmin/user_upload/20230606_FR_FP2_Endbericht_Vorstudie_Rev.1.0.pdf

Kontakt

M.Sc., Raphael Schill, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Hochschule Pforzheim, Institut für Industrial Ecology
Tel.-Nr. +497231 28 6874
E-Mail: raphael.schill@hs-pforzheim.de

Digitaler Produktpass in der Textilindustrie: Materialflussanalyse möglicher Auswirkungen auf den Sortierprozess

Abstract: Der EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft benennt Textilien als einen der zentralen Stoffströme, die zur weltweiten Umweltverschmutzung beitragen. Von 2017 bis 2030 wird ein Anstieg der Textilproduktion um 63 % prognostiziert, um den weltweiten Konsum zu decken (GFA 2017). Eine Lösungsstrategie zur Bewältigung der Alttextilströme könnte die Einführung des Digitalen Produktpasses (DPP) darstellen (2022/0095 (COD) 2022). Ziel dieser Untersuchung ist es, szenarienbasiert die Auswirkungen der Einführung des DPPs auf die Alttextilströme in Deutschland zu analysieren. Der Fokus liegt dabei auf den Sortierprozessen. Im business as usual-Szenario wird für das Jahr 2030 ein Massenstrom von 206 Tonnen pro Jahr prognostiziert, während das DPP-Szenario einen Massenstrom von 216 Tonnen pro Jahr erwartet. Es zeigt sich, dass der DPP als Maßnahme zur Kreislaufwirtschaft nur einen marginalen Einfluss auf die massenbasierten Stoffströme hat, mit einer Steigerung der Recyclingrate von 21 % auf 23 %, gemessen am Anteil des Sammelmassenstroms. Die Ergebnisse zeigen, dass der DPP nur einen begrenzten positiven Einfluss auf das Recyclingpotenzial hat, während die flächendeckende Einführung automatisierter Sortiertechnologien entscheidender für eine signifikante Steigerung ist.

1 Einleitung

Der EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft zielt darauf ab, Umweltverschmutzung zu reduzieren, nachhaltiges Wachstum zu fördern und Ressourcen zu schonen (EC 2020). Textilien wurden darin als ein zentraler Stoffstrom identifiziert, da sie erheblich zur Umweltverschmutzung beitragen. Zwischen 2000 und 2015 hat sich die weltweite Textilproduktion nahezu verdoppelt und von 2017 bis 2030 wird ein weiterer Anstieg um 63 % auf 102 Millionen Tonnen erwartet (EMF 2017; GFA 2017). Ein zentrales Problem für die Kreislaufwirtschaft in der Textilindustrie ist der Mangel an Informationen entlang der Wertschöpfungskette (Hedberg und Šipka 2021). Aktuell dominiert in Deutschland die manuelle Alttextilsortierung, bei der das subjektive Urteil der Sortierperson (basierend auf Sortierrichtlinien) aufgrund fehlender Produktinformationen das Recyclingpotenzial begrenzt (McKinsey & Company 2022, Jansen et al. 2023). Der Digitale Produktpass (DPP) wird als potenzielle Lösung vorgeschlagen, um fehlende Produktdaten bereitzustellen, indem Produzent*innen relevante Informationen an End-of-Life-Akteur*innen übermitteln, um automatisierte Sortierentscheidungen und eine bessere Verwertung von Textilien zu ermöglichen (2022/0095 (COD) 2022). Der DPP soll es ermöglichen, Materialien durch digitale Datensätze nachzuverfolgen, was eine präzisere Qualitätskontrolle für Recyclingprozesse unterstützen könnte (Jansen et al. 2023). Die Einführung des DPPs als Maßnahme zur Förderung der Kreislaufwirtschaft könnte die Sortierprozesse verbessern und die

Recyclingquote steigern. Es stellt sich jedoch die Fragen, inwiefern die Verfügbarkeit neuer Informationen über Textilien die Sortierung und damit verbundene verwertungsspezifische Lenkung von Stoffströmen unter Berücksichtigung regionaler Rahmenbedingungen und Infrastrukturen beeinflussen kann. Ziel dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen des Digitalen Produktpasses auf die massenbasierten Alttextilströme in verschiedenen Szenarien für das Jahr 2030 in Deutschland zu analysieren, mit besonderem Fokus auf DPP-basierte Sortierprozesse.

Die Forschungsfragen zur Erreichung des Ziels sind:

1. Welche textilen Stoffströme wurden in Deutschland im Basis-Jahr 2018 erfasst?
2. Welche Sortierprozesse werden aktuell industriell genutzt und sind in der Erprobung?
3. Wie verändern sich massenbasierte Alttextilströme durch die Einführung des DPPs bis 2030?

2 Methodik

Die Untersuchung fokussiert sich ausschließlich auf Bekleidung als Bestandteil der gesamten textilen Stoffströme. Methodisch stützt sich die Untersuchung auf eine szenarienbasierte Materialflussanalyse (MFA) in fünf Schritten nach Brunner und Rechberger (2017). Die MFA wird für das gegenwärtige Basis-Modell (BM, 2018) und zwei Szenarien für 2030 – business-as-usual Szenario (BAU, 2030) und DPP-Szenario (DPP, 2030) – durchgeführt. Das qualitative generische Modell wurde iterativ entwickelt und bildet die Massenströme für die jeweiligen Prozessschritte ab (siehe Abbildung 1).

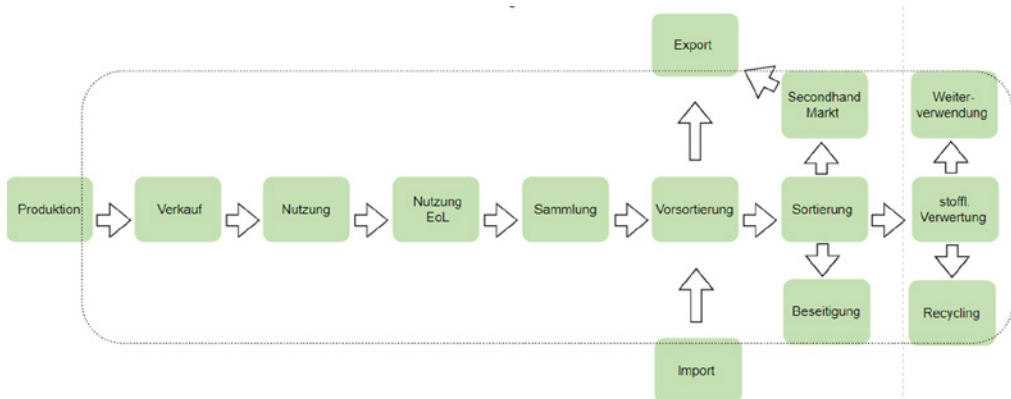


Abbildung 1: Darstellung des Stoffstromschemas zur Modellierung von Alttextilien (Eigene Darstellung)

Das BM wird anhand vorliegender Literaturdaten für das Jahr 2018 in Deutschland entwickelt. Die zuletzt erfassten Mengen textiler Stoffströme in Deutschland sind in der Literatur nach Forbrig et al. (2020) dokumentiert. Durch das Hinzufügen von Exportdaten und einer Plausibilitätsprüfung wurden die Daten bereinigt und anschließend auf Bekleidungsdaten umgerechnet (Wagner et al. 2022). Technisch wird von den aktuell verfügbaren Technologien ausgegangen, nämlich der manuellen Sortierung in fünf aufeinander folgenden Sortierschritten nach: Geschlecht, Textiltyp, Materialzusammensetzung, Farbe und Störstoffentfernung (TERRA, 2023). Die gesammelte Menge gliedert sich in Teilströme: Die Wiederverwendung umfasst den Secondhandmarkt in Deutschland sowie den Export, während sich die restlichen Mengen auf Beseitigung,

Weiterverwendung und Recycling aufteilen, wobei der Recyclinganteil unter Einfluss der Transferkoeffizienten nur 1 % des Sammelmassenstroms ausmacht (EMF 2017).

Das BAU-Szenario bildet eine mögliche Entwicklung bis zum Jahr 2030 und wird mittels aufbauender Transferkoeffizienten explorativ entwickelt. Die Annahmen beziehen sich auf geplante gesetzliche Rahmenentwicklungen und technisch-wissenschaftliche Bewertungen für die Alttextilbewirtschaftung. Die Anforderungen zur Umsetzung eines textilen Kreislaufwirtschafts-Ansatzes sollen erfüllt werden. Die Methodik baut auf den Daten bzw. der Methodik des BM auf. Hierbei werden folgende Transferkoeffizienten betrachtet: steigende Produktionsrate, Getrenntsammlungspflicht, abnehmende Qualität, sinkender Export, wachsender Technologiereifegrad Sortierung (TRLS) und wachsender Technologiereifegrad Recycling (TRLR). TRLS gliedert sich nochmal in die Einflussfaktoren (1) Automatisierte Sortierung und (2) Sortiererfolg; TRLR gliedert sich in den Anteil des (1) mechanischen- und (2) chemischen Recyclings.

Im DPP 2030 Szenario bleiben alle Annahmen zum BAU-Szenario gleich, mit Ausnahme des Einsatzes des DPPs sowie der damit verbundenen Änderungen des Technologiereifegrads der Sortierung (TRLS) – einschließlich des gesteigerten Sortiererfolgs der automatisierten Sortierung zusätzlich zur NIR-Standardtechnologie im BAU – und des Technologiereifegrads des Recyclings (TRLR). Im Fokus der Analyse der Modelle steht der Stoffstrom des Recyclings und der Einfluss des neuen Informationsgehalts des DPPs auf die Sortierung, sodass ein größerer Stoffstrom dem Recycling zur Verfügung steht.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen für das Basis-Modell (BM, 2018) einen Produktionsinput (PK) von 1.035 Mt/a, eine Sammelmenge (SM) von 661 Mt/a und einen Recyclingoutput (RC) von 6 Mt/a (siehe Tabelle 1) inklusive der prozentualen Verwertungsraten angegeben. Im BAU-Szenario wird ein PK von 1.396 Mt/a, eine SM von 961 Mt/a und ein RC von 206 Mt/a erreicht. Der Anstieg des SM im Vergleich zum BM ist vor allem auf die angenommene Getrenntsammlungspflicht für Alttextilien zurückzuführen. Ein zentraler Unterschied zwischen dem BM und dem BAU ist der Einfluss der automatisierten Sortierung. Während im BM nur 31 % der gesammelten Alttextilien der stofflichen Verwertung zugeführt werden, steigt dieser Anteil im BAU auf 45 %. Dies verdeutlicht, dass die automatisierte Sortierung einen erheblichen Beitrag zur Erhöhung des Recyclingpotenzials leistet, da die Materialzusammensetzung durch die NIR mit höherer Genauigkeit bestimmt werden kann. Dies schafft mehr Sicherheit für den Erfolg von chemischen und mechanischen Recyclingprozessen und fördert Investitionen in diesem Bereich. Im Gegensatz dazu kann die manuelle Sortierung diese Genauigkeit nicht erreichen. Im DPP-Szenario beträgt der PK ebenfalls 1.396 Mt/a und die SM 961 Mt/a. Durch den Einsatz des DPPs wird ein RC von 216 Mt/a erzielt, was einer Zunahme von 10 Mt/a im Vergleich zum BAU entspricht. Die vorliegende Untersuchung der Auswirkungen des DPPs auf die massenbasierten Alttextilströme für das Jahr 2030 zeigt, dass der DPP die Stoffströme insgesamt nur marginal verändert. Der Stoffstrom zum Recycling steigt lediglich von 21 % (BAU) auf 23 % (DPP). Obwohl angenommen wird, dass der Sortiererfolg von mit Datenträgern ausgestatteter Bekleidung im automatisierten Sortierprozess durch den DPP von 80 % auf nahezu 100 % gesteigert werden kann, hat dies nur geringe Auswirkungen auf die Alttextilströme. Bei der Betrachtung der automatisierten Sortierung zeigt sich dennoch, dass der DPP in Kombination mit dem NIR das größte Potenzial in der Sortierung für die stoffliche Verwertung und damit in den Recyclingmassenstrom aufweist.

Tabelle 1: Vergleich der szenarienbasierten Massenströme

Massenstrom	Basismodell		BAU-Szenario		DPP-Szenario	
Input Produktion	1.035.000 t/a	162 %	1.396.000 t/a	150 %	1.396.000 t/a	150 %
Output Sammlung	661.000 t/a	100 %	961.000 t/a	100 %	961.000 t/a	100 %
Output Recycling	6.000 t/a	1 %	206.000 t/a	21 %	216.000 t/a	23 %

4 Diskussion

Die beiden Einflussfaktoren für den Technologiereifegrad der Sortierung (TRLS) – der Anteil der automatisierten Sortierung mittels Nahinfrarotspektroskopie von 50 % in Deutschland an der gesamten Sortierung und der Sortiererfolg im Sortierprozess von 80 % – werden als maßgebliche Einflussgrößen im BAU-Modell identifiziert. Es zeigt sich, dass das Recycling nicht nur von der Sortiertechnologie und damit dem Sortiererfolg abhängig ist, sondern insbesondere auch von dem flächendeckenden Einsatz einer automatisierten Sortiertechnologie. Dieser sensitive Einflussfaktor ist für die Verwertung im Recycling entscheidend. Im Vergleich zum BAU-Szenario zeigt sich in dem entwickelten DPP-Szenario außerdem eine Veränderung in der Technologiereife (TRLR) des chemischen Recyclings. Durch den Informationsfluss und die neu gewonnene Sicherheit über die Materialzusammensetzung steigt der Einsatz des chemischen Recyclings von 10 % auf 20 %. Der Vergleich zwischen dem BAU-Szenario und dem DPP-Szenario lässt erkennen, dass eine Verbesserung zu einem deutlich höheren Recyclingpotenzial durch den DPP bis 2030 nicht bewirkt werden kann. Trotz der Weiterentwicklung von Sortier- und Recyclingtechnologien (TRLS und TRLR) führt der Einsatz des DPPs nicht zu einer entscheidenden Verbesserung für die Kreislaufwirtschaft. Ohne Anwendung des DPPs bleibt jedoch eine gewisse Unsicherheit im Sortiererfolg bestehen, da der Einsatz des NIR-Systems bisher nicht immer zuverlässig ist. Der Einsatz zusätzlicher Informationen des DPPs zur Validierung des NIR-Systems könnte diese Unsicherheit reduzieren. Allerdings müssten diese Daten korrekt und verifiziert sein, um überhaupt genutzt werden zu können. Dies könnte zu einer korrekten Zuordnung der Materialien für die Verwertung führen, die wiederum eine höhere Sicherheit für Investitionen und eine verbesserte Recyclingeffizienz ermöglichen könnte.

Literatur/Quellen

- 2022/0095 (COD) (2022): Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC. ESPR, COM(2022) 142 final. Hg. v. Europäische Kommission.
- Brunner, Paul H.; Rechberger, Helmut (2017): Handbook of material flow analysis. For environmental, resource, and waste engineers. Second edition. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group.
- EC (2020): COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, (...) A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe. COM(2020) 98 final. Hg. v. Europäische Kommission.
- EMF (2017) A New Textiles Economy: Resdesigning Fashion's Future. Sum mary of findings. Hg. v. Ellen MacArthur Foundation, Circular Fibres Initiative

- Forbrig Sebastian; Fischer, Thomas; Heinz, Beate (2020): Textilstudie 2020. „Bedarf, Konsum, Wiederverwendung und Verwertung von Bekleidung und Textilien in Deutschland“. Hg. v. bvse - Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. Fachverband Textilrecycling
- GfA (2017): Pulse of the Fashion Industry. Unter Mitarbeit von John Kerr und John Landry. Hg. v. Global Fashion Agenda & The Boston Consulting Group.
- Hedberg Annika; Šipka, Stefan (2021): Toward a circular economy: The role of digitalization. n: One Earth 4 (6), S. 783–785. DOI: 10.1016/j.oneear.2021.05.020.
- Jansen, M.; Meisen, T.; Plociennik, C.; Berg, H.; Pomp, A.; Windholz, W. (2023): Stop Guessing in the Dark: Identified Requirements for Digital Product Passport Systems. In: Systems 11 (3), S. 123. DOI: 10.3390/systems11030123.
- McKinsey & Company (2022): Scaling textile recycling in Europe – turning waste into value.
- TERRA (2023a): Characterisation study of the incoming and outgoing streams from sorting facilities. Summary Report. Hg. v. Refashion.
- Wagner, J.; Steinmetzer, S.; Theophil, L.; Strues, A.; Kösegi, N.; Hoyer, S. (2022): Evaluation der Erfassung und Verwertung ausgewählter Abfallströme zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft. TEXTE 31/2022; Hg. v. Umweltbundesamt.

Kontakt

M.Sc. Hannah Lisa Schlicht, Wissenschaftlicher Mitarbeiterin

Technische Universität Berlin / Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie

Tel.-Nr. +49 1726178129

E-Mail: h.schlicht@tu-berlin.de

Entwicklung eines Klassifikationsmodells zur sensorbasierten Sortierung von Kunststofffolien anhand von VIS-Aufnahmen

Abstract: Kunststofffolien erweisen sich aufgrund ihrer geringen Schichtdicke als Herausforderung für bestehende Nahinfrarot-Sortierer. Die geringe Interaktion zwischen Strahlung und Material erschwert eine zuverlässige Klassifizierung von Mono- und Multimaterialien. (Koinig et al. 2022) Maßnahmen sind notwendig, um auch aus diesem Abfallstrom die recyclingfähige Fraktion der Monomaterialien wiederzugewinnen, damit die von der EU für 2025 geforderte Recyclingquote für Verpackungsabfälle von 50 % erreicht werden kann (EUP 2018). Convolutional Neural Networks (CNN) bieten einen datenbasierten Ansatz zur Lösung dieses Klassifikationsproblems mit einer vergleichsweise einfachen Implementierung gegenüber bestehenden Klassifikationsmodellen. 17 CNNs wurden mit Datensätzen bestehend aus VIS-Aufnahmen via Transfer Learning auf die Klassifizierung von Mono- und Multimaterialien umgelernt und anschließend getestet. Unter den getesteten Netzwerken konnten für die Klassifizierung Genauigkeiten zwischen 63 % – 79 % erreicht werden. Einblicke in die Entscheidungsfindung der Netzwerke durch Class Activation Maps legen offen, dass materialunspezifische Merkmale wie Falten in der Folie oder Beschriftungen von den Netzwerken zur Klassifizierung herangezogen werden. Somit besteht auch hier das Problem einer unzuverlässigen Klassifizierung. Anwendung eines solchen Klassifikationsmodells könnte man in der Vorsortierung von Kunststofffolien zur Entlastung bestehender Nahinfrarot-Sortierer finden.

1 Einleitung

Kunststoffe haben sich aufgrund ihrer großen Bandbreite an Eigenschaften, geringen Dichte und wirtschaftlichen Verarbeitung über Jahre hinweg als eines der meistgenutzten Materialien für Verpackungsanwendungen etabliert. Besonders Kunststofffolien nutzen diese Eigenschaften durch Kombination unterschiedlicher Polymere in einem mehrschichtigen Aufbau. Die erhöhte Funktionalität von Mehrschichtfolien zieht allerdings den Verlust der Recyclingfähigkeit nach sich. Gegenwärtig können ausschließlich Monomaterialien wirtschaftlich recycelt werden. Bestehende Nahinfrarot-Sortierer haben allerdings Schwierigkeiten Kunststofffolien zuverlässig zu klassifizieren, da die geringe Schichtdicke zu wenig Interaktion der Strahlung mit dem Material ermöglicht (Koinig et al. 2022). Maßnahmen sind also notwendig, um auch aus diesem Abfallstrom die recyclingfähige Fraktion der Monomaterialien wiederzugewinnen, damit die für 2025 geforderte Recyclingquote für Verpackungsabfälle von 50 % erreicht werden kann (EUP 2018). Einen datenbasierten Ansatz zur Lösung dieser Problematik bieten Bildklassifikationsmodelle basierend auf Convolutional Neural

Networks (CNN). CNNs haben sich aufgrund ihrer Fähigkeit, aus Aufnahmen lokale Zusammenhänge bzw. Merkmale extrahieren zu können, in der Bildklassifikation etabliert.

Ziel dieser Arbeit ist verschiedene CNNs, die für die Bildklassifizierung vortrainiert wurden, auf ihre Fähigkeit zu untersuchen Mono- und Multimaterialien anhand von VIS-Aufnahmen zu klassifizieren. Dazu werden 17 unterschiedliche Netzwerkstrukturen mit eigens angefertigten VIS-Aufnahmen von Kunststofffolien mittels Transfer Learning auf die Klassifizierung von Mono- und Multimaterialien umgelernt. Zum Testen der Klassifizierungsleistung müssen die neu trainierten Netzwerke einen Testdatensatz klassifizieren. Das Ergebnis dieses Tests ist eine Konfusionsmatrix, aus der Leistungsmetriken wie die Genauigkeit (oder das F-Maß) abgeleitet werden. Um einen Einblick in die Entscheidungsfindung der Netzwerke zu erlangen, werden Abbildungen ähnlich einem Wärmebild, sogenannte Class Activation Maps (CAM), für ausgewählte Netzwerke angefertigt und verglichen. Abschließend soll anhand der Leistungsmetriken und CAMs ein Einsatz in der Praxis evaluiert werden.

2 Methodik

2.1 Generierung von VIS-Aufnahmen und Erstellung der Datensätze

Die Generierung der Bilddaten wurde am Versuchsstand für sensorgestützte Sortierung am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW) der Montanuniversität Leoben durchgeführt. Dazu wurden Abfälle der Leichtverpackungssammlung, welche bereits in einer Kunststoffdatenbank erfasst worden sind, einzeln dem Versuchsstand zugeführt, um davon eine VIS-Aufnahme im freien Fall zu erstellen. Aufnahmen von Kunststofffolien wurden vor Erstellen der Datensätze in einer Bildvorverarbeitung auf das Abfallobjekt zugeschnitten. Insgesamt 1076 Aufnahmen wurden erstellt, jeweils 538 für Mono- und Multimaterialien. Daraus sind Trainingsdatensätze mit jeweils 350 Datenpunkten, Validierungsdatensätze mit jeweils 150 Datenpunkten und Testdatensätze mit jeweils 38 Datenpunkten erstellt worden.

2.2 Trainieren der Netzwerke – Transfer Learning

Im Kontext des maschinellen Lernens beschreibt Transfer Learning eine Technik, in welcher ein vortrainiertes Netzwerk für eine andere Aufgabe umgelernt wird (Hussain et al. 2019). Normalerweise werden große gekennzeichnete Datensätze benötigt, um ein Netzwerk von Grund auf zu trainieren. Mit Transfer Learning kann die Abhängigkeit großer Datensätze verringert und bestehende Fähigkeiten für neue Anwendungen genutzt werden (Gao und Mosalam 2018). Das Trainieren von Netzwerken wird durch sogenannte Hyperparameter beeinflusst, die vom Anwender selbst bestimmt werden müssen. Für diese Hyperparameter gibt es keine konkreten Werte, stattdessen werden diese in einem iterativen Prozess der Hyperparameteroptimierung ermittelt. Ziel der Hyperparameteroptimierung war es, in 30 Durchläufen die Validierungsgenauigkeit des Trainings zu maximieren. Die Validierungsgenauigkeit beschreibt eine iterative Überprüfung des Netzwerks während des Trainings mit Datenpunkten des Validierungsdatensatzes. Für die weitere Testung wurde von jeder der 17 Netzwerkstrukturen jenes mit der höchsten Validierungsgenauigkeit herangezogen.

2.3 Testen der erstellten Klassifikationsmodelle

Zum Testen der erstellten Klassifikationsmodelle wurden diese mit der Klassifizierung der Testdatensätze beauftragt. Ergebnis dieses Tests ist eine Konfusionsmatrix, aus der Leistungsmetriken wie Genauigkeit

(oder das F-Maß) abgeleitet werden. Unter den getesteten Netzwerken konnten für die Klassifizierung Genauigkeiten im Bereich von 63 - 78 % erreicht werden. Die höchsten Genauigkeit von 78,95 % erzielte die Netzwerkstruktur „EfficientNet-b0“, die auch bei weiteren Leistungsmetriken am besten abschnitt.

2.4 Erstellen der Class Activation Maps

Class Activation Maps (CAM) ermöglichen es Regionen eines Bildes zu visualisieren, die das Netzwerk zu seiner Klassifizierungsentscheidung führen. Dabei werden jene Bereiche, die eine Aktivierung des Netzwerks für eine Klasse auslösen, in einem Wärmebildschema dargestellt. Zum Erstellen der CAMs werden demnach die Aktivierungen des Netzwerks für jeden Pixel wie eine Maske über das Bild gelegt und mit einem Farbgradienten versehen. Rote Bereiche stehen für eine hohe, blaue für eine niedrige Aktivierung. CAMs wurden für die Netzwerkstrukturen „EfficientNet-b0“ und „GoogLeNet“ angefertigt und zusammen mit dem Originalbild in den Abbildungen 1 bis 2 dargestellt.

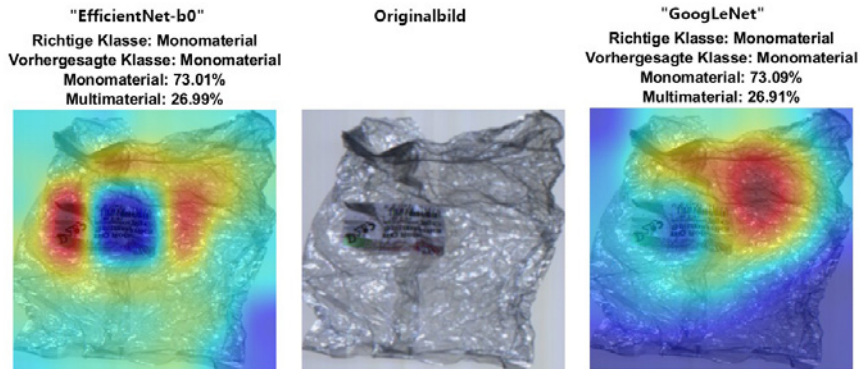


Abbildung 1: Class Activation Map einer korrekt klassifizierten Monomaterial (Eigene Darstellung)

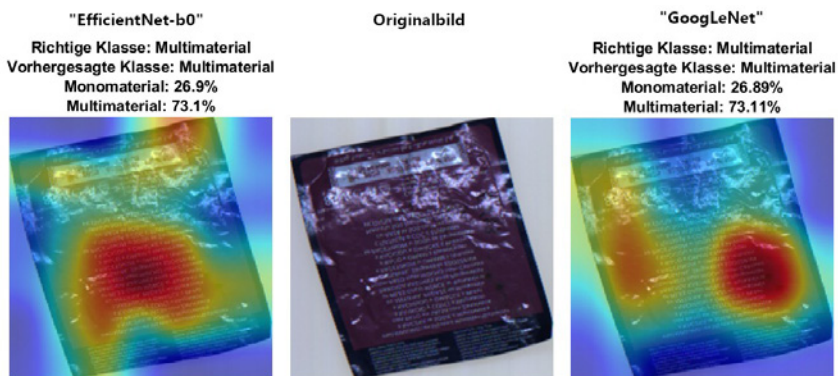


Abbildung 2: Class Activation Map eines korrekt klassifizierten Multimaterials (Eigene Darstellung)

3 Fazit

Inspektion der CAMs zeigt, dass die Netzwerke Regionen im Bild wie Beschriftungen, Falten in der Kunststoffolie oder den Hintergrund als Merkmale erkennen, jedoch tragen diese keine materialspezifischen Informationen. Somit besteht auch hier das Problem einer unzuverlässigen Klassifizierung. Das spiegelt sich in den Genauigkeiten wider, die mit einem Höchstwert von 78,95 % nur unzureichende Qualitäten des Rezyklats ermöglichen würden. Anwendung eines solchen Klassifikationsmodelles könnte man in der Vorsortierung von Kunststofffolien zur Entlastung bestehender Nahinfrarot-Sortierer finden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Klima, Umwelt, Energie, Mobilität und Innovation (BMK) und der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Rahmen des Programms „Energie der Zukunft. Kreislaufwirtschaft 2021 (KP)“ im Projekt circPLAST-mr (Förderungsnummer 889843) gefördert. Ich möchte mich außerdem beim AVAW Leoben für die Bereitstellung des Versuchsstands für sensorgestützte Sortierung und bei meinen Betreuern, die mich begleitet und unterstützt haben, herzlich bedanken.

Literatur/Quellen

- EUP (2018): Richtlinie 94/62/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Dezember 1994 über Verpackungen und Verpackungsabfälle. Europäisches Parlament.
- Gao, Yuqing; Mosalam, Khalid M. (2018): Deep Transfer Learning for Image – Based Structural Damage Recognition. In: Computer aided Civil Eng 33 (9), S. 748–768. DOI: 10.1111/mice.12363.
- Hussain, Mahbub; Bird, Jordan J.; Faria, Diego R. (2019): A Study on CNN Transfer Learning for Image Classification. In: Ahmad Lotfi, Hamid Bouchachia, Alexander Gegov, Caroline Langensiepen und Martin McGinnity (Hg.): Advances in Computational Intelligence Systems, Bd. 840. Cham: Springer International Publishing (Advances in Intelligent Systems and Computing), S. 191–202.
- Koinig, G.; Friedrich, K.; Rutrecht, B.; Oreski, G.; Barretta, C.; Vollprecht, D. (2022): Influence of reflective materials, emitter intensity and foil thickness on the variability of near-infrared spectra of 2D plastic packaging materials. In: Waste management (New York, N.Y.) 144, S. 543–551. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.12.019.

Kontakt

Martin Schneiderbeck (Student)

Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel.-Nr.: +4368110544746

E-Mail: martin.schneiderbeck@stud.unileoben.ac.at

Vergleichende Lebenszyklusanalyse innovativer und etablierter Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien

Abstract: *Lithium-Ionen-Batterien gelten als Schlüsseltechnologie für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors und die Integration erneuerbarer Energien. Für ihre Produktion werden jedoch kritische Rohstoffe wie Kobalt und Lithium benötigt, deren Gewinnung oft mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden ist. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen des Projektes MoLiBity die Umweltauswirkungen etablierter Recyclingverfahren (pyro- und hydrometallurgisch) sowie des innovativen COOL-Prozesses zur Lithiumrückgewinnung untersucht. Mithilfe einer Lebenszyklusanalyse werden die Umweltauswirkungen der verschiedenen Recyclingrouten quantifiziert und verglichen. Dabei werden sowohl die ökologischen Hotspots der etablierten Verfahren als auch des COOL-Prozesses identifiziert, um das Verfahren hinsichtlich ökologischer Auswirkungen optimieren zu können.*

1 Einleitung

Batterien gelten als zentrale Technologie sowohl für den Einsatz in Elektrofahrzeugen als auch für die Speicherung erneuerbarer Energien. Bis 2030 wird eine Batteriekapazität von 1,5 TWh in Elektrofahrzeugen sowie über 160 GWh in stationären Energiespeichern prognostiziert, wobei Lithium-Ionen-Batterien (LIB) erwartungsgemäß den Markt in beiden Anwendungsbereichen dominieren werden (Bielewski et al., 2022). Jedoch erfordert die Herstellung von LIB den Einsatz kritischer Rohstoffe wie Kobalt, Lithium oder Graphit, deren Gewinnung oft mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden ist. Vor diesem Hintergrund ist ein effektives Batterierecycling unverzichtbar, um die zunehmenden Mengen an End-of-Life (EoL)-LIB zu bewältigen, wertvolle Materialien zurückzugewinnen und den ökologischen Fußabdruck von LIB nachhaltig zu verringern (Bai et al., 2020; Bruno & Fiore, 2023). Für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft im Batteriebereich ist die Optimierung bestehender Recyclingverfahren essenziell. Diese dient nicht nur der Reduktion der Umweltauswirkungen von LIB, sondern auch der Erfüllung der von der EU festgelegten Recyclingquoten gemäß Verordnung (EU) 2023/1542. In diesem Zusammenhang bietet der auf CO₂-basierter Laugung beruhende COOL-Prozess zur Lithiumrückgewinnung einen vielversprechenden Ansatz (Pavón et al., 2021). Um in der Entwicklungsphase dieses Prozesses ökologische Hotspots und Optimierungspotenziale zu identifizieren, wird eine Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA) durchgeführt und ein Benchmarking mit etablierten Recyclingverfahren, wie pyrometallurgische und hydrometallurgische Ansätze, vorgenommen.

2 Methodik

Zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen wird eine LCA am Beispiel einer LIB mit der Zellchemie Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid im Verhältnis 1:1:1 durchgeführt. Dafür werden die Software LCA for Experts (Sphera, 2024) und die Datenbank Ecoinvent v3.10. (Wernet et al., 2016) verwendet. Für die Wirkungsabschätzung wird der Ansatz der Environmental Footprint 3.1-Methode (EF 3.1) angewandt.

Zur Verfahrensoptimierung wird eine Gate-to-Gate LCA des COOL-Prozesses durchgeführt. Dieser ermöglicht die Herstellung von „battery grade“ Kathoden- und Anodenmaterialien im Sinne des Closed-Loop-Recyclings und wurde von der TU Bergakademie Freiberg patentiert (Bertau et al., 2017). Im Rahmen des MoLiBity-Projekts wird die Pilotanlage am Fraunhofer IKTS in Freiberg (Deutschland) anhand ausgewählter Prozessparameter wie Temperatur, Energie- und Chemikalieneinsatz optimiert. Die LCA ermöglicht es, Umwelthotspots und Optimierungspotenziale aufzuzeigen. Als funktionelle Einheit wird die Behandlung von 1 kg Schwarzmasse gewählt. Für die Erstellung der Sachbilanz werden Primärdaten des COOL-Prozesses verwendet, der in Abbildung 1 schematisch dargestellt ist.

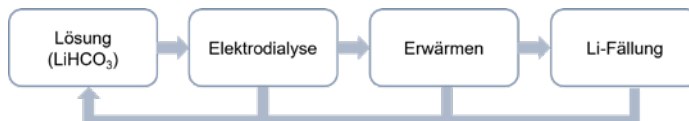


Abbildung 1: Verfahrensschritte des COOL-Prozesses basierend auf Pavón et al. (2021)

Eine Cradle-to-Grave LCA wird ebenso durchgeführt, um die Umweltauswirkungen unterschiedlicher Recyclingverfahren zu vergleichen. Die Systemgrenzen, dargestellt in Abbildung 2, umfassen die Produktionsphase und die EoL-Phase, in der die Auswirkungen von drei Verfahrensrouten verglichen werden. Für diese LCA wird die funktionelle Einheit 1 kg Batteriezelle festgelegt. Um die Vergleichbarkeit der Verfahrensrouten zu vereinfachen, wird ausschließlich die Batteriezelle betrachtet. Daher liegen die Prozessschritte Modul- und Packproduktion, Nutzung, z. B. in E-Autos oder Batteriespeichern, sowie die Sammlung, Demontage und Deaktivierung im LCA-Modell außerhalb der Systemgrenze. Es wird davon ausgegangen, dass die Schwarzmasse nur mechanisch aufbereitet wird (d.h. ohne thermische Vorbehandlung, um Kunststoffe, Elektrolyte etc. entfernen zu können). Der zuvor beschriebene COOL-Prozess wird in die EoL-Phase als innovatives Recyclingverfahren integriert (Route B), welches die Rückgewinnung von Lithium und Graphit ermöglicht. Die lithiumarmen Reststoffe werden hydrometallurgisch nachbehandelt, um Kobalt und Nickel zurückzugewinnen.

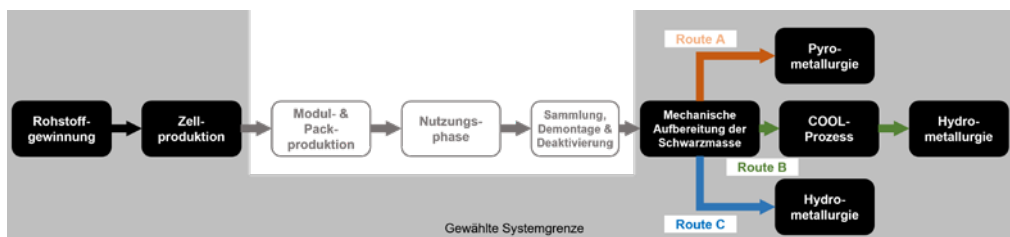


Abbildung 2: Systemgrenzen der Cradle-to-Grave LCA zum Vergleich der Umweltauswirkungen unterschiedlicher Recyclingverfahren: Route A = Pyrometallurgische Behandlung, Route B = COOL-Prozess und hydrometallurgische Nachbehandlung der lithiumarmen Reststoffe, Route C = Hydrometallurgische Behandlung

3 Ergebnisse

Aufgrund der noch laufenden Datenerhebungen im Rahmen des COOL-Prozesses liegen derzeit noch keine Primardaten bzw. validen LCA-Ergebnisse vor (Stand Dezember 2024). Erste Erkenntnisse zu den pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Recyclingverfahren sind in Abbildung 3 anhand von fünf ausgewählten Wirkungskategorien dargestellt.

Im pyrometallurgischen Verfahren wurde der Energiebedarf des Hochtemperaturofens als „Umwelthotspot“ in den Kategorien Acidification (41 %) und Climate change (58 %) identifiziert. Der Einsatz von Natriumhydroxid (NaOH) hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Kategorie Resource use (78 %) und trägt zudem mit über 20 % zu den Kategorien Acidification und Climate change bei. Eine weitere zentrale Rolle spielt die Behandlung der Nicht-Fe-Co-Fraktion, insbesondere aufgrund des hohen Energiebedarfs, was sich vor allem in der Kategorie Human toxicity, cancer mit 83 % deutlich zeigt. Im Gegensatz dazu bilden die Prozessemissionen den dominierenden Hotspot in der Kategorie Particulate Matter (Staubbelastung) mit einem Anteil von 53 %.

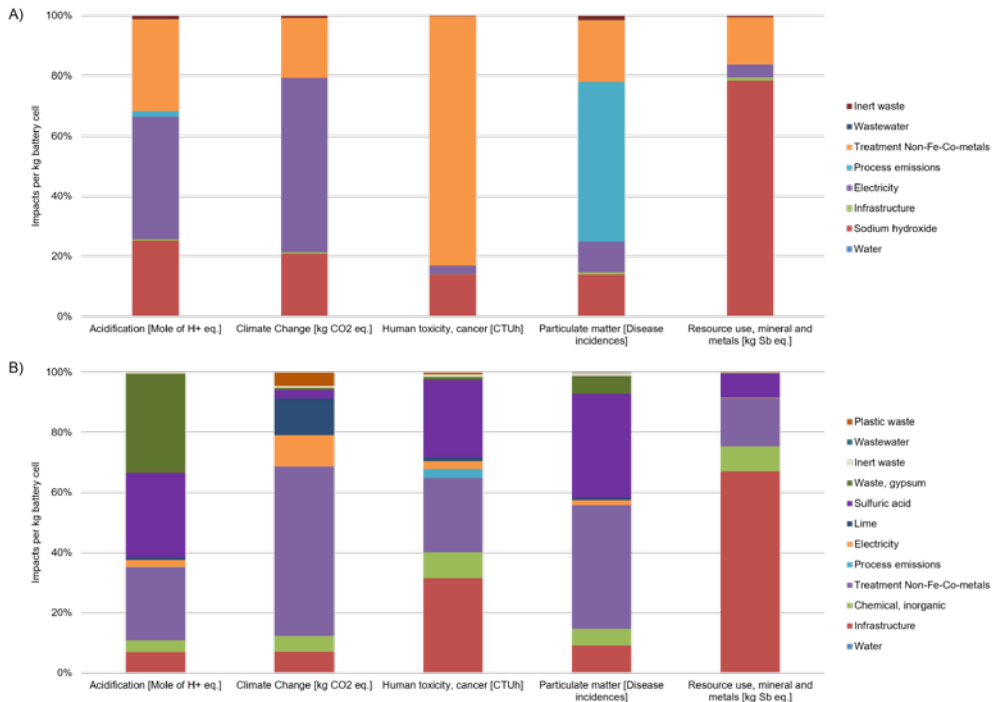


Abbildung 3: Vorläufige Ergebnisse der Cradle-to-Grave LCA. A) Umweltauswirkungen des pyrometallurgischen Verfahrens und B) des hydrometallurgischen Verfahrens (beide ohne thermische Vorbehandlung)

Im hydrometallurgischen Verfahren hat die Behandlung der Nicht-Fe-Co-Fraktion einen erheblichen Einfluss insbesondere auf die Wirkungskategorien Climate change (56 %) und Particulate matter (41 %). Der Einsatz von Schwefelsäure (H_2SO_4) trägt ebenfalls maßgeblich zu den Umweltauswirkungen bei, mit Anteilen von 35 % in der Kategorie Particulate matter, 26 % in Human toxicity, cancer und 28 % in Acidification. Die Infrastruktur ist ein zentraler Hotspot in den Kategorien Resource use (67 %) und Human toxicity, cancer (31 %). Darüber hinaus zeigt die Behandlung des entstehenden Gipsabfalls hohe Auswirkungen in der Kategorie Acidification mit einem Anteil von 33 %.

4 Ausblick

In den nächsten Schritten wird die Sachbilanz des COOL-Prozesses vervollständigt und die Wirkungsabschätzung durchgeführt, um diese anschließend mit den pyro- und hydrometallurgischen Verfahren zu vergleichen. Zudem wird die Rückgewinnung der jeweiligen Materialien berücksichtigt, indem Recyclinggutschriften für die entsprechenden Prozesse inkludiert werden. Anschließend wird auch die Zellproduktion miteinbezogen, um aufzuzeigen, in welchem Maße die jeweiligen Recyclingmethoden das Potenzial haben, die Umweltauswirkungen der Zellherstellung zu reduzieren (Gutschriften).

Danksagung

Das Projekt MoLiBity wird durch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert (FFG-Nr.: 899505).

Literatur/Quellen

- Bai, Y.; Muralidharan, N.; Sun, Y.-K.; Passerini, S.; Stanley Whittingham, M.; Belharouak, I. (2020): Energy and environmental aspects in recycling lithium-ion batteries: Concept of Battery Identity Global Passport. *Materials Today*, 41: 304-315. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matmod.2020.09.001>
- Bertau, M.; Gunther, M.; Plätzold, C. (2017). Verfahren zur Gewinnung von Lithiumcarbonat aus lithiumhaltigen Batterierückständen mittels CO₂-Behandlung (DE102016208407A1). Deutsches Patent- und Markenamt. <https://patents.google.com/patent/DE102016208407A1/de>
- Bielewski, M.; Pfrang, A.; Bobba, S.; Kronberga, A.; Georgakaki, A.; Letout, S.; Kuokkanen, A.; Mountraki, A.; Ince, E.; Shtjefni, D.; Joanny, G.; Eulaerts, O.; Grabowska, M. (2022): Clean Energy Technology Observatory: Batteries for energy storage in the European Union - 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC130724>. JRC130724.
- Bruno, M.; Fiore, S. (2023). Material Flow Analysis of Lithium-Ion Battery Recycling in Europe: Environmental and Economic Implications. *Batteries*, 9(4), 231. <https://doi.org/10.3390/batteries9040231>
- Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2006/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG, (2023). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj?eliuri=eli%3Areg%3A2023%3A1542%3Aoj&locale=de>
- Pavón, S.; Kaiser, D.; Mende, R.; Bertau, M. (2021). The COOL-Process—A Selective Approach for Recycling Lithium Batteries. *Metals*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/met11020259>

Sphera. (2024): LCA for Experts (GaBi). Retrieved 14.03.2024 from <https://sphera.com/life-cycle-assessment-lca-software/>

Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, 21(9): 1218-1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

Kontakt

Dipl.-Ing., Anna Spindlegger, wissenschaftliche Mitarbeiterin

BOKU University, Wien, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Tel.-Nr. +43 1 47654-81340

E-Mail: anna.spindlegger@boku.ac.at

Homepage: <https://boku.ac.at/wau/abf>

Untersuchung der Zigarettenkippen-Kampagne „Schnipp und weg?“ in Dresden und der Rolle gesetzlicher Maßnahmen bei der Reduktion von Zigaretten-Littering

Abstract: Im Rahmen der seit Mai 2023 durchgeführten Anti-Littering-Kampagne „Schnipp und weg?“ der Stadt Dresden, die in Kooperation mit der Technischen Universität Dresden (TUD) sowie weiteren institutionellen Partnern vorangetrieben wird, werden Maßnahmen zur Reduktion des Zigarettenstummel-Litterings im öffentlichen Raum umgesetzt. Die Kampagne kombiniert Infrastruktur- und Sensibilisierungsmaßnahmen, um das Littering von Zigarettenstummeln in Dresden zu verringern. Zur Evaluation der Maßnahmen erfolgt eine wissenschaftliche Begleitung durch Feldstudien und statistische Analysen [Landeshauptstadt Dresden, 2024].

In einer Feldstudie an der Straßenbahnhaltestelle Münchner Platz in Dresden wurden die Effekte von Plakaten, die auf die Umweltauswirkungen des Litterings hinweisen, sowie Schuhabdrücken, die Passanten zum Abfallbehälter leiten sollten, untersucht. Die Untersuchung gliederte sich in drei Phasen: Eine Erfassung des Ist-Zustandes, die Anwendung von Plakaten und die Anbringung von Schuhabdrücken. Während die Schuhabdrücke an Steig 2 eine signifikante Reduktion des Litterings bewirkten, zeigten Plakate, insbesondere aufgrund von Vandalismus, nur eine begrenzte Wirkung. Wetterbedingungen wie Temperatur und Niederschlag hatten keinen signifikanten Einfluss auf das Littering-Verhalten.

1 Einleitung

Zigarettenstummel zählen weltweit zu den häufigsten Formen von Littering und stellen aufgrund der enthaltenen Schadstoffe wie Nikotin, Schwermetalle und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) eine erhebliche Umweltbelastung dar [Vanapalli et al., 2023]. Diese Rückstände können in Böden und Gewässern toxisch wirken und tragen zugleich zur mikroplastischen Verschmutzung bei, da Zigarettenfilter überwiegend aus biologisch schwer abbaubarem Celluloseacetat bestehen [Beutel et al., 2021]. Trotz der Einführung diverser Maßnahmen zur Reduktion von Zigarettenstummel-Littering, darunter Verwarnungsgelder, verbesserte Entsorgungsinfrastrukturen oder Aufklärungskampagnen, zeigen viele Interventionen nur begrenzte Wirksamkeit, da sie selten langfristige Verhaltensänderungen bewirken [Tobler et al., 2023].

Im Mai 2023 wurde die Anti-Littering-Kampagne „Schnipp und weg?“ in Dresden initiiert, die unter anderem von der Technischen Universität Dresden (TUD) sowie vielen weiteren Institutionen begleitet wird [Landeshauptstadt Dresden, 2024]. Ziel der Kampagne ist es, durch eine Kombination aus präventiven Maßnahmen und rechtlichen Sanktionen das Littering-Verhalten in der Stadt zu reduzieren. Zu den um-

gesetzten Interventionen gehören neben der Erhöhung des Verwarnungsgeldes für Zigarettenlittering auf 55 Euro auch infrastrukturelle Anpassungen wie die vermehrte Bereitstellung von Abfallbehältern mit integrierten Aschenbechern [Bußgeldkatalog.org, 2024].

Ein zentraler Bestandteil der Kampagne ist der Einsatz verhaltenspsychologischer Anreize in Form von Sensibilisierungsmaßnahmen wie Plakaten und auf den Boden aufgebrachten Schuhabdrücken, die Passant*innen visuell zu Entsorgungsmöglichkeiten lenken sollen. Solche Nudging-Ansätze basieren auf der Annahme, dass subtile Umweltveränderungen Entscheidungsprozesse beeinflussen und Verhaltensänderungen ohne Verbote herbeiführen können [Hansen, 2016].

2 Methodik

Besonders an Haltestellen des öffentlichen Verkehrs lässt sich Zigarettenstummel-Littering häufig beobachten, da diese Orte eine hohe Passantenfrequenz mit kurzen Wartezeiten kombinieren, was zu impulsivem Wegwerfen beiträgt [Green et al., 2014, Wilson et al., 2014]. Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Feldstudie die Wirksamkeit von Aufklärungsplakaten und Schuhabdrücke an der Straßenbahnhaltestelle Münchner Platz in Dresden. Es wurde erfasst, inwieweit diese Interventionen das Zigarettenstummel-Littering reduzieren können und ob klimatische Faktoren wie Temperatur und Niederschlag das Verhalten der Passant*innen zusätzlich beeinflussen.

Der Erhebungszeitraum umfasste insgesamt drei aufeinanderfolgende Untersuchungsphasen, die jeweils über zehn Tage durchgeführt wurden. Der Ist-Zustand wurde vom 8. bis 18. Juli 2024 dokumentiert, gefolgt von der Intervention mit Plakaten zwischen dem 22. Juli und 1. August 2024. Die dritte Phase, in der Schuhabdrücke als verhaltenslenkende Maßnahme getestet wurden, erstreckte sich vom 19. bis 29. August 2024. Während jeder Phase wurden an beiden Steigen der Haltestelle alle Zigarettenstummel gezählt, um die Littering-Mengen systematisch zu erfassen. Zur Datenerhebung wurden die Zigarettenstummel an fest definierten Sammelflächen beider Steige (ca. 335,5 m² am Steig 1 und 384 m² am Steig 2) gezählt und dokumentiert. Die Zählungen erfolgten dreimal wöchentlich (Montag, Dienstag, Donnerstag) um ca. 20 Uhr, um die Vergleichbarkeit zwischen den Untersuchungsphasen sicherzustellen.

In der ersten Interventionsphase wurden für die Kampagne designte Plakate verwendet, die auf die Umweltauswirkungen von Zigarettenstummel-Littering hinweisen und an den Fahrgastunterständen sowie direkt an den Abfallbehältern angebracht wurden. In der zweiten Interventionsphase wurden Schuhabdrücke in gelber Farbe auf den Boden gesprüht, um Passant*innen visuell zum nächstgelegenen Abfallbehälter zu lenken.

Die statistische Analyse der Daten umfasste den Kruskal-Wallis-Rangsummentest zur Identifikation signifikanter Unterschiede zwischen den Erhebungsphasen sowie paarweise Wilcoxon-Rangsummentests mit Bonferroni-Korrektur zur detaillierten Differenzierung zwischen den einzelnen Maßnahmen. Darüber hinaus wurden Umweltfaktoren wie Temperatur und Niederschlag in die Auswertung einbezogen, um mögliche Korrelationen mit dem Littering-Verhalten zu prüfen.

3 Ergebnisse der Feldstudie

Die Auswertung der erhobenen Daten ergab, dass der Steig 1 (in die Stadt führend) über alle Phasen hinweg signifikant höhere Mengen an Zigarettenstummeln aufwies als Steig 2 (aus der Stadt führend), was auf das Aufkommen von wartenden Fahrgästen zurückzuführen ist. Während der Ist-Zustand an beiden Stei-

gen eine relativ konstante Anzahl gelitterter Zigarettenstummel zeigte, führte der Einsatz von Plakaten in Phase 1 lediglich zu einer moderaten Reduktion der Zigarettenstummelanzahl an Steig 1, während an Steig 2 keine Reduktion beobachtet wurde. Die begrenzte Wirksamkeit der Plakate lässt sich vor allem durch deren wiederholte Beschädigung und Entfernung erklären [Rosak, 2020].

In Phase 2 zeigte sich, dass die Schuhabdrücke an Steig 2 eine deutliche Reduktion der gelitterten Zigarettenstummel bewirkten, während an Steig 1 keine signifikante Veränderung festgestellt werden konnte. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Schuhabdrücke am Steig 2 aufgrund der kürzeren Distanz zum Abfallbehälter eine stärkere visuelle Präsenz entwickelten. Die statistischen Tests bestätigten signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsphasen ($p < 0,05$).

Zusätzlich wurden klimatische Faktoren wie Temperatur und Niederschlag auf ihren potenziellen Einfluss auf das Littering untersucht. Hierbei konnte jedoch keine signifikante Korrelation festgestellt werden, was mit den Ergebnissen früherer Studien übereinstimmt, die ebenfalls keine wetterbedingten Einflüsse auf Littering-Verhalten nachweisen konnten [Pavlovský et al., 2022].

4 Diskussion

Das Littering von Zigarettenstummeln stellt ein weitverbreitetes Umweltproblem dar, das sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Folgen nach sich zieht. Neben der Freisetzung toxischer Substanzen wie Schwermetalle, Nikotin und PAKs, die Boden und Gewässer belasten können, ist der in den Filtern enthaltene Kunststoff Celluloseacetat eine bedeutende Quelle für Mikroplastik in urbanen und aquatischen Ökosystemen [Vanapalli et al., 2023]. Gleichzeitig verursachen achtlos weggeworfene Zigarettenstummel erhebliche Reinigungskosten, die in Deutschland jährlich auf etwa 225 Millionen Euro geschätzt werden [Gellenbeck & Reuter, 2020].

Vor diesem Hintergrund zielt die Dresdner Kampagne „Schnipp und weg?“ darauf ab, durch eine Kombination aus verhaltenspsychologischen und rechtlichen Maßnahmen die Menge der weggeworfenen Zigarettenstummel im öffentlichen Raum zu reduzieren [Landeshauptstadt Dresden, 2024]. Die im Rahmen der Feldstudie analysierten Interventionen, bestehend aus Plakaten und Schuhabdrücken, verdeutlichen, dass visuelle Hinweisreize durchaus kurzfristig das Problembewusstsein stärken und in begrenztem Umfang Verhaltensänderungen bewirken können. Besonders die Schuhabdrücke zeigten an einem der beiden untersuchten Haltestellensteige eine signifikante Reduktion des Litterings.

Allerdings offenbart die Untersuchung auch die Grenzen solcher Sensibilisierungsmaßnahmen. Während Plakate zwar aufklärend wirken können, war deren Effektivität in der Feldstudie durch wiederholten Vandalismus beeinträchtigt, was die Sichtbarkeit und damit den beabsichtigten Effekt der Maßnahme stark reduzierte. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Literatur, die darauf hinweist, dass passive visuelle Reize allein häufig nicht ausreichen, um etablierte Verhaltensmuster langfristig zu verändern [Rosak, 2020; Tobler et al., 2023].

Die begrenzte Wirkung der Maßnahmen unterstreicht die Notwendigkeit eines multimodalen Ansatzes zur Littering-Prävention. Politische Maßnahmen wie Verwarnungsgelder, die in Dresden mit 55 Euro im oberen Bereich vergleichbarer Städte liegen, sowie eine stärkere Kostenbeteiligung der Tabakindustrie, beispielsweise durch eine Sonderabgabe auf Einwegkunststoffprodukte, könnten wirksame Ergänzungen darstellen [Bußgeldkatalog.org, 2024]. Dabei ist jedoch entscheidend, dass solche Sanktionen konsequent durchgesetzt werden, um abschreckend zu wirken [Gellenbeck & Reuter, 2020].

Die vorliegende Untersuchung verdeutlicht, dass weder Sensibilisierungsmaßnahmen noch gesetzliche Sanktionen isoliert betrachtet eine nachhaltige Lösung des Zigarettenstummel-Litterings darstellen.

Vielmehr scheint eine Kombination aus verhaltenspsychologischen Reizen, infrastrukturellen Anpassungen wie zusätzlichen Abfallbehältern und politischer Regulierung notwendig, um das Verhalten der Bevölkerung langfristig zu beeinflussen. Weiter Fallstudien sind nötig, um ein umfassendes und wissenschaftlich evaluiertes Bild zur Wirksamkeit von Maßnahmen gegen Zigaretten Littering zu erhalten.

Danksagung

Ich danke allen Beteiligten der Zigarettenkippen Kampagne in Dresden, insbesondere dem Gesundheitsamt und der Stadtreinigung Dresden für das starke Engagement. Besonderer Dank an Eero Kerojoki.

Literatur/Quellen

- Bußgeldkatalog.org. (2024). Müll und Abfall: Bußgelder zur Müllentsorgung. Abgerufen am 14. Juli 2024 von <https://www.bussgeldkatalog.org/umwelt-muell>
- Gellenbeck, K., & Reuter, R. (2020). Ermittlung von Mengenanteilen und Kosten für die Sammlung und Entsorgung von Einwegkunststoffprodukten im öffentlichen Raum. Verband kommunaler Unternehmen (VKU). Abgerufen am 14. Juli 2024 von https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Verbandsseite/Presse/Pressemitteilungen/2020/Studie/INFA_Studie_SUP_200818.pdf
- Green, D., Smith, A., & Roberts, J. (2014). Cigarette butt littering behavior: A comparative study in urban public spaces. *Environmental Pollution*, 195, 184–190.
- Landeshauptstadt Dresden. (2024). Zigarettenkippen. Abgerufen am 8. September 2024 von <https://sauber.dresden.de/de/zigarettenkippen.php>
- Rosak, P. (2020). The influence of visual messaging on littering behavior: A systematic review. *Journal of Public Health Research*, 29(3), 456–478.
- Tobler, C., Steiger, S., & Brugger, A. (2023). Understanding cigarette butt littering: Social norms and behavioral interventions. *Waste Management & Research*, 41(2), 123–135.
- Vanapalli, K. R., Sharma, H. B., Samal, B., & Dubey, B. K. (2023). Environmental impact of cigarette butts: An analysis of toxic leachate and microplastic generation. *Journal of Hazardous Materials*, 441, 129888.
- Wilson, J., Summers, T., & King, R. (2014). Littering hotspots and behavioral interventions: A focus on cigarette butts. *Journal of Urban Health*, 91(4), 678–690.

Kontakt

M.Sc., Freya Sternkopf, Wissenschaftliche Mitarbeiterin
TU Dresden, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft
Tel.-Nr. 0351/463441 39
E-Mail: freya.sternkopf@tu-dresden.de
Homepage: <https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/iak/>

KREGI – Ein Modell zur Bewertung von Klima- und Ressourceneffizienz in Gewerbe- und Industriegebieten durch Kommunen

Abstract: Es gilt die Umweltauswirkungen zu verringern, um den drei planetaren Krisen entgegenzuwirken. Da Industrie und Gewerbe einen hohen Anteil an den Emissionen ausmachen, kann dort eine große Einsparung erreicht werden. Nicht nur der Bau, sondern auch die Planung, wie auch der Betrieb des Industrie- oder Gewerbegebiets, sind entscheidend, um einen Einfluss auf die Umweltauswirkungen zu ermöglichen. Um eine objektive Bewertung der Umweltauswirkungen von Industrie- und Gewerbegebieten zu realisieren, wird ein Bewertungsmodell zur Klima- und Ressourceneffizienz aufgebaut. Das Bewertungsmodell soll den Kommunen als Werkzeug dienen, um Unternehmen in Bezug zu ihren Umweltauswirkungen zu bewerten. Die Bewertung über das Modell kann sowohl als Grundlage zur Auswahl anzusiedelnder Unternehmen dienen, um umweltbewusste Unternehmen zu fördern, als auch Unternehmen zur Umsetzung von Maßnahmen zur Verringerung der Umweltauswirkungen zu bewegen oder zu verpflichten.

1 Einleitung

Die größten Herausforderungen unserer Zeit sind die drei planetaren Krisen Klimawandel, Umweltverschmutzung und der Verlust der biologischen Vielfalt (United Nations Framework Convention on Climate Change 2022; UN Environment 2019). Um diesen Krisen zu begegnen, sind Klimaschutzziele sowie Ziele zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs auf europäischer und nationaler Ebene in Deutschland festgelegt worden, wie das Klimaschutzgesetz und der Entwurf einer Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) (KSG, vom 15.07.2024; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz 2024). Industrie und Gewerbe haben einen wesentlichen Anteil an klimawirksamen Emissionen, aber auch am Ressourcenverbrauch allgemein durch Gebäude- und Infrastruktur sowie durch Transporte. Die Sektoren Industrie, Verkehr und Gebäude haben einen Anteil von 60 % an den nationalen Treibhausgasemissionen (Umweltbundesamt 2024). Der Ressourcenverbrauch wird wesentlich durch die Baubranche und die produzierende Industrie bestimmt (Lutter et al. 2022). Gewerbegebiete vereinen Sektoren mit hohen Umweltauswirkungen und die Art und Weise, wie sie angelegt und betrieben werden, hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Ausrichtung unserer Wirtschaft hin zur Verringerung von Umweltauswirkungen und einer Kreislaufwirtschaft.

Frühe Planungsphasen, unter anderem für die Gebäude und Infrastruktur, sind dabei zur Verringerung von Ressourcenverbrauch und Umweltauswirkungen entscheidend (Llatas et al. 2020; Meex et al. 2018). Gegenstand der Planung umfasst dabei nicht nur die Gestaltung des Industrie- und Gewerbegebiets (IGB), sondern auch die Ansiedlung der Unternehmen innerhalb des Gebiets. Bei der Ansiedlung von Unterneh-

men können unter anderem Synergien beispielsweise in Form von industriellen Symbiosen ermöglicht werden (Chertow 2000). Für die Ausweisung neuer IGB auf kommunaler Ebene bedürfen die Kommunen eine Hilfestellung für eine klimaschonende und ressourcenschonende Planung dieser Gebiete.

Die notwendige Hilfestellung beinhaltet eine Unterstützung bei der Auswahl und Beratung für die Ansiedlung von Unternehmen. Dafür kann ein Bewertungsmodell dienen, das sowohl die Planungsphase, den Bau und den Betrieb derartiger Gebiete umfasst und mögliche Maßnahmen sowie daraus folgende Potenziale zur Klima- und Ressourcenschonung aufzeigt.

2 Methodik

2.1. Ziel des Bewertungsmodells

Um sowohl die Planung des IGB als auch die Ansiedlung der Unternehmen objektiv, unter dem Aspekt der Umweltauswirkungen, bewerten zu können und damit kommunale Entscheidungen zu unterstützen, wird im Rahmen des Projekts „Klima- und Ressourceneffizienz in Gewerbe- und Industriegebieten“ (kurz: KREGI) von insgesamt acht Projektpartnern ein solches Bewertungsmodell entwickelt. Der Fokus der Bewertung liegt auf den Umweltindikatoren nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf, Treibhauspotenzial und Rohstoffbedarf. Die Kommunen Langerwehe, Inden und Eschweiler sind in das Projekt als Partner integriert. Alle diese drei Kommunen liegen im Rheinischen Revier, das mit der Beendigung des Braunkohleabbaus zu einer Modellregion für Klimaschutz, Ressourcennutzung und Kreislaufwirtschaft werden soll. Die Gewerbegebiete dieser Kommunen befinden sich in unterschiedlichen Phasen der Gewerbegebietsentwicklung und eignen sich aufgrund dessen zur anwendungsnahen Erprobung des Bewertungsmodells. Um den Strukturwandel im Rheinischen Revier zu unterstützen und umweltverträglich gestalten zu können, ist eine objektive Bewertung der möglichen IGB sowie der dortigen Unternehmensansiedlungen von hoher Bedeutung. Das Bewertungsmodell, welches im Rahmen des Projekts KREGI ausgearbeitet wird, setzt sich die Lösung dieses Problems als Ziel und soll ebenso außerhalb des Rheinischen Reviers anwendbar sein. Es wird eine Anwendung ermöglicht, welche sowohl für Unternehmen zur Identifikation und Umsetzung von Maßnahmen zur Verringerung der Umweltauswirkungen als auch für Kommunen für die Planung eines IGB genutzt werden kann. Um die Akzeptanz in der Anwendung zu erhöhen, ist eine einfache Handhabung essenziell.

2.2 Aufbau des Bewertungsmodells

Um das Bewertungsmodell umzusetzen, wird zunächst ein methodischer Ansatz entwickelt. In einem ersten Schritt werden Kriterien abgeleitet, die in den verschiedenen Phasen beachtet werden müssen, um eine Umsetzung von Klima- und Ressourcenschonung zu ermöglichen. Für alle identifizierten Kriterien werden operative Indikatoren festgelegt, um darzustellen, wie die Kriterien messbar erreicht werden können. Anschließend werden Maßnahmen identifiziert, welche einen Einfluss auf den operativen Indikator bewirken. Diese Maßnahmen sind so konkret wie möglich definiert, wodurch wenig Interpretationsspielraum offen gelassen wird.

Um die Effektivität der Maßnahmen in Bezug zur Klima- und Ressourcenschonung zu bewerten, werden die Maßnahmen in Bezug auf ihre Umweltauswirkung bewertet. Somit haben die Maßnahmen sowohl einen Einfluss auf den operativen Indikator des Kriteriums als auch auf die Umweltindikatoren, welche zur Messung der Umweltauswirkungen herangezogen werden. Auf Basis der identifizierten Maßnahmen werden zudem Szenarien definiert und modelliert. Die Modellierung hat die Quantifizierung von den Umweltwirkungen zum Ziel in Bezug auf die drei Umweltindikatoren, den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf, das Treibhauspo-

tenzial und den Rohstoffbedarf. Verschiedene Szenarien ermöglichen es, die Spannweite der Maßnahmen abzubilden, wodurch die Unsicherheiten berücksichtigt werden können. Szenarien werden nicht nur für die einzelnen Maßnahmen ausgearbeitet, sondern auch für ein Gesamtkonzept, worin die Wechselwirkung der Maßnahmen berücksichtigt wird (Duinker und Greig 2007). Auf Basis der quantifizierten Szenarien werden die Maßnahmen klassifiziert und numerischen Klassen zugeordnet. Damit kann ein Punktesystem zur Quantifizierung abgeleitet werden, das den Kommunen ein Instrument zur Verfügung stellt, um sowohl das Gewerbegebiet als auch die anzusiedelnden Unternehmen bewerten zu können. Die Anwendung des Bewertungsmodells wird innerhalb eines Onlinetools umgesetzt, um die Anwendung und den Zugang einfach zu gestalten. Mit Hilfe des Punktesystems kann eine Kommune zum Beispiel eine Mindestpunktzahl zur Ansiedlung von Unternehmen definieren oder die Erschließung sowie die zur Verfügung gestellte Infrastruktur durch Maßnahmen steuern. Durch die Bepunktung der Maßnahmen auf Basis der zu erwartenden Einsparung an Umweltauswirkungen werden wirkungsvolle Maßnahmen hervorgehoben und damit eine Hilfestellung für die Entscheidungsfindung bereitgestellt. Insgesamt wird dadurch ein Anreiz zur Umsetzung von relevanten Maßnahmen geschaffen, durch die eine Klima- und Ressourcenschonung ermöglicht werden.

3 Erste Ergebnisse: Systematik zur Identifikation und Anwendung von Maßnahmen

Das Bewertungsmodell ist aufgeteilt in vier Bereiche, welche die Lebenszyklusphasen eines IGB als Grundlage besitzen. Die Kriterien sind geordnet in die Bereiche Planungsphase, Bauphase, Betrieb sowie Nutzungsende bzw. -änderung. Übergreifend über die Bereiche ist zudem die Moderation bzw. das Gewerbegebietsmanagement. Auf Basis einer Literaturrecherche und mit einem Austausch der drei Partnerkommunen sowie weiteren assoziierten Partnern wurden die verwendeten Kriterien, operativen Indikatoren und Maßnahmen in einem iterativen Prozess herausgearbeitet.

Die betrachteten Maßnahmen müssen eindeutig definiert und relevant für das Ziel eines klima- und ressourcenschonenden IGB sein. Um dies an einem Beispiel des Bereichs Planung darzustellen, ist es nicht ausreichend *Anreize für den ÖPNV* als Maßnahmen festzulegen, um das Kriterium *Verbesserung des ÖPNV* zu erreichen, da Anreize vielfältig sein können und sonst ein großer Interpretationsspielraum gelassen wird. Vielmehr sollten Maßnahmen wie die *Herstellung einer Schnellbusverbindung* oder eine *Erhöhung der Haltestellen im Gewerbegebiet* angestrebt werden. Dadurch sind klare Handlungsanweisungen innerhalb der Maßnahmen verbunden, deren Umsetzung geprüft werden kann. Zur Messung des Erfolgs kann beispielsweise der *Modalsplit* bzw. der *Anteil des ÖPNV an den Personenkilometern* als operativer Indikator herangezogen werden. Für die Kommune kann dadurch eine individuelle Recherche zu möglichen Maßnahmen und deren Wirkung entfallen, wenn die spätere Bepunktung des Bewertungssystems genutzt wird, welche die resultierenden Umweltauswirkungen als Basis besitzt.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die bisherige Arbeit im Projekt KREGI konnte der Grundstein für ein Bewertungssystem für klima- und ressourceneffiziente IGB gelegt werden. Durch den klaren Aufbau in Form von Lebenszyklusphasen des IGB, Kriterien, operative Indikatoren und Maßnahmen wird die Anwendung durch Kommunen unterstützt. In der weiteren Projektlaufzeit werden die Maßnahmen innerhalb von Szenarien quantifiziert und zusammengefasst. Dies bildet dann die Basis für ein Punktesystem zur Bewertung sowie ein Onlinetool zur Anwendung.

Danksagung

Das Projekt KREGI wird durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) im Rahmen der Förderrichtlinie *Stärkung der Transformationsdynamik und Aufbruch in den Revieren und an den Kohlekraftwerksstandorten (STARK)* des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland (BMWK) gefördert.

Literatur/Quellen

- KSG, vom 15.07.2024 (12.12.2019): Bundes-Klimaschutzgesetz. Fundstelle: BGBl. 2024 I Nr. 235.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2024): Entwurf einer Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS). Berlin.
- Chertow, Marian R. (2000): INDUSTRIAL SYMBIOSIS : Literature and Taxonomy. In: *Annu. Rev. Energy. Environ.* 25 (1), S. 313–337. DOI: 10.1146/annurev.energy.25.1.313.
- Duinker, Peter N.; Greig, Lorne A. (2007): Scenario analysis in environmental impact assessment: Improving explorations of the future. In: *Environmental Impact Assessment Review* 27 (3), S. 206–219. DOI: 10.1016/j.eiar.2006.11.001.
- Llatas, Carmen; Soust-Verdaguer, Bernardette; Passer, Alexander (2020): Implementing Life Cycle Sustainability Assessment during design stages in Building Information Modelling: From systematic literature review to a methodological approach. In: *Building and Environment* 182, S. 107164. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107164.
- Lutter, Stephan; Kreiml, Julia; Giljium, Stefan; Dittrich, Monika; Limberger, Sonja; Ewers, Birte et al. (2022): Die Nutzung natürlicher Ressourcen – Ressourcenbericht 2022. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_die_nutzung_natuerlicher_ressourcen_2022_0.pdf.
- Meex, Elke; Hollberg, Alexander; Knapen, Elke; Hildebrand, Linda; Verbeeck, Griet (2018): Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. In: *Building and Environment* 133, S. 228–236. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.02.016.
- Umweltbundesamt (2024): Klimaemissionen sinken 2023 um 10,1 Prozent – größter Rückgang seit 1990. UBA-Projektion: Nationales Klimaziel bis 2030 erreichbar. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimaemissionen-sinken-2023-um-101-prozent>, zuletzt geprüft am 02.10.2024.
- UN Environment (2019): Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People: Cambridge University Press.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (2022): What is the Triple Planetary Crisis? Online verfügbar unter <https://unfccc.int/news/what-is-the-triple-planetary-crisis>, zuletzt geprüft am 02.10.2024.

Kontakt

M.Eng. Benedikt Verkic, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS), RWTH Aachen University

Tel.-Nr. +49 241 80 22779

E-Mail: Benedikt.Verkic@ants.rwth-aachen.de – Homepage: <https://www.ants.rwth-aachen.de>

Vergleichsstudie zur Abfallerzeugung in deutschen Akutkrankenhäusern

Abstract: Deutsche Krankenhäuser erzeugen jährlich etwa 4,8 Millionen Mg Abfall. Allerdings liegen für das deutsche Gesundheitswesen kaum öffentlich zugängliche, genaue kreislaufwirtschaftliche Daten bis auf Krankenhausebene vor. Dies erschwert zum einen kreislaufwirtschaftliche Planungen, zum anderen ist es für einzelne Krankenhausbetreiber oder gar -standorte kaum möglich, eine kreislaufwirtschaftliche Einschätzung des eigenen Betriebs vorzunehmen. Daher ist es das Ziel der hier vorgestellten Vergleichsstudie, spezifische Abfalldaten aus deutschen Akutkrankenhäusern für das Jahr 2023 zu erheben, anonymisierte Kennwerte für ein Benchmarking bereitzustellen und damit Zusammenhänge und Korrelationen in der Abfallentstehung deutscher Krankenhäuser festzustellen. Die Erhebung im Jahr 2024 richtete sich flächendeckend an alle deutschen Akutkrankenhäuser. Erste Ergebnisse aus 98 Datensätzen zeigen, dass pro Bett jährlich durchschnittlich 982 kg restmüllähnlicher Abfall entstehen. Die Pearson-Korrelationen zeigen starke lineare Zusammenhänge zwischen Abfallmengen und der Bettenzahl ($r = 0,953$) sowie dem Gesamtumsatz ($r = 0,971$), die beide hoch signifikant ($p < 0,001$) sind.

1 Einleitung

In Deutschland fallen jährlich rund 4,8 Millionen Mg Abfall (Abfallmanager Medizin 2017) in deutschen Krankenhäusern an, davon etwa 425.400 Mg speziell dem Humangesundheitswesen zuordenbare Abfälle (Abfallgruppe 18 01) (Statistisches Bundesamt 2022).

Ein wesentlicher Grund für diese große Abfallmasse ist die zunehmende Verwendung von Einweg-Medizinprodukten (Ibbotson et al. 2013) seit den 1970er Jahren (Rizan et al. 2020), die sich während der COVID-19-Pandemie weiter beschleunigt hat (WHO 2022; Hanedar et al. 2022; Abu-Qdais et al. 2020). Problematisch ist dabei, dass Abfälle aus dem Gesundheitswesen bisher kaum recycelt (Grieger 2022), sondern hauptsächlich thermisch verwertet werden (LAGA 2021). Zur Entwicklung effektiver kreislaufwirtschaftlicher Interventionen, die bisher in Deutschland fehlen, ist ein umfassendes Wissen über die spezifischen Abfallmengen aus den Gesundheitseinrichtungen unabdingbar (Mol et al. 2022; Feld et al. 2023; Diaz et al. 2008).

Gleichzeitig steigen sowohl die Erwartungen der Beschäftigten des Gesundheitswesens als auch die der Öffentlichkeit (z. B. durch die CSRD-Berichtspflichten (Bundesministerium der Justiz 2024)), Prozesse der Gesundheitswirtschaft auch umwelt- oder klimaschonend zu gestalten. Allerdings liegen heute für das deutsche Gesundheitswesen kaum öffentlich zugängliche und belastbare Daten zur Abfallentstehung vor (Statistisches Bundesamt 2022), sodass es für einzelne Krankenhausbetreiber oder gar -standorte

praktisch nicht möglich ist, eine kreislaufwirtschaftliche Einschätzung z. B. in Form eines Benchmarkings durchzuführen. Dieser Beitrag stellt den Stand einer bundesweiten Studie zum Abfallanfall in deutschen Akutkrankenhäusern dar. Das Ziel dieser Benchmarkuntersuchung ist, deutschlandweit krankenhauses- bzw. standortspezifische Kennwerte zum Abfallanfall zu erheben und in Form eines Standortvergleichs allen teilnehmenden Häusern zur Verfügung zu stellen.

2 Methodik

Über die Landes-Krankenhausgesellschaften wurden flächendeckend alle deutschen Akutkrankenhäuser durch eine E-Mail-Aktion angesprochen und auf die Online-Befragung hingewiesen. Punktuell wurde sowohl bei den Landesgesellschaften als auch bei einzelnen teilnehmenden Krankenhäusern vorwiegend telefonisch zur Weiterleitung bzw. Teilnahme nachgefragt. Die Online-Befragung war vom 20.07.2024 bis 05.12.2024 offen. Nach der Erstellung des Fragebogens erfolgte die Datenerhebung zum Basisjahr 2023 (Betrachtungszeitraum 01.01.2023 bis 31.12.2023) mit Hilfe des (Online-)Abfragetools LimeSurvey (siehe Abbildung 1).

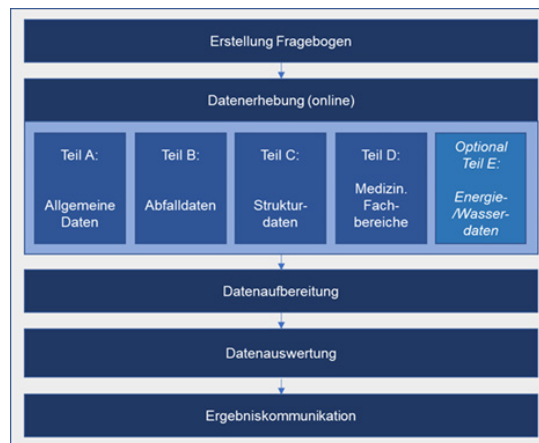


Abbildung 1: Methodisches Gesamtkonzept Vergleichsstudie

Die Online-Befragung umfasste fünf Teile (A - E): In **Teil A** werden Kontaktdaten und Kommunikationswege und -zustimmung abgefragt. In **Teil B** werden Abfallmassen (in Tonnen) je Abfallschlüsselnummer (AVV bzw. EAK) für das Kalenderjahr 2023 erfasst. Besonderer Fokus liegt hierbei auf der Abfallgruppe 18 01 sowie jeweils einer Auswahl der Abfallkategorien 15, 16 und 20. In **Teil C** werden Strukturdaten der Kliniken für das Jahr 2023 (Stichtag 31.12.2023) erhoben, u. a. Versorgungsstufe des Krankenhaus-Standortes (je nach Bundesland), Anzahl der Betten, Fallzahl (stationär/ambulant), Anzahl OPs (stationär/ambulant), Anzahl der Beschäftigten, der Ärzt/innen, der Pflegefachkräfte, der Operationstechnischen Assistent/innen (OTAs) und Anästhesietechnischen Assistent/innen (ATA) sowie die Beschäftigten-Kopfzahl und der Gesamtumsatz in €. In **Teil D** sollen Angaben zum fachlichen Leistungsumfang des Krankenhauses gemacht werden (Stichtag 31.12.2023). In **Teil E** sind optionale Angaben zur Energie- und Wassernutzung des Krankenhaus-Standortes möglich.

Nach der Datenaufbereitung und fallweiser Bestätigung durch telefonische oder Mail-Rückfragen bei den Ansprechpartnern werden spezifische, anonymisierte Kennwerte gebildet und Korrelationen bestimmt, um sowohl Ansätze für die Abfallvermeidung im Krankenhaus zu identifizieren sowie verschiedene potenzielle Key Performance Indicators (KPIs) für das krankenhauserinterne Abfallmanagement bereitzustellen.

3 Ergebnisse

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Artikels liegen 98 auswertbare Datensätze vor, die die Grundlage der hier gezeigten Ergebnisse bilden. Die Gliederung der teilnehmenden Klinikstandorte nach Größen- bzw. Leistungsparametern (Unikliniken, kleine Krankenhäuser (bis 300 Betten), mittelgroße Krankenhäuser (300 bis 600 Betten), große Krankenhäuser (ab 600 Betten) sowie Sonstige (Fach- und Rehakliniken)) zeigt Abbildung 2. Bis zum Studienende wird mit etwa 140 Datensätzen gerechnet. Die Vorabauswertung ergab, dass die Abfallarten **AS 180104** (Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden (z. B. Wund- und Gipsverbände, Wäsche, Einwegkleidung, Windeln)) mit 93 Angaben (94,9%), **AS 180103** (Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht besondere Anforderungen gestellt werden) mit 88 Angaben (89,8%), **AS 200101** (Papier und Pappe) mit 86 Angaben (87,76%), **AS 150101** (Verpackungen aus Papier und Pappe) mit 78 Angaben (79,59%) sowie **AS 180102** (Körperteile und Organe, einschließlich Blutbeutel) mit 74 Angaben (77,55%) die fünf am häufigsten angegebenen Abfallarten sind.

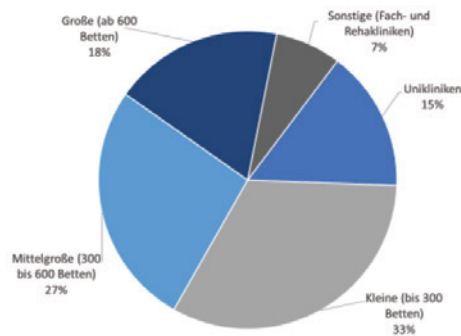


Abbildung 2: Verteilung teilnehmender Krankenhausstandorte nach Größen- bzw. Leistungsparametern

Für die Vorabauswertung wurden die Strukturdaten Bettenzahl (Ansari et al. 2019; Mol et al. 2022; Singh et al. 2022) und Gesamtumsatz [in €] herausgegriffen, um neben der grafischen Darstellung linearer Zusammenhänge (siehe Abbildung 3) auch eine Pearson-Korrelation für die restmüllähnlichen Krankenhausabfälle (Summe aus AS 180104, AS 200301 (gemischte Siedlungsabfälle) und AS 180101 (spitze und scharfe Gegenstände); in Diagramm „Restmüll“), die mit 61% den weitaus größten Teil der angegebenen Abfallgesamtmasse ausmachen, für alle Datensätze zu berechnen.

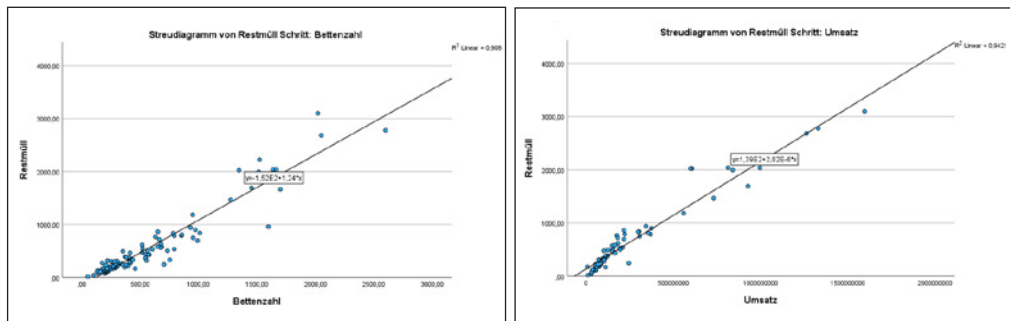


Abbildung 3: Lineare Zusammenhänge zwischen restmüllähnlichen Krankenhausabfällen und Bettenzahl (A) sowie Gesamtumsatz [in €] (B)

Aus den beiden Streudiagrammen A und B wird jeweils ein starker linearer Zusammenhang zwischen den ausgewählten Abfall- und Strukturdaten deutlich. Der R^2 -Wert der Regressionsgeraden für A liegt bei 0,908, für B bei 0,942, was jeweils auf eine starke Korrelation zwischen den Variablen hinweist. Dies konnte zusätzlich mit Hilfe der Berechnung der Pearson-Korrelation untermauert werden, deren Wert für den Zusammenhang zwischen dem restmüllähnlichen Krankenhausabfall und der Bettenzahl bei 0,953 liegt, während dieser für den Zusammenhang zwischen Abfall und Gesamtumsatz mit 0,971 berechnet wurde. Für beide Korrelationen liegt das Signifikanzniveau $<0,001$, was auf eine sehr hohe Signifikanz hindeutet.

Ausgehend davon konnte berechnet werden, dass sich die durchschnittliche Masse an restmüllähnlichen Krankenhausabfällen (AS 180104, 200301, 180101) in Deutschland pro Bett und Jahr auf 982,09 kg beläuft, während der durchschnittliche Tageswert dieser Abfälle bei 2,691 kg/Bett liegt. Auf den angegebenen Gesamtabfall bezogen liegen die Werte bei 1609 kg/Bett/Jahr und 4,41 kg/Bett/Tag. Des Weiteren wurde berechnet, dass im Jahr 2023 0,00253 kg restmüllähnlicher Krankenhausabfall je erwirtschaftetem Euro entstanden sind, während dieser Wert für den Gesamtabfall bei 0,00414 kg/€ liegt.

Literatur/Quellen

- Abfallmanager Medizin (2017): Krankenhausabfälle. In: Abfallmanager Medizin, 28.02.2017. Online verfügbar unter <https://www.abfallmanager-medizin.de/themen/krankenhausabfaelle-abfaelle-aus-der-humanmedizinischen-oder-tieraerztlichen-versorgung/>, zuletzt geprüft am 04.10.2024.
- Abu-Qdais, H. A.; Al-Ghazo, M. A.; Alghazo, E. M. (2020): Statistical analysis and characteristics of hospital medical waste under novel Coronavirus outbreak. In: Global Journal of Environmental Science and Management (GJESM) (6), S. 21–30.
- Ansari, Mohsen; Ehrampoush, Mohammad Hassan; Farzadkia, Mahdi; Ahmadi, Ehsan (2019): Dynamic assessment of economic and environmental performance index and generation, composition, environmental and human health risks of hospital solid waste in developing countries; A state of the art of review. In: Environment international 132, S. 105073. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105073.
- Bundesministerium der Justiz (2024): Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2022/2464 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2022 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 537/2014 und der Richtlinien 2004/109/EG, 2006/43/EG und 2013/34/EU hinsichtlich der Nachhaltig-

- keitsberichterstattung von Unternehmen. Online verfügbar unter https://www.bmj.de/SharedDocs/Gesetzgebungsverfahren/DE/2024_CSRD_UmsG.html?nn=110490, zuletzt geprüft am 04.10.2024.
- Diaz, L. F.; Eggerth, L. L.; Enkhtsetseg, Sh; Savage, G. M. (2008): Characteristics of healthcare wastes. In: Waste management (New York, N.Y.) 28 (7), S. 1219–1226. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.04.010.
- Feld, Marie; Riedel, Max; Schmidt, Jannick; Auer, Maximilian; Fimpeler, Stephan; Cassier-Woidasky, Anne-Kathrin; Woidasky, Jörg (2023): Kreislaufwirtschaftliche Ansätze für das Gesundheitswesen. Circular economy approaches for the health care sector. In: Müll und Abfall 55, S. 601–607.
- Grieger, Sven (2022): Recycling von Medizinprodukten - warum es sich noch mehr lohnt. Fraunhofer IWKS. Online verfügbar unter <https://www.iwks.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/pressemeldungen-2022/recycling-von-medizinprodukten.html>, zuletzt geprüft am 30.08.2024.
- Hanedar, Asude; Çifçi, Deniz İzlen; Zafer, Nur; Görgün, Erdem (2022): The impact of COVID-19 pandemic in medical waste amounts: a case study from a high-populated city of Turkey. In: Journal of material cycles and waste management 24 (5), S. 1760–1767. DOI: 10.1007/s10163-022-01428-3.
- Ibbotson, Suphunnika; Dettmer, Tina; Kara, Sami; Herrmann, Christoph (2013): Eco-efficiency of disposable and reusable surgical instruments—a scissors case. In: Int J Life Cycle Assess 18 (5), S. 1137–1148. DOI: 10.1007/s11367-013-0547-7.
- LAGA (2021): Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes. Online verfügbar unter https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/Krankenhaushygiene/Kommission/Downloads/LAGA-Rili.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 30.08.2024.
- Mol, Marcos Paulo Gomes; Zolnikov, Tara Rava; Neves, Arthur Couto; Dos Santos, Giulia Roriz; Tolentino, Júlia Luiza Lopes; Vasconcelos Barros, Raphael Tobias de; Heller, Leo (2022): Healthcare waste generation in hospitals per continent: a systematic review. In: Environmental science and pollution research international 29 (28), S. 42466–42475. DOI: 10.1007/s11356-022-19995-1.
- Rizan, Chantelle; Mortimer, Frances; Stancliffe, Rachel; Bhutta, Mahmood F. (2020): Plastics in healthcare: time for a re-evaluation. In: Journal of the Royal Society of Medicine 113 (2), S. 49–53. DOI: 10.1177/0141076819890554.
- Singh, Narendra; Ogunseitan, Oladele A.; Tang, Yuanyuan (2022): Medical waste: Current challenges and future opportunities for sustainable management. In: Critical Reviews in Environmental Science and Technology 52 (11), S. 2000–2022. DOI: 10.1080/10643389.2021.1885325.
- Statistisches Bundesamt (2022): Datenabruf: Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre (2022), Abfallarten. GENESIS Online Datenbank. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=ergebnistabelleUmfang&levelindex=2&levelid=1702652803980&downloadname=32111-0002#abreadcrumb>, zuletzt geprüft am 30.08.2024.
- WHO (2022): Global analysis of healthcare waste in the context of COVID-19. Status, impacts and recommendations. Geneva: World Health Organization. Online verfügbar unter <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1406822/retrieve>.

Kontakt

Anton Vielsack, Doktorand, wissenschaftlicher Mitarbeiter
Hochschule Pforzheim
E-Mail: anton.vielsack@hs-pforzheim.de

Einfluss unterschiedlicher Lagerungsverfahren und Prozessparameter auf das Methanbildungspotenzial und Restgasemissionen von Wirtschaftsdüngern und Gärresten

Abstract: Im Rahmen des FNR-geförderten Projekts „Gäremissionen“ wurde der Einfluss von Lagerungssystemen auf die Treibhausgasemissionen von Wirtschaftsdüngern und Gärresten untersucht. Durch Analyse der Methanbildungspotenziale (MBP) und Restmethanemissionen (RME) von Proben aus verschiedenen Tierhaltungsbetrieben sollen Optimierungsmöglichkeiten identifiziert werden. Ziel ist die Minimierung von Emissionen und Maximierung der Gaserträge durch optimierte Lagerung und Prozessführung, um eine nachhaltigere landwirtschaftliche Nutzung zu fördern. Erste Ergebnisse zeigen, dass Biogasanlagen (BGA) mit Gärrestlager niedrigere Restmethanpotenziale aufweisen als eine untersuchte einstufige BGA. Rindergülleproben weisen MBPs zwischen 13,3 und 25,6 L_N CH₄/kg FM auf; nach 60 Tagen Lagerung variieren die RME zwischen 0,49 und 5,2 L_N CH₄/kg FM.

1 Einleitung

Treibhausgasemissionen in Form von Methan (CH₄), Kohlendioxid (CO₂) und Lachgas (N₂O) entstehen in der Tierhaltung unter anderem durch die Lagerung von Wirtschaftsdüngern (Güllen und Miste) und von Gärresten aus Biogasanlagen. Diese können aus offenen Lagern oder durch Leckagen aus gasdichten Lagervorrichtungen auftreten.

Zu den Emissionen bei der Lagerung von Wirtschaftsdüngern und Gärresten wurden unterschiedliche Studien durchgeführt. So zeigen die Ergebnisse von Hilgert et al. (2023), dass das Methanbildungspotenzial (MBP) während der Lagerung von Rindergülle vom Stall bis zur Lagerung im Freien durch Veränderung der biochemischen Zusammensetzung um 20,5 % reduziert wurde. Bei Schweinemist wurde eine Abnahme von 39,5 % des Methanbildungspotenzials festgestellt. Außerdem konnte gezeigt werden, dass der Abbau von organischer Substanz in Schweinegülle schneller erfolgt als in Milchviehgülle. Durch rasche Zuführung von Gülle in Biogasanlagen können erhebliche CH₄-Emissions- und Energieverluste vermieden werden. Nach Dalby et al (2021) haben vor allem die Gülletemperatur, die Substratverfügbarkeit, das Alter der Gülle und das Managementsystem Einfluss auf die mikrobiellen Abbauprozesse und auf die entstehenden Emissionen. Im Rahmen des Biogas-Messprogramms II der FNR 2010 wurden von 61 Biogasanlagen Daten gesammelt. Unter anderem wurden Proben aus den Gärrestlagern genommen und das MBP sowie das Restgas bei 37 °C und bei 20 – 22 °C bestimmt. Die Ergebnisse der Gärtests weisen große Spannweiten auf. 65 % der untersuchten Biogasanlagen besaßen kein gasdicht abgedecktes Gärrestlager. Bei der Unterscheidung von ein- und mehrstufigen Anlagen zeigt sich, dass längere Verweilzeiten und der damit einhergehende bessere Abbau der Substrate zu einem geringeren Restmethanpotenzial führen. Baral et al. (2018) ermittelten die Treibhausgasemissionen (THG) während der Lagerung von Gülle und Gärresten und konn-

ten eine Verringerung der THG durch anaerobe Behandlung von Gülle nachweisen. Jedoch dominierten die Methan-Emissionen während der Lagerung die gesamte THG Bilanz unabhängig von der Behandlung.

An der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) wird in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT im Rahmen eines aktuell laufenden Verbundprojekts der Einfluss von unterschiedlichen Lagerungssystemen und Lagerungsbedingungen bei Wirtschaftsdüngern und Gärresten auf die Emissionen von Methan und weiteren Treibhaus-relevanten Gasen untersucht. Das Projekt endet im September 2025.

Ziel des Projekts ist die Bewertung des Einflusses einer Vergärung auf die Emission von Treibhausgasen bei Wirtschaftsdüngern und die Ermittlung der Treibhausgasemissionen bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen von Wirtschaftsdüngern und Gärresten. Von der HAWK wurden dazu auf vier Tierhaltungsbetrieben unterschiedliche Güllelager und Biogasanlagen zu verschiedenen Zeitpunkten beprobt und die Lagerungssituation vor Ort charakterisiert. An den entnommenen Proben wurden das Biogas- und Methanbildungspotential sowie die Restgasemissionen und weitere Parameter zur Charakterisierung der Proben untersucht. Anhand der Ergebnisse werden aktuell der Einfluss der Lagerungsbedingungen von Wirtschaftsdüngern und Gärresten auf die Emission klimarelevanter Gase bewertet. Außerdem wurde an wirtschaftsdüngergeführten Biogasanlagen untersucht, welchen Einfluss die Vergärung auf die Emissionen des Gesamtsystems hat. Auf Basis der Ergebnisse können die Lagerung und die Prozessabläufe innerhalb der Prozesskette optimiert, Emissionen minimiert und aufgrund der verringerten Lagerverluste von organischem Material der Gasertrag von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen optimiert werden.

2 Methodik

Mit Hilfe von Gasertrags- und Restgasertragstest wurden die MBP für Wirtschaftsdünger und die Restmethanemissionen (RBE) für Gärreste bestimmt. Um die Emissionen aus Gülle und Mist bestimmen zu können, wurden auf Grundlage der angegebenen Norm angepasste Methoden entwickelt, um darüber hinaus die Lagerung und das Emissionsverhalten der genannten Wirtschaftsdünger abzubilden. Zusätzlich wurden die Gülle- und Gärrest-Proben hinsichtlich ihrer Eigenschaften für die Lagerung und die Vergärung in einer Biogasanlage charakterisiert und auf relevante Parameter wie pH-Wert, Trockensubstanz (TS), organische Trockensubstanz (oTS) und Ammonium-Stickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) untersucht. Die Ergebnisse werden in Kapitel 3 dargestellt und erläutert.

2.1 Methanbildungs- und Restgasertragstest

Die Bestimmung des Methanbildungspotenzials erfolgte anhand von Batchversuchen in Dreifachwiederholung gemäß VDI-Richtlinie 4630 bei 37 °C in 30 L PET-Fässer mit einem Nutzvolumen von 20 L. Für den Ansatz der Batchversuche wurden die PET-Fässer mit einem Inokulum und der entsprechenden Menge Substrat befüllt. Als Inokulum wurde die flüssige Fraktion eines separierten Gärrests aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage verwendet und mit Wasser auf einen TS von ca. 4 % verdünnt. Das gebildete Biogas wurde in Foliensäcken aufgefangen und das Volumen arbeitstäglich mit Hilfe eines Trommelgaszählers (Fa. Ritter) gemessen. Zur Bestimmung der Biogasqualität wurden die Parameter Methan (CH_4), Kohlendioxid (CO_2), Wasserstoff (H_2), Sauerstoff (O_2) und Schwefelwasserstoff (H_2S) mit einem Gasmessgerät (visit 03, Messtechnik Eheim GmbH) bestimmt. Zur Umrechnung des Biogases auf Normbedingungen (1013 mbar, 273 K) wurden bei jeder Messung die Temperatur des Biogases und der Luftdruck erfasst.

Die Restbiogas- und Restmethanemissionen (Emissionsparameter) wurden in Anlehnung an die VDI Richt-

linie 4630 für die Substrate Wirtschaftsdünger und Gärreste ebenfalls in Dreifachbestimmung ermittelt. Um die Emissionen aus Gülle und Mist mit den Emissionen aus den Gärresten vergleichen zu können, wurden alle Proben in 15 L-Kanistern (Flüssigproben) oder gasdichten Eimern (feste Proben) über 60 Tage in einer Klimakammer bei 20 °C gelagert.

2.2 Begleitanalytik

Die Trockensubstanz der Proben wurde durch Trocknen bei einer Temperatur von 105 °C und Wägung der Gewichts Differenz zwischen frischer und getrockneter Probe bestimmt. Die Bestimmung wurde auf Basis der Norm DIN 11465 durchgeführt. Der Gehalt an organischer Substanz der Proben wurde durch Glühen bei 550 °C bestimmt. Die Analyse erfolgte nach DIN EN ISO 18122 als 2-fach Bestimmung. Der Ammonium-Stickstoff (NH₄-N) wurde über Wasserdampfdestillation und anschließende Titration mit dem VAPODEST 500C der Firma Gerhardt bestimmt. Der pH-Wert wurde mit einer Glaselektrode direkt in den Proben bestimmt.

3 Ergebnisse

Die im Projekt gemessenen Restmethanemissionen der Gärreste (n=8) liegen bei den drei zweistufigen Biogasanlagen zwischen 0,1 und 0,9 L_N CH₄/kg FM und bei einer einstufigen Biogasanlage zwischen 2,8 und 4,1 L_N CH₄/kg FM. Es wurden 14 Rindergülleproben untersucht, wobei die frischen Güllen (n=7) aus dem Stall Methanbildungspotenziale zwischen 13,3 und 25,6 L_N CH₄/kg FM aufwiesen. Die MBPs von Rindergüllen aus Vorgruben (n=7) lagen zwischen 5,8 und 25,1 L_N CH₄/kg und im Mittel niedriger als die MBPs von frischer Gülle. Die Restmethanemissionen (RME) der Rindergüllen nach 60 Tagen lagen zwischen 0,49 und 5,2 L_N CH₄/kg FM und im Mittel höher als die RME der Gärreste aus den zweistufigen Biogasanlagen. Auf einem landwirtschaftlichen Betrieb wurde Rindermist frisch aus dem Stall und mit einer Lagerungsdauer von 10 und 21 Tagen untersucht. Die Methanbildungspotenziale lagen bei 62,8 L_N CH₄/kg FM (frisch), 24,0 L_N CH₄/kg FM (10 Tage) und 21,7 L_N CH₄/kg FM (21 Tage). In diesem Fall konnte eine deutliche Abnahme des MBP durch Lagerung beobachtet werden.

Anhand der Begleitanalytik wurden alle Wirtschaftsdünger- und Gärrestproben charakterisiert. In Tabelle 1 sind die Mittelwerte für die Parameter pH-Wert, Ammonium-Stickstoff (NH₄-N), Trockensubstanz (TS9 und organische Trockensubstanz (oTS) dargestellt.

Tabelle 1: Mittel TS-, oTS-, pH- und NH₄-N Werte der untersuchten Gülle- und Gärrestproben

Die TS- und oTS- Werte von Schweinegülle liegen im Mittel niedriger als die von Rindergülle und weisen						
Parameter	Einheit	Rindergülle	Schweinegülle	Rindermist	Mist gem.	Gärrest
TS	[% FS]	8,5	4,8	24,0	38,8	6,5
oTS	[%TS]	74,2	71,7	82,2	77,1	68,6
NH ₄ -N	[g/kg FS]	1,1	2,5	0,9	4,4/21,0	2,1
pH	[-]	7,4	7,9	7,8	7,7	7,7

mit 7,9 einen höheren pH-Wert auf. Die gemischten Miste (1x Rinder-/Pferdemist, 1x Rinder-/Schweinemist) zeigen im Mittel die höchsten TS-Gehalte und beim Pferde-/Rindermist auch den höchsten Gehalt an Ammonium-Stickstoff mit 21,0 g/kg FS. Die mittlere organische Trockensubstanz der Gärreste liegt mit 68,6 % TS am niedrigsten.

Anhand der gemessenen Daten wurde der Ausgärungsgrad der untersuchten Rindergüllen nach der anaeroben Vergärung rechnerisch ermittelt. Der Ausgärungsgrad der Proben aus zweistufigen Biogasanlagen (n=10) lag zwischen 91,1 % und 99,7 % und aus einstufigen Biogasanlagen (n=4) mit Werten zwischen 63,0 % und 81,1 % entsprechend niedriger.

4 Diskussion und Ausblick

Die im Projekt ermittelten MBPs von Güllen, Miste und Gärresten liegen in Bereichen, die auch in der Literatur angegeben werden. Nach KTBL 2009 liegen die mittleren Werte von Rindergülle bei 16,7 L_N CH₄/kg, Schweinegülle bei 12,1 L_N CH₄/kg und Rindermist bei 52,6 L_N CH₄/kg. Abweichend von Literaturwerten (KTBL, 2014) liegt der gemessene Wert an Ammonium-Stickstoff in der Pferdemistprobe (siehe Mist gem., Tabelle 1) deutlich höher. Aufgrund der hohen Heterogenität bei Mist kann der Anteil an Kot/Urin (hoher Stickstoffgehalt) zu Stroh (geringer Stickstoffgehalt) auch bei randomisierter Probenahme stark schwanken.

Bei den dargestellten Ergebnissen handelt es sich um vorläufige Ergebnisse aus einem laufenden Projekt. Im weiteren Verlauf wird aus den ermittelten Daten der Einfluss der Vergärung auf die Methan-Emission bei Wirtschaftsdüngern anhand mathematischer Berechnungsmodelle ermittelt sowie die Bewertung des Einflusses der Vergärung in einer Biogasanlage auf die Methan-Emission bei Wirtschaftsdüngern analysiert.

Außerdem sollen Kennzahlen wie der Ausgärungsgrad, der potenzielle Gasverlust sowie der Ausnutzungsgrad der zugeführten Organik anhand angepasster Berechnungsmodelle ermittelt werden. Dabei ist eine Säurekorrektur der Ergebnisse in Bezug auf die eingesetzte Organik notwendig. Um die Minderung an Emissionen sowie den Abbaugrad der durch Gülle und Mist zugeführten Organik im daraus entstehenden Gärrest exakt ermitteln zu können, müssen Faktoren wie der Fugatfaktor der einzelnen Substrate sowie ihr Anteil an der Gesamtfütterungsmenge berücksichtigt werden.

Danksagung

Das Projekt *Gäremission* wurde durch das Programm „Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen“ durch das BMEL gefördert.

Literatur/Quellen

- Baral, Khagendra R.; Guillaume Jégo, Barbara Amon, Roland Bol, Martin H. Chantigny, Jørgen E. Olesen, Søren O. Petersen (2018): Greenhouse gas emissions during storage of manure and digestates: Key role of methane for prediction and mitigation, *Agricultural Systems*, Vol. 166, 26-35, ISSN 0308-521X, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.07.009>.
- Dalby, Frederik R; Sasha D. Hafner, Søren O. Petersen, Andrew C. VanderZaag, Jemaneh Habtewold, Kari Dunfield, Martin H. Chantigny, Sven G. Sommer (2021): Understanding methane emission from stored animal manure: A review to guide model development. *Journal of Environmental Quality*, Vol.50, 817-

835, <https://doi.org/10.1002/jeq2.20252>

FNR 2010: Biogas Messprogramm II: 61 Biogasanlagen im Vergleich. Abschlussbericht erstellt durch das Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI) Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik. Im Rahmen des FNR Projektes „Bundesmessprogramm zur Bewertung neuartiger Biomasse-Biogasanlagen“ (FKZ 22003405) 1. Auflage 2009, aktualisiert 2010

Hilgert, Julio E; Christiane Herrmann, Søren O. Petersen, Federico Dragoni, Thomas Amon, Vitaly Belik, Christian Ammon, Barbara Amon (2023): Assessment of the biochemical methane potential of in-house and outdoor stored pig and dairy cow manure by evaluating chemical composition and storage conditions, Waste Management, Vol. 168, 14-24, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.031>.

KTBL(Hrsg) 2009: Faustzahlen Biogas, Gasausbeute aus Substraten, 2.Auflage. ISBN 9783941583283

KTBL (Hrsg) Horlacher, D; Karl Rutzmoser, Ute Schultheiß (2014): Festmist- und Jaucheanfall, KTBL-Schrift 502. ISBN 9783941583689

Kontakt

M. Eng. Meike Walz, wissenschaftliche Mitarbeiterin

HAWK Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement

Tel.-Nr. 0551-50 32-270

E-Mail: meike.walz@hawk.de

Homepage: <https://neutec.hawk.de/de>

Zirkuläre Produktion von biologisch abbaubaren Hanffaserverbundbauteilen (FALCON)

Abstract: Im Projekt FALCON soll durch die Entwicklung eines kreislauffähigen und biologisch abbaubaren Bauteils für die Flugzeuginnenausstattung ein Beitrag zu umweltfreundlicher Mobilität geleistet werden. Das Bauteil wird aus einem Hanffaserverbund mit PLA als Matrixmaterial bestehen. Die Kreislauffähigkeit des Bauteils als Ganzes bzw. der einzelnen Bestandteile soll bereits in der Planungs- und Herstellungsphase mitgedacht werden, um Stoffkreisläufe im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft vollständig zu schließen und damit einen Beitrag zur Ressourcenschonung zu leisten. Um die Nachhaltigkeit des Bauteils zu überprüfen, wird begleitend zur gesamten Prozesskette eine umfassende Evaluierung von ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen stattfinden. Außerdem wird die tatsächliche Kreislauffähigkeit des Bauteils bzw. der verwendeten Rohstoffe bewertet.

1 Einleitung

Um dem Ziel eines emissionsärmeren Betriebs von Fahrzeugen gerecht zu werden, werden im Fahrzeugbau häufig Verbundwerkstoffe (Composites) eingesetzt. Sie zeichnen sich durch ein geringes Gewicht bei hoher Stabilität aus, was zu Kraftstoffeinsparungen im Betrieb der Fahrzeuge führt. Aktuell werden vermehrt Naturfaserverstärkte Composites (NFCs) eingesetzt, bei denen die Stabilität des Bauteils durch biogene Fasern statt durch petrochemische Werkstoffe erreicht wird (FNR, 2019). Die Relevanz von NFCs wird voraussichtlich weiterhin stark zunehmen (Intelligence, 2024).

Im Projekt FALCON soll die Entwicklung eines kreislauffähigen und biologisch abbaubaren Hanffaserverbundwerkstoffes für die Flugzeuginnenausstattung in Fokus stehen.

Hanf wurde aus mehreren Gründen gewählt. Einerseits verfügt er bei niedrigem Gewicht über geeignete mechanische Eigenschaften, die bis auf die Zugfestigkeit denen von Glasfasern sehr ähnlich sind (Liu et al., 2017). Andererseits wird Hanf regional und schonend angebaut. Er speichert beim Anbau CO₂, weist einen niedrigen Wasserbedarf auf und außerdem sind keine Pestizide oder sonstige Pflanzenschutzmittel erforderlich. Dadurch ist der Anbau nicht nur klimafreundlich, sondern auch förderlich für die Biodiversität. Weiterhin werden für die NFCs die bislang kaum genutzten Hanfstängel verwendet. Durch die Mehrfachnutzung der verschiedenen Pflanzenteile werden Ressourcen geschont (Amaducci & Gusovius, 2010; FNR, 2019; Liu et al., 2017).

Neben den Hanffasern ist in der Herstellung von Composites ein Matrixmaterial nötig. Üblicherweise werden für NFCs Epoxidharze verwendet. Diese sind jedoch nicht abbau- oder recycelbar. PLA könnte aufgrund seiner Festigkeit eine sinnvolle und nachhaltige Alternative zu den Epoxidharzen darstellen (Pickering et al., 2016; Trivedi et al., 2023). Kombinationen aus Naturfasern und biologisch abbaubaren Kunststoffen sind aktuell Stand der Forschung und nur in Einzelfällen am Markt verfügbar. Die im Projekt FALCON angestrebte Kombination aus Hanffasern und PLA ist aktuell nicht auf dem Markt verfügbar.

Zusätzlich zur Herstellung des Bauteiles besteht ein weiteres Hauptziel von FALCON in der Schließung von Stoffkreisläufen. Dafür wird die Kreislauffähigkeit des Bauteils bzw. der verwendeten Rohstoffe bereits in der Planungs- und Designphase berücksichtigt. Es soll erarbeitet werden, wie sich die Einzelkomponenten nach Ende des Lebenszykluses des Bauteiles wiedergewinnen lassen, um die Stoffkreisläufe vollständig zu schließen. In Abbildung 1 sind die geplanten Stoffkreisläufe dargestellt. Um die Kreisläufe zu schließen, wurde sich an den 10 Rs der Kreislaufwirtschaft orientiert. In diesem Projekt sind primär „Repair“, „Remanufacture“, „Recycling“ und „Recover“ relevant. Aufbauend auf das Projekt könnte zukünftig die Gewinnung von PLA aus Bioabfällen weiter erforscht werden (Schneider, 2016).

Im Rahmen des Projektes soll außerdem erforscht werden, welche ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen das NFC-Bauteil aufweist.

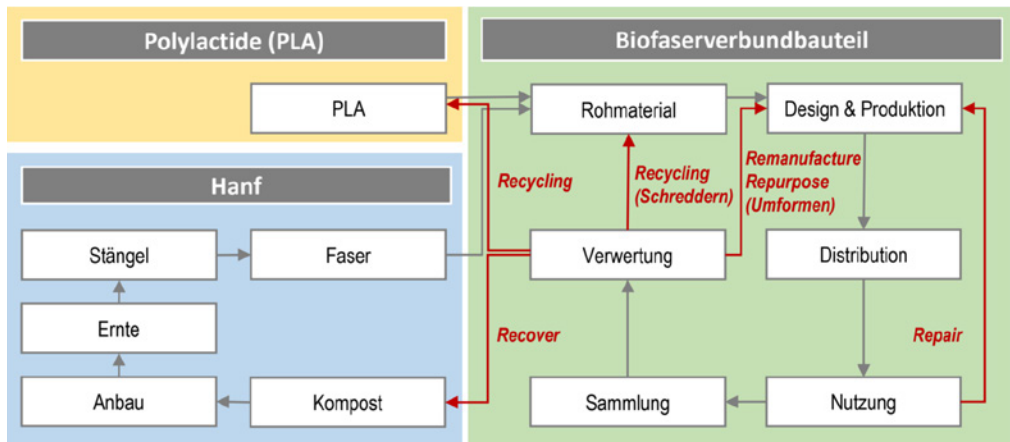


Abbildung 1: Stoffkreisläufe im Projekt FALCON; Grafik: J. Berndorfer

2 Methodik

Das Bauteil wird von Projektpartnern aus der Wirtschaft und Industrie geplant und hergestellt. Am Arbeitsbereich Umwelttechnik der Universität Innsbruck wird vor allem den Fragen nachgegangen, wie sich nach Lebensende durch Recyclingverfahren Sekundärrohstoffe aus dem Bauteil wiedergewinnen lassen, ob eine biologische Abbaubarkeit gegeben ist, welche ökologischen und sozialen Auswirkung das Bioverbundbauteil hat und wie die Kreislauffähigkeit des Bauteils zu bewerten ist.

2.1 Rückgewinnung und Aufarbeitung PLA & biologische Abbaubarkeit

In einer Untersuchungsreihe soll die Rückgewinnung von PLA durch Aufschluss erfolgen. Dabei soll das PLA von den Hanffasern mithilfe eines geeigneten Lösungsmittels gelöst werden. Das PLA soll sich selektiv auflösen, während die Hanffasern weitgehend unbeeinflusst bleiben. Danach wird das PLA extrahiert und gereinigt. Das zugegebene Lösemittel soll im Idealfall rückgewonnen und im Kreislauf geführt werden.

Um die biologische Abbaubarkeit der Verbundbauteile beurteilen zu können, werden verschiedene aerobe und anaerobe Abbauprobversuche, wie z.B. Erdeingrabetests, Atmungsaktivitätstest (AT4) und ein Test auf das Methanpotenzial (GB21) durchgeführt.

Auch Wässerungstests, um eventuelle Festigkeitsverluste zu überprüfen, und Kresstests, um die ökotoxikologische Unbedenklichkeit des entstehenden Komposts nachzuweisen, sind vorgesehen.

2.2. Ökologische Evaluierung

Für die ökologische Evaluierung wird eine umfassende ökobilanzielle Betrachtung des Bauteils, der verwendeten Rohstoffe und aller Prozessschritte in der Herstellung des Bauteils erfolgen. Auch die Verwertung der Produkte nach Nutzungsdauer wird bilanziert. Die Daten für Hanfanbau und -ernte sowie für die Bauteilherstellung werden über die Projektpartner direkt erhoben. Das PLA für das Projekt wird zugekauft, daher werden hierfür Werte und Daten aus vorherigen Projekten und Literaturrecherchen für die ökobilanzielle Betrachtung verwendet. Die potenziellen Umweltauswirkungen werden anhand ausgewählter Wirkungskategorien berechnet und vergleichend bewertet. Besonders im Fokus stehen dabei die Treibhausgasemissionen in Form von CO₂-Äquivalenten.

Zusätzlich wird eine soziale Lebenszyklusanalyse des Bauteils mittels Leitfadeninterviews durchgeführt.

2.3 Bewertung der Kreislauffähigkeit

Die Bewertung der Kreislauffähigkeit erfolgt auf Basis der durchgeführten Untersuchungen zur biologischen Abbaubarkeit und der Rückgewinnung von PLA aus den Verbundbauteilen. Die Versuchsergebnisse der durchgeführten Untersuchungen geben die Rahmenbedingungen für ein passendes und praxistaugliches Sammelsystem vor, um dann die Stoffkreisläufe endgültig zu schließen.

Außerdem werden nachhaltige Geschäftsmodelle wie z.B. Produkt-Service-Systeme oder Zirkularitätsstrategien (z.B. Wiederverwendung, Reparatur, Aufbereitung) nach vorab definierten Zirkularitätsindikatoren (z.B. Produktlebensdauer, Ressourceneffizienz, Tack-Back-Prozess) bewertet.

Danksagung

Das Projekt FALCON wird durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert.

Literatur/Quellen

- Amaducci, S., & Gusovius, H.-J. (2010). Hemp – Cultivation, Extraction and Processing. In *Industrial Applications of Natural Fibres* (pp. 109-134). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9780470660324.ch5>
- FNR. (2019). BIOVERBUNDWERKSTOFFE Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) und Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC). In B. f. E. u. L. Deutschland (Ed.).
- Intelligence, M. (2024). *Verbundwerkstoff Marktgröße*. @MordorIntel. <https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/composite-material-market>

- Liu, M., Thygesen, A., Summerscales, J., & Meyer, A. S. (2017). Targeted pre-treatment of hemp bast fibres for optimal performance in biocomposite materials: A review. *Industrial Crops and Products*, 108, 660-683. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.027>
- Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98-112. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- Schneider, I. (2016). *Optimierte Behandlung und Verwertung von biogenen Reststoffen* Universität Innsbruck].
- Trivedi, A. K., Gupta, M. K., & Singh, H. (2023). PLA based biocomposites for sustainable products: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6(4), 382-395. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.02.002>

Kontakt

Teresa Weber, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Universität Innsbruck / Institut für Infrastruktur – Arbeitsbereich für Umwelttechnik

Tel.-Nr. +43 512 507 62170

E-Mail: teresa.weber@uibk.ac.at

Homepage: <https://www.uibk.ac.at/de/umwelttechnik/>

Alpine Solutions for the Transition of the textile and plastic Equipment industry and the harmonization of interregional 5R strategies (ASTER)

Abstract: Der Alpenraum ist eine bedeutende Region für die Textil- und Kunststoffindustrie, da hier zahlreiche Hersteller von Sport- und Outdoorbekleidung sowie -ausrüstung ansässig sind, die eine zentrale Rolle für die lokale Wirtschaft spielen. Weltweit trägt die Textilindustrie etwa 10 % und die Kunststoffindustrie rund 3 % zu den Treibhausgasemissionen bei, was deutlichen Handlungsbedarf auf dem Weg zur Klimaneutralität dieser Branchen aufzeigt. Ein entscheidender Ansatzpunkt zur Emissionsreduktion ist ein verbessertes Abfallmanagement sowie die Vermeidung von Abfällen. Das Projekt ASTER hat das Ziel, das Management und die Vermeidung von Textil- und Kunststoffabfällen im Alpenraum zu optimieren. Hierbei sollen Strategien zur Harmonisierung der politischen Rahmenbedingungen entwickelt und das 5R-Potenzial (refuse, reduce, reuse, repair, recycle) für diese Materialien identifiziert werden. Mit einem besonderen Fokus auf Produkte der Sport- und Outdoorindustrie erarbeitet das Projekt konkrete Lösungsansätze, die die Umsetzung eines verbesserten Abfallmanagements unterstützen und die Abfallvermeidung fördern. Zu den Maßnahmen gehören die Erstellung geografischer Darstellungen der relevanten Prozesse und Akteure, die Entwicklung von Leitfäden, die Organisation von Veranstaltungen sowie die Bereitstellung von Schulungsmaterialien.

1 Einleitung

Der Alpenraum, in dem zahlreiche, für die lokale Wirtschaft relevante Hersteller von Sport- und Outdoorbekleidung und -ausrüstung angesiedelt sind, ist eine wichtige Region für die Textil- und Kunststoffindustrie. Global gesehen trägt die Textilindustrie mit rund 10 % (BMK 2025) und die Kunststoffindustrie mit etwa 3 % (Richtie 2023) erheblich zu den Treibhausgasemissionen bei. Um die Klimaneutralität beider Industriezweige zu erreichen, besteht ein erheblicher Verbesserungsbedarf.

Abfallmanagement und Abfallvermeidung sind wichtige Hebel zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Das Projekt ASTER zielt darauf ab, die Vermeidung und das Management von Textil- und Kunststoffabfällen im Alpenraum zu optimieren. Es sollen zum einen Strategien und Wege zur Harmonisierung der politischen Rahmenbedingungen in der Region aufgezeigt werden und zum anderen soll das 5R-Potential (refuse, reduce, reuse, repair, recycle) dieser Materialien identifiziert werden. Mit dem Fokus auf Produkte der Sport- und Outdoorindustrie werden im Projekt ASTER Lösungsansätze entwickelt, die die Umsetzung eines verbesserten Abfallmanagements unterstützen und die Abfallvermeidung optimieren sollen. Dazu

werden geografische Darstellungen der relevanten Prozesse und Akteure sowie Leitfäden entwickelt, Veranstaltungen durchgeführt und Schulungsmaterialien erstellt.

2 Projektpartner und -struktur

Das Projekt ASTER läuft über 36 Monate (September 2024 bis August 2027) und besteht aus einem Projektkonsortium von 11 Partnern aus 5 unterschiedlichen Ländern (Tab. 1). Dieses Projekt wird von der Europäischen Union über das INTERREG Alpine Space Programm 2021-2027 co-finanziert.

Tabelle 1: Projektpartner im Projekt ASTER

Name des Projektpartners	Land
Auvergne-Rhone-Alps Region (Lead partner)	Frankreich
Auvergne-Rhône-Alpes Association	Frankreich
Standortagentur Tirol	Österreich
POLYMERIS	Frankreich
Città Studi S.p.A.	Italien
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg	Deutschland
Cluster Montagne	Frankreich
Genoa Chamber of Commerce and Industry	Italien
Financial Agency of Liguria Region (FILSE)	Italien
Chamber of Commerce and Industry of Slovenia	Slowenien
Universität Innsbruck	Österreich

3 Arbeitspakete

Das Projekt umfasst drei Arbeitspakete, die zeitlich parallel bearbeitet und im nachfolgenden Text kurz vorgestellt werden.

3.1 Arbeitspaket 1 – Charakterisierung von Abfallvermeidung und -management

Durch die Kombination von statistischen Daten und Expertenwissen werden in diesem Arbeitspaket Karten zur Visualisierung von abfallwirtschaftlichen Daten entwickelt. Bislang fehlt es zudem an einem umfassenden Überblick über Regelungen und Rahmenbedingungen für die Abfallwirtschaft im gesamten Alpenraum. Eine Zusammenfassung der politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen bietet einen Überblick über unterschiedliche Politiken zur Abfallwirtschaft auf nationaler Ebene sowie für den gesamten Alpenraum (Interreg Alpine Space (2024)).

Des Weiteren wird das alpine Abfallaufkommen aus der Outdoor- und Sportindustrie analysiert und soweit möglich quantifiziert. Anschließend werden Lösungsansätze zur Reduktion dieser Abfälle erarbeitet. Da Daten zum Abfallaufkommen dieser spezifischen Abfälle (u.a. Sortieranalysen, Mengen) nicht verfügbar sind, wird der Ansatz verfolgt, die verkauften Produkte der Outdoor- und Sportindustrie zu analysieren, die

dann am Ende ihres Lebenszyklus als Abfall anfallen. Dazu werden Produkte, vor allem die relevanteste Kategorie der Bekleidung (Abb. 1) der Outdoor- und Sportindustrie, identifiziert. Anschließend erfolgt eine Kategorisierung dieser Produkte nach Art und Abfallmanagement (u.a. Status quo der Sammlung und Erfassung) sowie einer Einordnung der Produkte nach dem 5R-Prinzip einschließlich einer Abschätzung des Potenzials zur Trennung in einzelne Textil-/Kunststoffkomponenten. Im Zuge dessen werden auch verfügbare Recyclingtechnologien recherchiert, die u.a. eine Trennung in einzelne Textil- und Kunststoffkomponenten ermöglichen. So soll ein umfassendes Bild entstehen, für welche Produkte welche Potenziale nach dem 5R-Prinzip bestehen bzw. welche Hemmnisse existieren, die z.B. ein Recycling verhindern (z.B. Schadstoffbelastung, nicht vorhandener Markt für Sekundärrohstoffe).

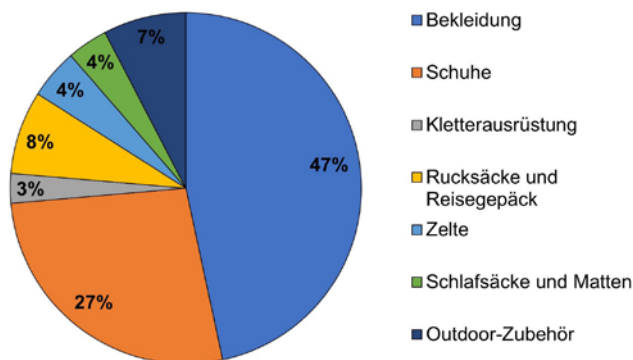


Abbildung 1: Anteile verschiedener Produktkategorien an dem gesamten Verkaufsvolumen von rund 6 Mrd. Euro an Outdoorprodukten im Jahr 2022 in Europa (eigene Darstellung, Daten: EOG (2023))

3.2 Arbeitspaket 2 – Wege zur besseren Abfallvermeidung und -bewirtschaftung im alpinen Raum

Im Arbeitspaket 2 sollen Prototypen für kreislauffähige Outdoorprodukte entwickelt und neue Geschäftsmodelle für Repair und/oder Reuse, Mietmodelle sowie Rückgabesysteme am Markt getestet werden. Zu dem wissenschaftlich begleiteten Entwicklungsprozess werden Hersteller von Outdoorprodukten zur Beteiligung eingeladen werden. Die Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen und Prototypen soll dabei parallel unter Einbindung von Herstellern in Frankreich, Italien, Slowenien und Österreich stattfinden (Interreg Alpine Space (2024)).

3.3 Arbeitspaket 3 – Transfer der Projektergebnisse an Stakeholder

Mit dem Arbeitspaket 3 sollen die Projektergebnisse und die gewonnenen Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen 1 und 2 mit den relevanten Stakeholdern geteilt werden. Hierbei soll insbesondere eine Kurzfassung der Projektergebnisse für politische Entscheidungsträger entstehen, die Empfehlungen für die Harmonisierung und die Wirksamkeit der politischen Rahmenbedingungen in Bezug auf die Abfallvermeidung und das Abfallmanagement im Outdoorbereich in der Alpenregion enthält. Des Weiteren werden, basierend auf den Ergebnissen von Arbeitspaketen 1 und 2, Schulungsmaterialien entstehen. Diese Materialien sollen sowohl Studierende als auch Fachleute und Unternehmen erreichen, um die Integration von Eco-Design bei der Entwicklung von Produkten für Outdoor-Anwendungen sicherzustellen (Interreg Alpine Space (2024)).

4 Ausblick

Die Menge der produzierten und weggeworfenen Kleidungsstücke und die damit verbundenen Umweltauswirkungen (Treibhausgasemissionen, Wasserverbrauch, etc.) haben stark zugenommen. Bisher werden nur 1 % der gebrauchten Bekleidung zu neuen Textilien recycelt. Im Rahmen des Projekts ASTER wird eine Methodik zur Analyse relevanter Abfälle aus dem Sport- und Outdoorbereich im Alpenraum entwickelt und angewendet. Die Ergebnisse sollen ein fundiertes Verständnis über die derzeitige Abfallbewirtschaftung und das Optimierungspotenzial im Hinblick auf den 5R-Ansatz vermitteln.

Danksagung

Dieses Projekt wird von der Europäischen Union über das INTERREG Alpine Space Programm 2021-2027 co-finanziert.

Literatur/Quellen

BMK (2025): Textilien: von der Linearwirtschaft in die Kreislaufwirtschaft, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, online verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/chemiepolitik/gruene_chemie/textilien.html, letzter Zugriff 13.01.2025
EOG (2023): New trade data released by the European Outdoor Group reveals growth in 2022, European Outdoor Group (EOG), online verfügbar unter: <https://www.europeanoutdoorgroup.com/articles/new-trade-data-released-by-the-european-outdoor-group-reveals-growth-in-2022>, letzter Zugriff 13.01.2025
Interreg Alpine Space (2024): ASTER - Alpine Solutions for the Transition of the textile and plastic Equipment industry and the harmonization of interregional 5R strategies, online verfügbar unter <https://www.alpine-space.eu/project/aster/>, letzter Zugriff 13.01.2025
Richtie, Hannah (2023): How much of global greenhouse gas emissions come from plastics?" online verfügbar unter <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-plastic>, letzter Zugriff 13.01.2025

Kontakt

Dr. Marco Wehner, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Umwelttechnik

Tel.-Nr. +43 512 507 62125

E-Mail: marco.wehner@uibk.ac.at

Homepage: www.uibk.ac.at/umwelttechnik

Methodische Entwicklungsbedarfe bei der Anwendung der Lebenszyklusanalyse (LCA) im Gesundheitssektor

Abstract: Der Gesundheitssektor zählt zu den größten Abfall- und Klimagas-Verursachern in Deutschland, unter anderem durch den umfangreichen Einsatz von Einwegprodukten. Die wissenschaftliche begründete Reduktion von Umweltauswirkungen dieses Sektors erfordert den Einsatz standardisierter Lebenszyklusanalysen (LCA) als Entscheidungsgrundlage. Aktuelle LCA-Standards wie ISO 14040/44 und ISO 14025 sind zwar eine Methodengrundlage, ihnen fehlen jedoch aufgrund ihres generischen Charakters naturgemäß spezifische und sektorrelevante Regelungen wie etwa in Product Category Rules (PCR), die die Besonderheiten z. B. des Gesundheitssektors adressieren.

Der hier vorgelegte Beitrag zielt darauf ab, methodische Lücken in der LCA-Anwendung im Gesundheitssektor zu identifizieren und Vorschläge für eine verbesserte Standardisierung zu machen. Dazu erfolgt neben einer Analyse bestehender LCA-Rahmenwerke die Auswertung von 309 wissenschaftlichen Artikeln aus der britischen Healthcare-Datenbank, um den Stand der Praxis zu bewerten. So können sowohl methodische Inkonsistenzen als auch Standardisierungslücken identifiziert werden, um daraus methodische Entwicklungsbedarfe für Lebenszyklusanalysen im Gesundheitssektor abzuleiten.

1 Einleitung

Der Gesundheitssektor steht vor der Herausforderung einerseits der Sicherstellung der medizinischen Versorgung auf höchstem Niveau und andererseits der Notwendigkeit, die Umweltauswirkungen seiner Tätigkeiten zu minimieren. Besonders der umfangreiche Einsatz von Einwegprodukten macht den Sektor zu einem der relevantesten Abfallverursacher in Deutschland, und auch die Klimawirkung der Gesundheitswirtschaft ist erheblich.

Lebenszyklusanalysen (LCA) haben sich seit den 1990er Jahren als Werkzeug etabliert, um Umweltauswirkungen systematisch zu erfassen und Strategien zur Reduzierung dieser Belastungen zu entwickeln. Standards wie ISO 14040/44 und ISO 14025 bieten hierfür eine allgemeine methodische Grundlage. Doch gerade für den Gesundheitssektor fehlen spezifische, sektorrelevante Vorgaben, wie beispielsweise Product Category Rules (PCR), die die besonderen Anforderungen an medizinische Produkte, Dienstleistungen und Einrichtungen berücksichtigen. Diese methodischen Lücken erschweren es, die ökologischen Auswirkungen z. B. von Einwegmaterialien, medizinischen Geräten, Prozeduren oder Krankenhausstandorten vergleichbar und valide zu bewerten. Gleichzeitig entstehen jedoch Berichts- und Nachweispflichten für genau solche Informationen.

Ziel der geplanten Untersuchung ist es, Standardisierungslücken zu identifizieren und Vorschläge zu erarbeiten, wie die LCA-Methodik für den Gesundheitssektor verbessert und vereinheitlicht werden kann. Hierdurch sollen wissenschaftlich begründete Entscheidungsgrundlagen geschaffen werden, die es ermöglichen, nachhaltige Lösungen zu fördern und den Beitrag des Gesundheitssektors zur Umweltbelastung zu minimieren.

2 Methodik

2.1 LCA-Standards und Rahmenwerke

Die Analyse der relevanten LCA-Standards erfolgt sowohl auf der Ebene der allgemeinen Standards als auch auf der Ebene von Standards mit spezifischem Bezug zum medizinischen bzw. Gesundheitsbereich. Diese Zweiteilung ermöglicht eine gezielte Berücksichtigung der übergeordneten Prinzipien und Anforderungen, die auf alle Industrien anwendbar sind, sowie eine detaillierte Untersuchung von Normen, die direkt auf die Besonderheiten der Gesundheitswirtschaft zugeschnitten sind. Dabei werden auf der Ebene der allgemeinen Standards folgende Dokumente ausgewertet:

- ISO 14040/44: Grundlegende Prinzipien und Anforderungen für Lebenszyklusanalysen (ISO, 2006a), (ISO, 2006b)
- ISO 14025 (EPDs): Anforderungen an Umweltproduktdeklarationen (ISO, 2006c)
- ISO 14067: Erstellung von Carbon Footprints (ISO, 2013)
- PAS 2050: Spezifikationen zur Bewertung des Kohlenstoff-Fußabdrucks von Produkten (BSI, 2008)
- GHG Protocol: Rahmenwerk zur Bilanzierung von Treibhausgasemissionen (WRI & WBCSD, 2004)
- PEF/PEFCR der EU: Produktumwelt-Fußabdruck und entsprechende sektorale Regeln (European Commission, 2013)

Als spezifische Standards für die Gesundheitswirtschaft werden berücksichtigt:

- GHGP Sector Guidance for Pharmaceutical Products and Medical Devices (WRI & WBCSD, 2013)
- PCR 2017:01 Einweg-OP-Abdeckungen, -Mäntel und -Schutzanzüge für Patienten, Klinikpersonal und Geräte (2.0.0) (IAU, 2017)
- PCR 2018:05 Dienstleistung der Bereitstellung von gewaschenen und sterilisierten wiederverwendbaren OP-Abdeckungen und -mänteln für Patienten und Klinikpersonal (1.02) (IAU, 2018)

Diese Rahmenwerke werden systematisch analysiert und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im Gesundheitswesen dargestellt.

2.2 Stand der Praxis

Zur Ermittlung des Stands der Praxis wird die britische Healthcare-Datenbank genutzt, eine systematische Sammlung von Ökobilanzstudien zur Gesundheitswirtschaft mit 309 wissenschaftlichen Artikeln (Health care-LCA database, 2024) (Drew, Christie, Rainham, & Rizan, 2022). Die Studien in der Datenbank sind bereits folgenden Bilanzierungsgegenstände zugeteilt:

- Company
- Equipment
- Industry

- Investigation
- Medical intervention
- Pharmaceutical
- Procedure
- Product
- Research
- Service
- System

Auch die Definition funktioneller Einheiten, Systemgrenze, Lebenszyklusphasen und weiterer methodischer Parameter werden in der Datenbank benannt.

2.3 Gap-Analyse und Standardisierungs Herausforderungen

Die Analyse der Rahmenwerke und der Stand der Praxis werden miteinander verglichen, um Lücken und Unstimmigkeiten zu identifizieren. Untersucht wird, inwieweit Systemgrenzen, Annahmen und Bilanzierungsrahmen der Studien konsistent sind. Besonderes Augenmerk liegt auf der End-of-Life-Bilanzierung von Einwegprodukten, da diese häufig unzureichend berücksichtigt wird.

Ziel der GAP-Analyse ist es, Bereiche zu identifizieren, die in der Praxis uneinheitlich umgesetzt werden, und aufzuzeigen, wo Rahmenwerke unzureichend spezifiziert sind. Dies soll fundierte Empfehlungen zur Förderung der Standardisierung der LCA-Methodik im Gesundheitswesen ermöglichen und eine verlässliche Entscheidungsgrundlage für nachhaltige Maßnahmen schaffen. Durch die Bildung neuer Cluster und die Analyse methodischer Schwachstellen soll die Vergleichbarkeit und Anwendbarkeit von LCAs im Gesundheitssektor verbessert werden.

3 Ergebnisse

Die Untersuchung hat zentrale methodische Lücken in der Anwendung von Lebenszyklusanalysen im Gesundheitssektor identifiziert und Ansätze zu deren Schließung entwickelt. Eine wesentliche Erkenntnis ist die Differenzierung der funktionellen Einheiten in drei Hauptkategorien. Eine Neuklassifikation der funktionellen Einheiten erfolgt anhand

- geografische Grenzen,
- Dienstleistungen und
- Produkte.

Geografische Einheiten umfassen Krankenhäuser, Gesundheitssysteme oder regionale Einrichtungen. Dienstleistungen werden nach dem deutschen Operations- und Prozedurenschlüssel (OPS) (BfArM, 2024) strukturiert, um eine standardisierte Analyse medizinischer Leistungen zu ermöglichen. Produkte werden gemäß der Greenhouse Gas Accounting Sector Guidance für pharmazeutische Produkte und medizinische Geräte klassifiziert (WRI & WBCSD, 2013), um eine Vergleichbarkeit und Einheitlichkeit sicherzustellen. Dies führt zu drei Clustern auf der ersten Ebene und 20 Klassifizierungen auf der zweiten Ebene, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Kategorisierung der Bilanzierungsgegenstände

Cluster Ebene 1	Cluster Ebene 2
Örtliche Eingrenzung	Gesundheitssystem
	Krankenhaus
	Funktionsbereich eines Krankenhauses
	Praxis
	Company
	Industrie
	Region
Dienstleistung	Diagnostische Maßnahmen
	Bildgebende Diagnostik
	Operation
	Nicht Operative Therapeutische Maßnahmen
	ergänzende Maßnahmen
Produkt	Passive, Single Use Devices with Multiple Components/ Materials
	Passive, Single Use Devices with Few or Single Components/Materials
	Passive, Reusable Devices
	Implantable Device
	Energy Consuming Devices
	Pharmaceutical
	Verpackung
	Nahrung

Diese Kategorisierung bildet eine konsistente Basis für zukünftige Studien.

Für jede der 20 Kategorien der Bilanzierungsgegenstände werden Empfehlungen zu funktionellen Einheiten abgeleitet, die auf einer vergleichenden Analyse und Konsistenzbildung basieren. Zudem werden Vorschläge zur Berücksichtigung verschiedener Lebenszyklusphasen sowie der Systemgrenzen formuliert. Darüber hinaus erfolgt eine Darstellung des aktuellen Stands der Datenverfügbarkeit und der Art der genutzten Datenbanken für jede der drei Kategorien.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Vorhabens „Medizinische Einmalgebrauchsprodukte in der Kreislaufwirtschaft – Wege von der Beseitigung zur stofflichen Verwertung (MEiK)“. Es wird mit dem Förderkennzeichen 03EI5020A vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Literatur/Quellen

- BfArM. (25. 11 2024). Operationen- und Prozedurenschlüssel Version 2025. (B. f. Medizinprodukte, Herausgeber) Von <https://klassifikationen.bfarm.de/ops/kode-suche/htmlops2025/index.htm> abgerufen
- BSI. (2008). PAS 2050: 2008: Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. British Standards Institution.
- Drew, J., Christie, S. D., Rainham, D., & Rizan, C. (2022). HealthcareLCA: an open-access living database of health-care. *Lancet Planet Health*, e1000-12.
- European Commission. (2013). Product Environmental Footprint (PEF) and Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs).
- HealthcareLCA database. (25. 11 2024). HealthcareLCA database. Von <https://healthcarelca.com/database> abgerufen
- IAU. (2017). PCR 2017:01: Einweg-OP-Abdeckungen, -Mäntel und -Schutzanzüge für Patienten, Klinikpersonal und Geräte (Version 2.0.0). Institut für angewandte Umweltforschung.
- IAU. (2018). PCR 2018:05: Dienstleistung der Bereitstellung von gewaschenen und sterilisierten wiederverwendbaren OP-Abdeckungen und -mänteln für Patienten und Klinikpersonal (Version 1.02). Institut für angewandte Umweltforschung.
- ISO. (2006a). ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Organization for Standardization.
- ISO. (2006b). ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. International Organization for Standardization.
- ISO. (2006c). ISO 14025: Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures. International Organization for Standardization.
- ISO. (2013). ISO 14067: Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification and communication. International Organization for Standardization.
- WRI & WBCSD. (2004). The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard (Revised Edition). World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development.
- WRI & WBCSD. (2013). GHG Protocol: Guidance for the Pharmaceutical Sector on Accounting and Reporting of Greenhouse Gas Emissions. World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development.

Kontakt

Franziska Zecha, wissenschaftliche Mitarbeiterin
Hochschule Pforzheim
E-Mail: franziska.zecha@hs-pforzheim.de
Tel.: 07231/28-6122
www.hs-pforzheim.de

ISBN 978-3-99106-153-3



9 783991 061533