DGAW

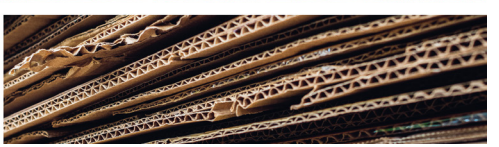
RESSOURCEN
NEU
DENKEN.

Deutsche Gesellschaft für Abfall- und Kreislaufwirtschaft e.V.

15. DGAW-WISSENSCHAFTSKONGRESS

Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

am 24. und 25. Februar 2026
an der Hochschule Pforzheim



innsbruck university press

DGAW

RESSOURCEN
NEU
DENKEN.

Deutsche Gesellschaft für Abfall- und Kreislaufwirtschaft e.V.

Tagungsband

15. DGAW-WISSENSCHAFTSKONGRESS

Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

am 24. und 25. Februar 2026
an der Hochschule Pforzheim

In Zusammenarbeit mit

HS PF

15. DGAW-WISSENSCHAFTSKONGRESS

Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

Anke Bockreis, Martin Faulstich, Sabine Flamme, Kathrin Greiff,
Martin Kranert, David Laner, Mario Mocker, Michael Nelles,
Peter Quicker, Gerhard Rettenberger, Vera Susanne Rotter,
Jörg Woidasky (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 (i. R. Univ. Stuttgart)
Prof. Dr. David Laner (Univ. Kassel)
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 (i. R. HS Trier)
Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter (TU Berlin)
Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky (HS Pforzheim)

Deutsche Gesellschaft für Abfall- und Kreislaufwirtschaft 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, 2026
Universität Innsbruck
1. Auflage
Alle Rechte vorbehalten.
innsbruck university press, Karl-Schönherr-Straße 3, 6020 Innsbruck
Tel. +43 512 507-31700, iup@uibk.ac.at, www.uibk.ac.at/iup
www.uibk.ac.at/iup
ISBN 978-3-99106-187-8
DOI 10.15203/99106-187-8
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Der Kongress wird unterstützt von:

Nehlsen-Gruppe

VEOLIA

eew
Energy from Waste

ITAD
sicher.sauber.nachhaltig.

STADLER
Technik von ihrer besten Seite

IFAT Munich

Fehr

BCE
BJÖRNSEN BERATENDE INGENIEURE

LANG RECYCLING

V+D Recycling

PF Abfallwirtschaft

Medienpartner

Müll und Abfall
Fachzeitschrift für Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

Springer Vieweg

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. Carla Cimatoribus (HS Esslingen)
Prof. Dr.-Ing. Joachim Dach (HS Konstanz)
Prof. Dr.-Ing. habil. Christina Dornack (TU Dresden)
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. rer. nat. habil. Julia Gebert (TU Braunschweig)
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. 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. Wolfgang Klett (Kunz Rechtsanwälte)
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kraft (Univ. Weimar)
Prof. Dr.-Ing. Kerstin Kuchta (TU Hamburg)
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 Umweltkonsulenten 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. Sören Weinrich (FH Münster)
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. Christoph Wünsch (HS Merseburg)

Inhalt

KAPITEL I – VORTRÄGE

Teil 1 Aufbereitung und Sortiertechnik

Alena Maria Spies, Hannah Köhler, Karoline Raulf, Kathrin Greiff
Von Quantität zu Qualität: Neue Ansätze zur nachhaltigen Prozessentwicklung am Beispiel von Papier aus Leichtverpackungsabfällen 17

Jannick Schmidt, Jörg Woidasky
Legierungsspezifische Sortierung von Aluminium-Neuschrott aus dem Automobilbau 23

Hannah Weber, Gerald Koinig, Julian Aberger, Thomas Fink, Alexia Tischberger-Aldrian
Objektgestützte Sortierung und Validierung von Alttextilien mit KI-gestützten Modellen im Technikumsmaßstab 29

Alexandra Axt, Isabel Kaphahn, Peter Quicker
Chemisches Recycling polyamidreicher Bodensysteme mittels Pyrolyse 35

Teil 2 Thermische Verfahren

Falk Oberreich, Fabian Gievers, Andreas Glimm
Pyrolytische Verwertung von naturfaserbasierten Alttextilien 41

Tim Kurtz, Daniela Merz, Krassimir Garbev, Razan Alsharqawi, Peter Stemmermann, Salar Tavakkol, Dieter Stapf
Effekt von mineralischen Füllstoffen auf die Pyrolyse von Polystyrol 47

Isabel Kaphahn, Peter Quicker
Implementation des Oxyfuel-Verfahrens zur CO_2-Abscheidung in Müllverbrennungsanlagen..... 51

Joel da Silva Félix, Daniel Wohter, Peter Quicker
Optimierung der industriellen Rauchgasreinigung durch Additivierung kalkbasierter Sorbentien zur SO_2-Abscheidung 57

Teil 3 Circular Economy/Geschäftsmodelle

Lisa Reissner, Mareike Fröhling, Miriam Sartor
Nachhaltigkeitskommunikation im Verbrauchermarkt 65

Maximilian Vincent Erdmann, Gari Walkowitz
Zur Wirksamkeit von Ökomodulationen: Experimentelle Evidenz von Branchenexperten zur Erweiterten Herstellerverantwortung 71

Lena-Marie Hupperich, Stefanie Kraft, Jörg Woidasky, Anne-Kathrin Cassier-Woidasky
An der Schnittstelle zwischen Nutzung und Entsorgung: Analyse von Einmalgebrauchsprodukten im Operationssaal 77

Teil 4 Stoffstrommanagement und -bewertung

Lucia Aguirre Molina, Sarah Schmidt, David Laner
Recycling von Kunststofffolien in Deutschland: Materialflüsse und Recyclingpotenziale 83

Johannes Scholz, Lukas Hoppe, Vera Susanne Rotter
bioDYM: Dynamische Materialflussmodellierung biogener Systeme für das Kohlenstoffmanagement 87

Magdalena Werner
Ökologische Betrachtung verschiedener Entsorgungswege von Bauschutt- und Bodenabfällen 93

Teresa Weber, Julika Knapp, Anke Bockreis
Ökologische Bewertung von zirkulär produzierten biologisch abbaubaren Hanffaserverbundbauteilen (FALCON) 97

Teil 5 Biologische Verfahren und Deponie

Alexander Kuß, Miriam Sartor
Behandlung von Deponieemissionen mit Hilfe von Mikroalgen-Bakterien-Konsortien 103

She Ming Ng, Sathwik Kurapati, Kerstin Kuchta
In-situ Biomethanation in Biowaste-based Trickle-Bed Reactor under Solid-state Discontinuous Mesophilic Conditions 107

Konstantin Bachmann, David Laner
Analyse der Bewirtschaftung urbaner Bioabfälle am Beispiel der Stadt Kassel: Status quo und Potenziale zur Integration der Erzeugung von Aktivkohlen für die Abwasserreinigung 113

Roman Zurhold, Peter Vennemann, Sören Weinrich
Leitfaden zur Energiesystemoptimierung von Abfalldeponien: Anwendung am Beispiel der Deponie Altenberge 117

Teil 6 Vermeidung

Gregor Biastoch, Senta Berner, Philipp Lorber
Marine plastic waste prevention through land-based interventions in Bangladesh 123

Alejandra María Torres Gómez, Vera Susanne Rotter
Methode zur Charakterisierung von Verpackungslitter als Grundlage für die Bewertung der Litteringwahrscheinlichkeit 129

KAPITEL II – POSTER

Elvira Akhmadieva, Kerstin Kuchta, Burak Büyükkaya
Unified Framework for Circular Economy in European Ports: Methodology and Application 137

Malika Arstan
Digitaler Produktpass: Evaluierung von Modellen zur Zugriffsverwaltung 141

Simon Ballüer, Yuwei Chang, Robert-B. Wudtke
Optimierung der Sperrmüllverwertung zur Sicherung von sekundären Wertstoffen 149

Heike Baumgartner, Felix Scheidl, Bojan Lorber, Gerald Koinig, Alexia Tischberger-Aldrian
Zusammenhänge zwischen sichtbaren Eigenschaften und der chemischen Zusammensetzung von Shredderschrottpartikeln 153

Lara Clemens, Isabel Kaphahn, Peter Quicker
Chemisches Recycling von abfallstämmigem Matratzenschaum durch Pyrolyse 159

Leon Deterding, Maximilian Auer, Lars Dubb, Simon Eberle, Raphael Schill, Claus Lang-Koetz, Jörg Woidasky
Ökobilanz und Kreislaufführung im Kunststoffrecycling von Leichtverpackungen: Vergleich innovativer Sortier- und Verwertungstechnologien 163

Mahsa Doostdar, Kerstin Kuchta
A Review on the environmental performance studies on reusable plastic packaging across industries 167

Florian Dopplinger, Gerald Koinig, Alexia Tischberger-Aldrian
Auswirkungen von zukünftigen Alt-Fahrzeugen auf die Shredderschrotte 171

Simon Eberle, Maximilian Auer, Lars Dubb, Leon Deterding, Raphael Schill, Jörg Woidasky
Verpackungsstudie: Analyse des Leichtverpackungs-Abfallaufkommens deutscher Haushalte 2019 vs. 2024 177

Tommy Ender, Ralf Schefler, Elisa Uta Deiß, Cinthya Lara, Vicky Shettigondahalli Ekanthalu, Michael Nelles
Hydrothermale Karbonisierung (HTC) von Klärschlamm und nachfolgende aerobe mesophile Behandlung von HTC-Prozesswässern 183

Maike Hentschel
Impacts of Waste Charging Systems on Separately Collected Bio-waste: Insights from European Cities 187

Leon Höhm
WIR! recyceln Fasern – Analyse von Marktbarrieren bei der Etablierung einer Kreislaufführung von Carbonfasern 191

Lívia Hökl, Anke Bockreis
Entwicklung einer maßgeschneiderten Methode zur Detektion und Validierung von PFAS in biogenen Abfallströmen 197

Carmen Beisswanger, Claus Lang-Koetz, Ulrich Hutschek, Marius Heil, Alexandra Wolf, Natalie Käser, Nisha Anders
Circular Economy-Potenziale für produzierende Unternehmen in der Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken 203

Marcel Kern, Jörg Woidasky
Kreislaufwirtschaftliche Ansätze in der Patientenbeatmung 209

Antonius Klein-Reesink
Entwicklung eines Entscheidungstools zur Kreislaufschließung bei Geokunststoffen 215

Julian Klüttermann, Isabel Kaphahn, Peter Quicker
Bewertung des thermochemischen Verhaltens von Papierrejekten 219

Romana Kopecká, Marlies Hrad, Marion Huber-Humer
Prospective use of Temporary Material Hubs: A quantitative recyclability assessment 225

Alina Krieger, Franziska Zecha, Anne-Kathrin Cassier-Woidasky, Jörg Woidasky
Kreislaufwirtschaftliche Aspekte der Hämodialyse 229

Jonathan Mahl, Krassimir Garbev, Hans-Joachim Gehrmann, Aaron Münch, Jule Stumpf, Manuela Wexler, Dieter Stapf
Untersuchung des thermochemischen Abbauverhaltens von Carbonfasern in Zementklinker 235

Natalie Marzinek, Hannah Weber, Gerald Koinig, Alexia Tischberger-Aldrian
Analyse und Bewertung der Recyclingfähigkeit von Matratzenüberzügen durch Merkmalserfassung und Materialcharakterisierung 239

Inken Maria Michael, Kathrin Greiff
Achieving Circularity through LCA Integration in Product Life Cycle Management Systems 245

Tannaz Naseri, Kerstin Kuchta
Evaluation of Failure Mechanisms and Regeneration techniques in NMC and LFP Batteries for Sustainable Circularity 251

Manuel Neumaier, Florian Hüller, Daniel Jansen, Christina Kunzmann, Daniel Vollprecht
Materialcharakterisierung regionaler Sekundärrohstoffe zur Entwicklung nachhaltiger Bindemittelsysteme für Betonfertigteile 257

Mariia Piminova
Bewertung des UNFC-basierten Webtools SARA anhand der Fallstudie Bollrich 263

Ariana C. Morales Rapallo
Recycled Concrete Aggregate Pre-Treatments for Structural Self-Consolidating Concrete: Evidence Synthesis and Selection Framework 267

Fabian Rüttnauer, Anna-Caroline Assmann, Alena Maria Spies, Karoline Raulf
Stückzahlanteile als Kenngröße für Abfallanalysen? Methodenentwicklung und praktische Untersuchungen 273

Philipp Schetter
Zirkuläre Nutzung von Kunststoffen aus Elektrofahrzeugen 279

Karin Schinner, Hannah Weber, Gerald Koinig, Alexia Tischberger-Aldrian
Quantifizierung von Elastan mit unterschiedlichen Charakterisierungsmethoden 285

Annalena Secci
Rechtliche Unsicherheiten beim Recycling medizinischer Einwegprodukte in Praxen und Kliniken – Analyse und anwendungsorientierte Gestaltung aus rechtswissenschaftlicher Sicht 289

Maik Siegel
Anaerobe Abwasserbehandlung mithilfe des phototrophen Bakteriums *Rhodopseudomonas palustris* 295

Souphaphone Soudachanh, Stefan Salhofer
Transitioning Plastic Waste Management in Laos: Circular Solutions and Environmental Implications 299

Lina Staffa, Sabrina Scheele, Lukas Benecke, Chokri Cherif, Roman Maletz, Christian Prescher, Tobias Hatzfeld, Lilian Krause, Ralf Bosse, Stefan Kreuzer, Dominik Segiet, Alexander Wiefel, Niklas Bäumer, Steffen Müller-Probandt
Zirkuläre nachhaltige technische Textilien aus Polypropylen für den Transportbereich (zPP) 305

Paul Steiner, Jörg Woidasky
End-of-life Wind turbine blade waste quantification for Europe 2025–2040 309

Ronja Strobel, André Rückert
Durchführung einer modellgestützten Szenarioanalyse zu verschiedenen Verwertungswegen von Gerätebatterien in Kambodscha 315

Anton Vielsack, Jim Magiera, Simon Eberle, Lena-Marie Hupperich, Sven Ditzel, Jessica Hövel, Max Riedel, Anne-Kathrin Cassier-Woidasky, Jörg Woidasky
Charakterisierung infektiöser medizinischer Abfälle mittels Röntgenbildgebung: Ein methodischer Ansatz zur Unter-stützung zukünftiger Recycling- und Kreislaufstrategien 321

Ben Willlecke
Analyse der Abfallzusammensetzung und der kommunalen Abfallwirtschaft in Musanze, Ruanda 327

Franziska Zecha
Transparente Stoffströme medizinischer Einwegprodukte im Krankenhaus – Grundlage für ökologische Optimierung und Kreislaufwirtschaft 331

Vorwort

Seit 2011, dem Jahr des ersten Wissenschaftskongresses, der an der TU München stattfand, habe ich jährlich das Vorwort im Tagungsband verfasst. Nun also zum letzten Mal. Ich verabschiede mich mit einem großen Dank an die vielen Beteiligten in den vergangenen 15 Jahren.

Insbesondere gilt mein Dank den Vortragenden und Poster-Ausstellenden, die jedes Jahr bemerkenswerte Beiträge abgeliefert haben. Mein Dank geht an die DGAW, den Beirat und die Teilnehmerinnen und Teilnehmer sowie an die mittlerweile 15 lokalen Veranstalter, die ich hier gar nicht alle nennen kann, die wirklich Großes geleistet haben. Wir hatten stets perfekte Veranstaltungen. Wir hatten auch viele engagierte Sponsoren, ohne die wir die Kongresse in dieser Form nicht hätten umsetzen können. Vielen Dank auch an diese Unterstützer!

Mittlerweile ist der Wissenschaftskongress etabliert und entwickelt sich beständig weiter. Ich habe großes Vertrauen in die DGAW, den Beirat und meine Nachfolger/innen.

Auch dieses Jahr haben wir mit der Hochschule Pforzheim wieder eine hervorragende Tagungsstätte gefunden und sind dort bei Prof. Dr. Jörg Woidasky zu Gast. Ihm und seinem Team ganz herzlichen Dank und Anerkennung für die perfekte Vorbereitung. Vielen Dank an die Verantwortlichen der DGAW, die alles steuern und managen.

Natürlich steht auch in diesem Jahr die Kreislaufwirtschaft mit all den verschiedenen Aspekten im Mittelpunkt: Umweltauswirkungen, Stoff- und Energieflüsse, Auswirkungen auf ökonomische und soziale Bereiche werden untersucht. Weiterhin haben jedoch auch Fragen zur Technologieentwicklung große Bedeutung.

Parallel zu diesem Kongress tagt wiederum die Akademie der Kreislaufwirtschaft der DGAW. Damit wird deutlich, dass die DGAW der wissenschaftsorientierten Kreislaufwirtschaft erneut die Türen öffnet.

Nochmals herzlichen Dank an alle: An Prof. Dr. Jörg Woidasky mit Team als Veranstalter vor Ort, an die Sponsoren, die im Tagungsband benannt sind, und an die DGAW als Organisatorin. An den wissenschaftlichen Beirat und an den Verlag innsbruck university press für die Gestaltung des Tagungsbandes und natürlich an alle, die zu diesem Band einen Beitrag geleistet haben.

Der 16. Kongress an der Hochschule Bremen steht schon bevor. Ich werde als Teilnehmer sicherlich dabei sein, aber nicht mehr in der vorderen Reihe. Der Wiko wird aber weiter zu meinem beruflichen Leben im Ruhestand gehören.

Ehe wir an Bremen denken, wünsche ich viele neue und interessante Einsichten bei den Vorträgen und den Postern, sowie bei den vielen Gesprächen am Rande und letztlich beim Lesen des hier vorgelegten Bandes.

Für die Herausgeber
Ihr Gerhard Rettenberger

KAPITEL I – VORTRÄGE

TEIL 1
Aufbereitung und Sortiertechnik

Leitung:

Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker

Alena Maria Spies, Hannah Köhler, Karoline Raulf, Kathrin Greiff

Von Quantität zu Qualität: Neue Ansätze zur nachhaltigen Prozessentwicklung am Beispiel von Papier aus Leichtverpackungsabfällen

***Abstract**: Recyclingquoten stellen ein wichtiges Instrument zur Förderung der Kreislaufwirtschaft dar, sind bisher jedoch rein massenbasiert und berücksichtigen nicht die Recyclingqualität. Anhand eines Produktionsversuchs, bei dem die technische Machbarkeit des Recyclings von Papier aus Leichtverpackungsabfällen (LVP) nachgewiesen werden konnte, wurde gezeigt, dass die Berücksichtigung der Recyclingqualität für eine ökologisch nachhaltige Abfallwirtschaft entscheidend ist. Für die Untersuchung wurde die Recyclingqualität anhand verschiedener Qualitätsparameter definiert und über Primärdaten aus den Versuchen quantitativ abgeschätzt. Der sich ergebende Substitutionskoeffizient floss anschließend in eine vergleichende Ökobilanz verschiedener Verwertungswege von Papier aus LVP ein, die zeigte, dass die Recyclingqualität maßgeblich die Umweltauswirkungen bestimmt.*

1 Einleitung

Um innerhalb der planetaren Grenzen wirtschaften zu können, ist es entscheidend, Lebensqualität und Wohlstand nachhaltig vom Rohstoffbedarf und den damit verbundenen Umweltwirkungen zu entkoppeln. Eine Möglichkeit stellt die Kreislaufführung von Materialien dar, die gesetzlich oftmals über Vorgaben zu Recyclingquoten vorangetrieben wird (PPWR, 2025). Bisherige Quoten sind massenbasiert und berücksichtigen häufig nicht die Qualität der Recyclingrohstoffe sowie die mit dem Recycling verbundenen Umweltauswirkungen (PPWR, 2025). Die Bedeutung der Erweiterung gesetzlicher Recyclingvorgaben um Qualitätsaspekte wurde im Forschungsprojekt EnEWA am Beispiel von Papier, Pappe und Kartonagen (PPK) aus Leichtverpackungsabfällen (LVP) untersucht (EnEWA Projektkonsortium, 2025). Zurzeit wird PPK aus LVP entweder thermisch verwertet oder im Ausland einem minderqualitativen Recycling (MQR) zugeführt, da keine Recyclingrouten für ein hochqualitatives Recycling (HQR) bestehen. HQR wird in diesem Beitrag als Recycling definiert, bei dem die recycelten Materialien eine möglichst gleichwertige Qualität wie die Ausgangsstoffe aufweisen. HQR wurde bisher u.a. durch die Empfehlung XXXVI des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR) erschwert, die PPK aus gemischten Abfallsammlungen bis zu ihrer Novellierung im Oktober 2025 für den Einsatz im Lebensmittelbereich ausschloss (Bundesinstitut für Risikobewertung, 2024, 2025). Für ein HQR von PPK aus LVP bestehen damit neben technischen auch regulatorische Hürden. Um diese Hürden zu überwinden, wurde ein Recyclingprozess für PPK aus LVP entwickelt. Um die Eignung für ein HQR zu testen und eine Grundlage für mögliche regulatorische Anpassungen zu schaffen, wurde ein 24-h-Produktionsversuch durchgeführt, bei dem PPK aus LVP in einer bestehenden Produktionsanlage für Karton eingesetzt wurde. Die daraus resultierenden Daten wurden für eine umfassende technische und ökologische Bewertung des Prozesses herangezogen. Das Vorgehen sowie die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

2 Methodik

2.1 Durchgeführter Produktionsversuch

Für den Produktionsversuch wurden 120 t PPK aus LVP (DSD-Spezifikation 550) in einer adaptierten trockenmechanischen Altpapiersortieranlage aufbereitet. Im Anschluss wurde das nachsortierte PPK (zu 12,5 Ma.-% des Inputs) über 24 h mit gemischtem Altpapier (Sorte 1.02 nach DIN EN 643) in die Kartonfabrik Schrobenhausen der LEIPA Group GmbH eingebracht. Nach der Vorgehensweise des Joint Research Centers der Europäischen Kommission (Caro et al., 2023) wurde die technische Eignung zur Substitution anhand der Qualitätsparameter (QP) *Verarbeitbarkeit, chemische Belastung, ästhetische Produkteigenschaften, mechanische Eigenschaften und regulatorische Einschränkungen*, basierend auf während des Produktionsversuchs durchgeführten Analysen, ermittelt (vgl. Abbildung 1). Für jeden dieser fünf QP wurde eine quantitative Abschätzung durchgeführt, um die Qualität von PPK aus LVP im Vergleich zu getrennt gesammeltem Altpapier zu bewerten und in die ökologische Bewertung des Prozesses einzubeziehen. Alle QP wurden gleich gewichtet, sodass sich pro QP ein maximaler Wert von 20% ergibt. Zur Bewertung der Verarbeitbarkeit wurden alle Outputströme der trocken- und nassmechanischen Aufbereitung beprobt, und die Stabilität des Prozesses wurde geprüft. Zudem wurden die Konzentrationen von Kontaminanten sowohl an der Zufuhr zur Papiermaschine als auch im Fertigprodukt analysiert. Für das erzeugte Kartonprodukt wurden die erzielten mechanischen und ästhetischen Eigenschaften bewertet. Zudem erfolgte eine Einschätzung zur möglichen Anpassung bestehender regulatorischer Einschränkungen. Aus der Summe der einzelnen QP ergibt sich ein Qualitätsindikator, der die technische Eignung zur Substitution (Recyclingqualität) im Vergleich zu getrennt gesammeltem Altpapier angibt. Dieser Qualitätsindikator wurde anschließend mit einem Substitutionskoeffizienten (SK) für getrennt erfasstes Altpapier von 83% multipliziert (Gala et al., 2015), um einen finalen SK für PPK aus LVP im Vergleich zu Primärfasern zu erhalten. (Spies et al., in Begutachtung).

Abbildung 1: Qualitätsbewertung des Produktionsversuchs zum Recycling von PPK aus LVP

2.2 Ökologische Bewertung des Produktionsversuchs

Basierend auf den Ergebnissen des Produktionsversuchs wurde eine attributive Lebenszyklusanalyse (LCA) nach ISO 14040/44 durchgeführt, die das HQR und das MQR von 1 t PPK im beschriebenen Mischungsverhältnis hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen vergleicht (Köhler et al., in Begutachtung). Für die entstehenden Sekundärfasern wurde der Avoided-Burden-Ansatz gewählt. Als Datengrundlage für die LCA dienten die Versuche des EnEWA-Projekts sowie Literaturdaten. Es wurden die Indikatoren Treibhausgaspotenzial (GWP), Landnutzung (LOP), Wasserverbrauch (WCP) der ReCiPe 2016-Methode sowie der

kumulierte Energieaufwand (CED) gewählt (DIE PAPIERINDUSTRIE, 2025). Um zu bewerten, welchen Einfluss die Berücksichtigung der Recyclingqualität auf die LCA-Ergebnisse hat, wurde außerdem der Einfluss der SK mittels einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Technische Machbarkeit und Bestimmung der erreichbaren Qualitäten

Der durchgeführte Produktionsversuch belegt die generelle technische Machbarkeit eines HQR bei einer Beimischung von 12,5 Ma.-% PPK aus LVP. In Bezug auf die **Verarbeitbarkeit** zeigten sich im HQR leichte Einschränkungen (QP 15%), da im Vergleich zu separat erfasstem Altpapier höhere Verunreinigungsgrade festgestellt wurden. Für ein MQR kann aufgrund des Fehlens einer angepassten Prozessführung und einer nicht angepassten trockenmechanischen Vorsortierung von einer stärkeren Einschränkung ausgegangen werden (QP 10%). Hinsichtlich der **chemischen Belastung** sowie der **ästhetischen Produkteigenschaften** wurden für das HQR keine Einschränkungen angenommen, da im Produktionsversuch keine Akkumulation von Kontaminanten nachgewiesen werden konnte und nach der Hygienisierung kaum ästhetische Beeinträchtigungen zu erwarten sind (QP je 20%). Demgegenüber wurden für das MQR leichte Einschränkungen angenommen, unter anderem infolge der nicht adaptierten trockenmechanischen Abreicherung von Kontaminanten sowie der unbehandelten Mikrobiologie (QP je 15%). Obwohl in den Produktionsversuchen keine Einschränkungen der **mechanischen Eigenschaften** durch den Einsatz von PPK aus LVP festgestellt wurden, ist insgesamt auch für ein HQR von einer leicht geringeren Materialqualität im Vergleich zu getrennt gesammeltem Altpapier auszugehen (QP 15%). Dies gilt insbesondere für das MQR, bei dem die Mikrobiologie unbehandelt bleibt (QP 10%). Bezüglich der **regulatorischen Einschränkungen** wurde angenommen, dass PPK aus LVP im HQR grundsätzlich auch für den trockenen, nicht fettenden Lebensmittelkontakt zugelassen werden könnte (QP 20%). Ein erster Schritt in diese Richtung wurde mit der seit Oktober 2025 geltenden Erweiterung der Empfehlung XXXVI vollzogen, die PPK aus LVP nun für den indirekten Lebensmittelkontakt bei einer Einsatzquote von 12,5 Ma.-% zulässt (Bundesinstitut für Risikobewertung, 2025). Für das MQR ist hingegen aufgrund der fehlenden Aufbereitung und des daraus resultierenden Einsatzverbots von einem stark eingeschränkten Markt (ausschließlich Non-Food Bereich) auszugehen (QP 10%). Für die Gesamtbewertung ergibt sich aus der Summe der einzelnen QP für das HQR ein Qualitätsindikator von 90%, während das MQR einen Qualitätsindikator von 60% erreicht. Daraus ergeben sich effektive SK von 75% für das HQR und 50% für das MQR. (Spies et al., in Begutachtung)

3.2 Ökologische Bewertung und Sensitivität der Substitutionskoeffizienten

Die Umweltauswirkungen für GWP, LOP und CED können im Vergleich zum MQR im Ausland mit einem HQR deutlich reduziert werden (vgl. Abbildung 2, Rechtecke). Dies ist vor allem auf die weiten Transportdistanzen ins Ausland sowie auf das höhere Substitutionspotenzial durch den neuen Prozess zurückzuführen (Köhler et al., in Begutachtung). Im Vergleich zum MQR in Deutschland bietet das HQR Vorteile für LOP und CED, aber Nachteile für GWP. Für WCP sind alle Szenarien vergleichbar.

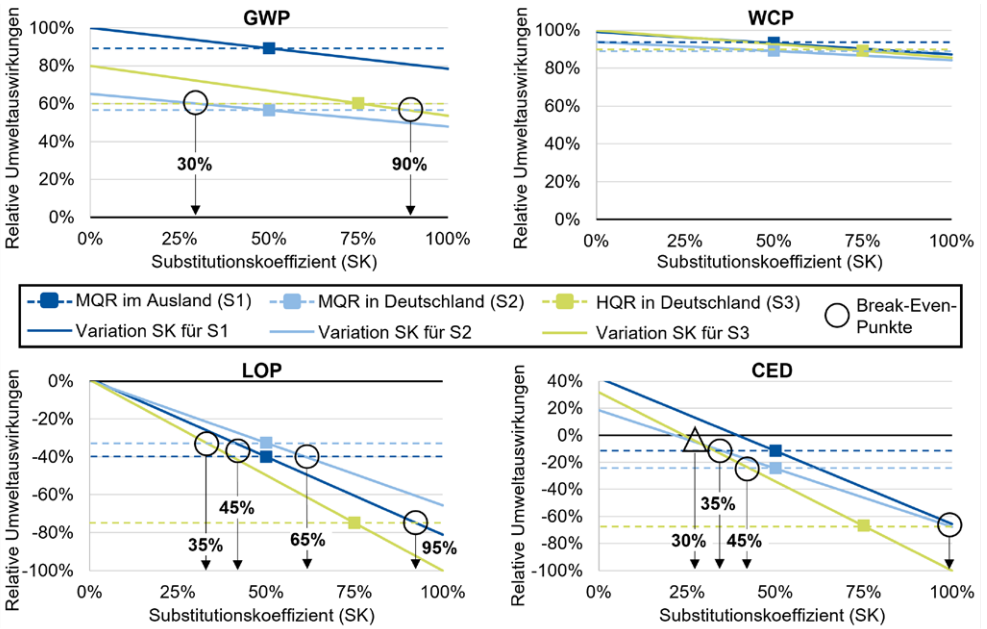


Abbildung 2: Break-Even zwischen den Szenarien in Abhängigkeit vom Substitutionskoeffizienten

Um die Unterschiede zwischen Primär- und Sekundärfasern bei der Gutschrift zu berücksichtigen, wurden die in 3.1 hergeleiteten SK verwendet. Durch Variation der SK wurden die Sensitivität dieses Parameters und die Break-even-Punkte zwischen den Szenarien bestimmt (vgl. Abbildung 2, durchgezogene Linien). Für GWP sind die inländischen Verfahren unabhängig vom SK vorteilhaft. Für die lokale Verwertung bestimmt der jeweilige SK, ob sich der zusätzliche Aufbereitungsaufwand ökologisch lohnt. Bei einem SK zwischen 30% und 90% ist das MQR für GWP tendenziell ökologisch vorteilhafter als das HQR. Für LOP ist das HQR ab einem SK von 35% und für CED von 30% vorteilhaft verglichen mit dem inländischen MQR.

4 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass rein massenbasierte Recyclingquoten nicht zwangsläufig zu den nachhaltigsten Prozesslösungen führen. Für eine fundierte Bewertung sollte daher berücksichtigt werden, welche Materialqualitäten durch das Recycling tatsächlich erreicht werden können und welche zusätzlichen Aufwände erforderlich sind. Nur so lässt sich eine nachhaltige Prozessentwicklung abbilden. Trotz des erheblichen Aufwands stellt der durchgeführte Produktionsversuch lediglich einen Testbetrieb dar. Daher sollte die operative Umsetzbarkeit des Prozesses (insb. im Hinblick auf potenzielle Kontaminanten und erreichbare Qualitäten) in einem Dauerbetrieb validiert werden. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass Ansätze zur Quantifizierung ökologischer Faktoren praktikabel und umsetzbar bleiben. Vor dem Hintergrund eines ab 2035 in der PPWR (2025) vorgesehenen Nachweises eines großskaligen Recyclings erscheint die

systematische Berücksichtigung ökologischer Bewertungskriterien sowie erreichbarer Qualitätsstandards bei der Quotenermittlung als wesentlicher Beitrag zur Förderung nachhaltiger Recyclingprozesse.

Danksagung

Das Projekt *EnEWA* wurde finanziell mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen *03EN2073B* im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms gefördert.

Literatur/Quellen

BfR Bundesinstitut für Risikobewertung. (2024). *XXXVI. Papiere, Kartons und Pappen für den Lebensmittelkontakt.*

BfR Bundesinstitut für Risikobewertung (2025). Gesundheitliche Beurteilung von Materialien und Gegenständen für den Lebensmittelkontakt im Rahmen des Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuches. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, *68*(10), 1212–1216. https://doi.org/10.1007/s00103-025-04114-5

Caro, D., Albizzati, P. F., Cristóbal Garcia, J., Saputra Lase, I., Garcia-Gutierrez, P., Juchtmans, R., Garbarino, E., Blengini, G., Manfredi, S., Meester, S. de, & Tonini, D. (2023). *Towards a better definition and calculation of recycling* (JRC131531). https://doi.org/10.2760/636900

EnEWA Projektkonsortium. (2025). *EnEWA - Energieeinsparung bei der Papierproduktion durch Erschließung der Wertschöpfungsketten Altpapier aus Leichtverpackungen, Restabfall und Gewerbeabfall.* https://doi.org/10.34657/19873

ISO 14040/44 (2020). *Environmental management - Life cycle assessment*.

Verordnung (EU) 2025/40 über Verpackungen und Verpackungsabfälle, 2025.

Gala, A. B., Raugei, M., & Fullana-i-Palmer, P. (2015). Introducing a new method for calculating the environmental credits of end-of-life material recovery in attributional LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *20*(5), 645–654. https://doi.org/10.1007/s11367-015-0861-3

Köhler, H., Spies, A. M., Greiff, K., & Raulf, K. (in Begutachtung). Guiding sustainable waste management: LCA-based evaluation of trade-offs in high-quality recycling of paper and board from lightweight packaging waste.

DIE PAPIERINDUSTRIE. (2025). *Leistungsbericht PAPIER 2025.*

Spies, A. M., Köhler, H., Hegemann, N., Krolle, A., Vetter, Y., Huesmann, R., Raulf, K., & Greiff, K. (in Begutachtung). Assessing the industrial-scale recycling feasibility of paper, board and fiber-based composites from lightweight packaging waste for high-quality applications.

Kontakt

Alena Maria Spies, M. Sc., Forschungsgruppenleitung
Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS), RWTH Aachen University
Tel. 0241 80 99354
E-Mail: alena.spies@ants.rwth-aachen.de
Homepage: www.ants.rwth-aachen.de

Jannick Schmidt, Jörg Woidasky

Legierungsspezifische Sortierung von Aluminium-Neuschrott aus dem Automobilbau

***Abstract**: Das Forschungsprojekt KANAL verfolgt das Ziel, einen geschlossenen Kreislauf für Aluminium-Neuschrott aus der Automobilproduktion zu etablieren. Im Fokus steht die Nutzung einer durchsatz- und qualitätsoptimierten Anlage zur Trennung der Legierungsgruppen 5xxx und 6xxx mittels laserbasierter Emissionsspektroskopie unter Einbindung aller relevanten Akteure der Prozesskette. Nach einer Einfahrphase mit Modellmaterialien wird die Anlage nach Scale-up-Schritten nun im industrienahen Demonstrationsmaßstab betrieben. Die Prozessleistung wurde unter realen Bedingungen mit branchenüblichen Schrottqualitäten, Mengen und Durchsätzen validiert und die industrielle Anwendbarkeit auf TRL 7-8-Niveau mit durchschnittlichen Reinheiten von 96,5% nachgewiesen. Vergleichende Schmelzversuche bestätigen ein uneingeschränkt marktgängiges 5xxx-Sortierprodukt und ein 6xxx-Produkt mit Qualitätseinschränkungen, die auf die heterogene Herkunft der Schrotte zurückzuführen sind.*

1 Einleitung

Aluminium ist ein unverzichtbarer Leichtbau-Werkstoff u.a. bei der Automobilproduktion, im Bauwesen oder der Verpackungsindustrie. Mangels heimischer Primärrohstoffe ist Deutschland zur Deckung seines Aluminiumbedarfs von ca. 2,4 Mio. Tonnen pro Jahr auf Importe und die Bereitstellung hochwertiger Aluminiumrezyklate angewiesen [1]. Während etwa ein Drittel der Nachfrage über Sekundäraluminium gedeckt werden, werden jährlich rund eine Million Tonnen Aluminiumabfälle und -schrotte exportiert, sodass nationale, kreislaufwirtschafte Potentiale nicht ausgeschöpft werden [1-2].

Mit einem Anteil von etwa 45 Prozent ist die Automobilindustrie der größte deutsche Aluminiumverbraucher. Der Wandel von der Verbrenner- zur Elektromobilität führt hier zu einem höheren Bedarf an hochwertigen Aluminium-Knetlegierungen z. B. für die Karosserieherstellung; andererseits verlieren Absatzmärkte für Aluminium-Gusslegierungen wie z. B. die Herstellung von Aluminium-Motorblöcken an Bedeutung, die bisher große Mengen vermischter Aluminiumschrotte aufnehmen konnten [3-4].

Das Technologietransfer-Programm Leichtbau des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie fördert das Forschungsprojekt „KANAL“ (Kreislaufsystem für funktionales Aluminium-Neuschrottrecycling aus der Automobilproduktion mittels LIPS (laserinduzierter Plasmaspektroskopie)), in dessen Rahmen 2024 in Gaggenau eine der ersten industriellen LIPS-Sortieranlagen zur Trennung von Aluminiumlegierungen in Betrieb genommen wurde. Mit dieser Anlage ist die Sortierung heterogener vermischter Aluminiumlegierungen aus der Automobilindustrie in Legierungsgruppen oder Einzellegierungen möglich. Eine derartige Trennung war mit konventionellen Recyclingverfahren bislang nicht zuverlässig möglich, was zu einer deutlichen Minderung der Sekundäraluminiumqualität führte oder bei der Legierungserzeugung die Zumischung großer Anteile energieintensiv hergestellten Primäraluminiums erforderte.

Im Rahmen des KANAL-Vorhabens gelang auch die Integration aller Stakeholder entlang der gesamten Prozesskette: Von der Erfassung der Aluminium-Neuschrotte in der Fahrzeugproduktion über deren Identifikation und Sortierung im Recyclingunternehmen bis hin zum Wiedereinsatz in Schmelz- und Halbzeug-Fertigungsprozessen eines Aluminium-Herstellers wurden alle Stakeholder beteiligt und deren Prozesse

analysiert. Diese enge Vernetzung ermöglicht erstmals die unternehmensübergreifende Erschließung des ganzheitlichen Prozessoptimierungspotenzials, welches technische, wirtschaftliche sowie ökologische Zielsetzungen gleichermaßen berücksichtigt und damit deutlich über die üblichen betriebsspezifischen Optimierungen hinausgeht.

Systematische Sortierversuche mit Modellmaterialien (D_{95}-Wert: 8,2 cm; mittlere Teilemasse: ~6 g; Schüttdichte: 344 kg/m³) ermöglichten die Identifizierung kritischer Anlagenparameter (z. B. Durchsatz, Austragungslogik), die das Sortierergebnis maßgeblich beeinflussen. Über 58 Versuchsreihen hinweg konnte trotz der hohen Schüttdichte eine mittlere Reinheit von etwa 95% bei Durchsätzen von bis zu 5 t/h erzielt werden, was die grundsätzliche Eignung der LIPS-Technologie zur legierungsspezifischen Aluminium-Trennung bestätigt. Aufbauend auf diese Ergebnisse dokumentiert der vorliegende Beitrag Scale-up-Versuche unter realitätsnahen Bedingungen mit praxisüblichem Aluminiumschrott der Legierungsgruppen 5xxx und 6xxx, mit dem Ziel, die Leistungsfähigkeit des Verfahrens für den industriellen Einsatz zu validieren (TRL 7 - 8).

2 Methodik

Für die Scale-up-Versuche wurden ca. 5 Mg branchenüblicher Aluminiumneuschrotte aus der Fahrzeugproduktion der Legierungsgruppen 6xxx (Zielfraktion) und 5xxx (Restfraktion) verarbeitet. Die Materialien hatten einen D_{95}-Wert von 10,5 cm, eine mittlere Teilemasse von 34,5 g und eine Schüttdichte von 250 kg/m³. Das Material wurde in verschiedenen Mischverhältnissen und bei variablen Durchsätzen jeweils sechs Stunden kontinuierlich – einschließlich Wiederaufgabe – in der Sortieranlage behandelt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Versuchsplan und Ergebnisse der Scale-up-Versuche

Versuchs-Nr.	Mischungsverhältnis (5xxx / 6xxx) [Gew.-%]	Durchsatz [t/h]	Reinheit Zielfraktion [Gew.-%]	Reinheit Restfraktion [Gew.-%]
1.1	50,0 (2,41 t) / 50,0 (2,41 t)	3,5	94,8	97,8
1.2	50,0 (2,31 t) / 50,0 (2,31 t)	5,0	94,8	95,6
1.3	50,0 (2,20 t) / 50,0 (2,20 t)	8,0	94,9	95,4
2.1	66,6 (3,22 t) / 33,3 (1,61 t)	3,5	94,7	99,0
2.2	66,6 (3,03 t) / 33,3 (1,51 t)	5,0	97,1	99,5
2.3	66,6 (2,82 t) / 33,3 (1,41 t)	8,0	93,6	99,9
3.1	75,0 (3,63 t) / 25,0 (1,21 t)	3,5	97,4	98,5
3.2	75,0 (3,50 t) / 25,0 (1,16 t)	5,0	94,5	98,1
3.3	75,0 (3,35 t) / 25,0 (1,12 t)	8,0	92,9	98,4

Während des Versuchsverlaufs wurden Ziel- und Restfraktion automatisiert in festen Zeitabständen (~140 Sekunden) im Anlagenauslauf beprobt. Die so entstandenen 18 Proben (je neun für Ziel- und Restfraktion, jeweils 114 ± 17 kg) wurden durch viermaliges Kegeln und Vierteln [5] zu Analyseproben reduziert (repräsentativ: 5 - 7 Gew.-% je Gesamtprobe). Die Analyseproben wurden zur Legierungs-Bestimmung mit der LIPS-Handpistole Vulcan Optimum+ (Hitachi, Japan) analysiert.

Die übrigen Massen wurden in einem Aluminium-Schmelzwerk mittels Schmelzanalysen chemisch analysiert. Das Elementprofil wurde anhand der Annahmespezifikationen zweier führender Aluminiumhersteller sowie den verbindlichen Grenzwerten der DIN EN 573-3 [6] bewertet. Die Elementwerte wurden dafür von der jeweils zugrundeliegenden Annahmespezifikationen subtrahiert (Tabelle 2).

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Sortierversuche ergaben Reinheiten zwischen 93,0 und 99,9% mit durchschnittlichen Reinheiten von 98% (Restfraktion) und 95% (Zielfraktion) (Tabelle 1). Aufgrund der sehr konsistenten Ergebnisse aller Versuche wurde Versuch 2.3 modellhaft für die gesamte Versuchsreihe zum Vergleich mit Hersteller-Annahmespezifikationen herangezogen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Sortier- und Schmelzergebnisse des Versuchs 2.3 (Angaben in [Gew.-%])

Quelle	Reinheit	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
		[Differenz zur Ablehnungsgrenze]							
Abnehmer 1	99,9 (Restfraktion, 5k)	0,17	0,14	0,04	0,19	0,93	0,08	0,04	0,03
	93,6 (Zielfraktion, 6k)	0,93	0,03	-0,22	0,00	-0,17	0,02	-0,02	0,02
Abnehmer 2	99,9 (Restfraktion, 5k)	0,02	0,09	0,04	0,19	1,53	0,08	0,09	0,03
	93,6 (Zielfraktion, 6k)	0,43	0,09	-0,24	0,17	-0,47	0,09	0,12	0,07
DIN EN 573-3	99,9 (Restfraktion, 5k)	0,27	0,24	0,09	0,19	1,03	0,28	0,24	0,13
	93,6 (Zielfraktion, 6k)	0,93	0,27	-0,09	0,15	-0,07	0,19	0,17	0,12

grün = spezifikationsgerecht; rot = nicht spezifikationsgerecht

Für das erzeugte 5xxx-Produkt wurden die zugrundeliegenden Hersteller-Annahmespezifikationen sowie die der DIN 573-3 vollständig eingehalten, sodass das Material als uneingeschränkt marktgängig gelten kann. Bei der 6xxx-Zielfraktion wurden hingegen einzelne Annahmespezifikationen, insbesondere für die Elemente Cu, Mg und stellenweise Zn, nicht durchgängig erreicht. Diese Überschreitungen konnten auch in Versuchsreihen mit teilweise höheren Reinheiten von bis zu 97% beobachtet werden.

Die Überschreitungen der Elementkonzentrationen können auf die heterogene Herkunft (verschiedene Hersteller) der zugrundeliegenden Schrotte zurückgeführt werden. Aluminium-Hersteller verfügen jeweils über eigene Anforderungen an die Qualität ihres produzierten Aluminiums. Vor diesem Hintergrund kann eine rein legierungsgruppenspezifische Sortierung nicht in allen Fällen die vollständige Einhaltung aller potentiellen Abnehmer (Aluminium-Hersteller) gewährleisten. Die in industriellen Lieferketten übliche Vermischung von Schrotten unterschiedlicher Herkunft bzw. Hersteller führt dazu, dass bestimmte

Legierungselemente – wie in diesem Fall Mg, Cu und Zn – die unternehmensspezifischen Grenzwerte überschreiten.

Zur wirtschaftlichen Herstellung eines uneingeschränkt marktfähigen 6xxx-Rezyklatprodukts kann eine legierungsspezifische Sortierung angestrebt werden, was allerdings mit einem erhöhten Mehraufwand und höheren Sortierkosten verbunden ist. Alternativ ermöglicht die LIPS-Technologie eine gezielte Negativseparation definierter Problemlegierungen aus dem Materialstrom, beispielsweise solcher mit erhöhten Gehalten an Mg, Cu und Zn.

4 Ausblick

Die Pilot-Sortierergebnisse der LIPS-Technologie der TOMRA AUTOSORT® *PULSE*-Anlage unter industriellen Bedingungen sind sehr gut und übertreffen sogar die vorangegangenen Modell-Material-Versuche. Die Schmelzergebnisse belegen, dass die Sortiertechnik für die Trennung von 5xxx- und 6xxx-Legierungsgruppen den industriellen Anforderungen sehr gut entspricht und eine wirtschaftliche Rückführung gemischter Aluminium-Neuschrotte möglich ist. Einschränkungen beim 6xxx-Produkt resultieren nicht aus der Sortiertechnik, sondern aus der heterogenen Zusammensetzung des Inputmaterials. Allerdings bleibt die legierungsspezifische Trennung bei engen Konzentrationsunterschieden innerhalb einer Legierungsgruppe und hohen Durchsätzen eine Herausforderung. Bei der technischen Entwicklung ist die Integration und Abstimmung aller Stakeholder entlang der gesamten Wertschöpfungskette ein entscheidender Erfolgsfaktor. Nur so kann die Qualität von Sekundäraluminiumprodukten signifikant erhöht und der Bedarf an Primäraluminium langfristig reduziert werden, wodurch die Aluminium-Kreislaufwirtschaft nachhaltig verbessert wird.

5 Danksagung

Die Autoren danken dem KANAL-Projektkonsortium sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) für die finanzielle Förderung des KANAL-Vorhabens im Rahmen des Technologietransfer-Programms Leichtbau (Förderkennzeichen 03LB4015D), durch die diese Publikation ermöglicht wurde.

Literatur/Quellen

[1] IN4climate.RR (2024): Die Wertschöpfungskette von Aluminium in Deutschland und Nordrhein-Westfalen – Status Quo, Herausforderungen und Perspektiven im Hinblick auf Klimaschutz und Kreislaufwirtschaft. Online verfügbar unter https://www.rheinisches-revier.nrw/fileadmin/user_upload/2024_Wertschoepfungskette_Aluminium15_cr-IN4climateRR.pdf, zuletzt geprüft am 25.11.2025.

[2] Bookhagen, Britta; Liesegang, Michael (2023): Status Quo des Recyclings bei der Metallerzeugung und -verarbeitung in Deutschland. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Online verfügbar https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/vorstellung-recyclingatlas.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 25.11.2025.

[3] Vasters, Jürgen; Franken, Gudrun (2020): Aluminium. Informationen zur Nachhaltigkeit. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Online verfügbar unter https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/aluminium.pdf?__blob=publicationFile&, zuletzt geprüft am 25.11.2025.

[4] WirtschaftsVereinigung Metalle (Hg.) (2021): Metallstatistik. Gemeinsam Aufbrechen 2020. Online verfügbar unter https://www.wvmetalle.de/publikationen/metallstatistiken, zuletzt geprüft am 25.11.2025.
[5] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (2019): LAGA PN 98 – Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen. Online verfügbar unter https://www.laga-online.de/documents/m-32_pn98_redaend_2019_mai_1562758999.pdf, zuletzt geprüft am 25.11.2025
[6] DIN EN 573-3, Aluminium und Aluminiumlegierungen – Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug – Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen; Deutsche Fassung EN 573-3:2019+A2:2023“.

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

Hannah Weber, Gerald Koinig, Julian Aberger, Thomas Fink, Alexia Tischberger-Aldrian

Objektgestützte Sortierung und Validierung von Alttextilien mit KI-gestützten Modellen im Technikumsmaßstab

***Abstract**: In Anbetracht der zunehmenden Textilabfallmengen stoßen bestehende Sammel-, Sortier- und Verwertungswege zunehmend an ihre Grenzen. Die derzeit vorherrschende manuelle Sortierung ist kosten-, personal- und zeitintensiv und angesichts des geringen Wertes von Alttextilien unwirtschaftlich. Dieser Beitrag unterstützt die automatisierte Sortierung von Alttextilien und widmet sich der Entwicklung eines objektbasierten Sortiermodells zur Klassifizierung von Alttextilien in definierte Textilklassen (nach Produktkategorien). Hierfür wurde ein eigenes Datenset aus einem Post-Consumer-Altkleidermix generiert, mit dem ein One-Stage-Klassifikationsmodell trainiert und im Technikumsmaßstab validiert wurde.*

1 Einleitung

Die vielfältigen Eigenschaften von Textilien ermöglichen ein breites Einsatzspektrum. Sie finden in Bekleidung und Schutzausrüstung, im Mobiliar und Bauwesen sowie in den Bereichen Mobilität und in medizinischen Anwendungen Einsatz und sind daher essentieller Bestandteil unseres täglichen Lebens (Tischberger-Aldrian et al., 2023). Die global produzierte Menge an Textilfasern stieg in den vergangenen Jahrzehnten von 76 Mio. Tonnen im Jahr 2010 auf 108,3 Mio. Tonnen im Jahr 2020 und erreichte im Jahr 2022 bereits 113,8 Mio. Tonnen (Industrievereinigung Chemiefaser, 2023). Zudem stieg der jährliche Pro-Kopf-Konsum an Textilien von 17 kg im Jahr 2019 auf 19 kg im Jahr 2022 (Europäisches Parlament, 2025). Der zunehmende Konsum, in Kombination mit niedrigen Preisen, kurzen Produktlebenszyklen und dem Trend „Fast Fashion“ führt weltweit zu enormen Abfallmengen (Luptáčik et al., 2021), die sich derzeit jährlich auf etwa 92 Mio. Tonnen belaufen (Shamsuzzaman et al., 2025). Prognosen zufolge wird dieses Aufkommen bis 2030 auf über 148 Mio. Tonnen ansteigen (Shamsuzzaman et al., 2025). Darüber hinaus fallen jährlich in der EU rund 5,8 Mio. Tonnen an Textilabfällen an, welches einem Pro-Kopf-Abfallaufkommen von 11,3 kg entspricht (Europäische Kommission, 2022). In Anbetracht der künftig stark steigenden Abfallmengen erreichen die bestehenden Sammel-, Sortier-, und Verwertungswege zunehmend ihre Kapazitätsgrenzen (Feldbaumer et al., 2023). Die Entwicklung automatischer, sensorgestützter Sortieranlagen, die der hohen Vielfalt und Komplexität textiler Abfallströme gerecht werden, ist daher von großer Bedeutung. Die derzeit vorherrschende manuelle Sortierung erfordert einen hohen finanziellen, personellen und zeitlichen Aufwand und erweist sich angesichts des geringen Wertes von Alttextilien als unwirtschaftlich (Tischberger-Aldrian et al., 2023). Nah-Infrarot-Spektroskopie (NIR) ermöglicht die Faserklassifizierung textiler Abfallströme ohne Probenpräparation, stößt jedoch bei Verschmutzungen, Feuchtigkeit, Beschichtungen und Accessoires an ihre Grenzen. Zudem erschweren schwarze und graue Farbtöne sowie dünne und mehrschichtige Textilien die Identifikation (Cura et al., 2021, Tischberger-Aldrian et al., 2023). Kamerabasierte Technologien in Kombination mit Künstlicher Intelligenz (KI) bieten eine vielversprechende und kostengünstige Methode, anforderungsspezifische Sortierstrategien für Recycling und Wiederverwendung zu ermöglichen und Limitationen der NIR-Technologie zu umgehen. Der vorliegende Beitrag widmet sich der Entwicklung eines objektbasierten Sortiermodells zur Klassifizierung von Alttextilien in definierte Textilklassen (Produktkategorien). Bildbasierte Klassifikationssysteme erfordern hierfür Datensets, welche aus annotierten Bildaufnahmen bestehen und

mittels Bounding-Boxes den jeweiligen Klassen zugeordnet werden. Obwohl im Textilbereich eine Vielzahl von Fashion-Datasets verfügbar sind, existieren spezifische Second-Hand-Datasets nur in sehr begrenztem Umfang. Für industrielle Sortierprozesse ist es jedoch unabdingbar, realitätsnahe Bedingungen abzubilden. Aus diesem Grund ist die Generierung eines eigenen Datensatzes, der sowohl die Vielfalt der relevanten Textilklassen innerhalb einer Alttextilfraktion widerspiegelt als auch unterschiedliche Aufgabeszenarien am Förderband simuliert, von großer Bedeutung.

2 Material und Methoden

2.1 Probenmaterial und Datensatzgenerierung

Als Probenmaterial dienten rund 2.500 kg Alttextilien aus österreichischen Systemen zur getrennten Sammlung von Alttextilien. Dies entspricht einer Stückzahl von etwa 11.740 Textilien. Das Material wies eine starke Inhomogenität auf und wurde weder vorsortiert noch vorbehandelt, um einen Post-Consumer-Alttextilienmix möglichst repräsentativ abzubilden. Der Altkleidermix setzte sich aus verschiedensten Textilkategorien zusammen, die zunächst den Kategorien Erwachsenenbekleidung und Kinderbekleidung zugeordnet werden konnten. Bevor die Aufnahmen und somit jeweiligen Datensätze generiert wurden, wurde die gesamte Probenmenge zunächst händisch in Erwachsenenbekleidung und Kinderbekleidung unterteilt. Parallel dazu, erfolgte eine händische Sortierung der Erwachsenenbekleidung in 35 Textilklassen sowie der Kinderbekleidung in 29 Textilklassen, um eine systematische Erfassung jeder Kategorie sowie zwei unabhängige Datensets sicherzustellen. Die Textilkategorien der Erwachsenenbekleidung umfassten einerseits verschiedene Oberteile wie T-Shirts, Pullover, Hoodies, Jacken, Westen, Strickwaren, Hemden, Blusen sowie Sportoberteile. Andererseits beinhalteten sie unterschiedliche Unterteile darunter diverse lange und kurze Hosenmodelle wie Jeans, Stoff-, Jogging- und Sporthosen sowie Röcke und Kleider. Darüber hinaus waren weitere Textilklassen wie Jumpsuits, Unterwäsche, Abendbekleidung, Bademode, Heimtextilien sowie Accessoires wie Taschen, Rucksäcke, Schals, Gürtel, Schuhe, Handschuhe sowie Handyhüllen im Datenset enthalten. Da für den vorliegenden Beitrag ausschließlich das Erwachsenendatenset zum Training des Sortiermodells verwendet wurde, wird auf die Textilklassen der Kinderbekleidung nicht näher eingegangen. Anschließend wurde im Technikumsmaßstab mithilfe eines Sensorstands, bestehend aus einer RGB-Kamera und einem Förderband, ein Datensatz mit rund > 65.000 Aufnahmen generiert. Hinzuzufügen ist, dass die Alttextilien in geordneter, gefalteter, verknäuelter sowie überlappender Form aufgegeben wurden, um die Variabilität und realen Bedingungen einer industriellen Sortieranlage zu imitieren. Die generierten Bilddaten dienen anschließend als Grundlage für das Training des KI-basierten Sortiermodells.

2.2 Annotation der Aufnahmen mittels AVAW CVAT

Mithilfe eines semi-automatischen Computer Visions Annotations Tools (AVAW CVAT Version 0.0.4), welches vom Lehrstuhl für Abfallverwertungtechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben entwickelt wurde (Koinig et al., 2024), wurden die Aufnahmen anschließend annotiert. Grundsätzlich ermöglicht das Tool die Annotation von Aufnahmen unter Verwendung vortrainierter Modelle als auch Standardmodelle. Zunächst wurde ein Standard YOLOv8 Modell geladen und etwa 500 Aufnahmen annotiert bzw. nachannotiert. Anschließend wurde mit den annotierten Bildern ein Modell trainiert, um die Genauigkeit der Bounding Box Darstellungen zu verbessern, da insbesondere längere Textilien nicht vollständig erfasst wurden. Darüber hinaus wurden Hosenbeine, Taschenschnallen, Trageriemen häufig als separate Objekte erkannt. Zusätzlich ist festzuhalten, dass Textilien mit einer ähnlichen Farbe zum Förderband nur teilweise oder überhaupt nicht erfasst wurden. Um die automatische Annotation zu verbessern, wurden ungenaue

Vorhersagen manuell korrigiert sowie das Bounding Box Modell mehrfach iterativ trainiert. Hinzuzufügen ist, dass anschließend das gesamte Datenset einer vollständigen manuellen Validierung unterzogen wurde. Zusätzlich wurden verschiedenste Hintergrundaufnahmen generiert, um variierende Lichtverhältnisse sowie verschiedene Bereiche des Förderbands, welche leichte Unterschiede in Farbe und Abnutzung aufweisen, zu berücksichtigen. Die iterative Korrektur der Annotationen mit wiederholten Trainingszyklen führte zu einer deutlichen Steigerung der Bounding Box Genauigkeit über alle Textilklassen hinweg. Somit können zukünftig Textile Datensätze weitgehend automatisiert und effizient annotiert werden.

3 Training, Evaluierung und Optimierung des Klassifikationsmodells

Um ein effizientes Recycling sowie eine hohe Wiederverwendungsrate von Alttextilien zu ermöglichen, sind spezifische Qualitätsanforderungen an die Sekundärrohstoffe unabdingbar. Für das Recycling stehen insbesondere die chemische Zusammensetzung, Farbeigenschaften und der Anteil an Störstoffen im Vordergrund, während für die Wiederverwendung der Zustand sowie markenspezifische Anforderungen relevant sind. Das übergeordnete Ziel des Sortierprozesses besteht darin, abhängig vom jeweiligen Verwertungsweg eine möglichst hohe Anreicherung der relevanten Kriterien zu erreichen. Die Sortierung in definierte Textilklassen ermöglicht eine Anreicherung charakteristischer textileigener Merkmale und trägt dazu bei, in industriellen Sortierstraßen und in Kombination mit anderen Sortiertechnologien eine hohe Reinheit der Zielfraktionen zu gewährleisten. Im Rahmen dieses Beitrags wurde eine One-Stage-Modellarchitektur trainiert, die das Tracking, die Detektion und die Klassifikation von Alttextilien ermöglicht. Anschließend wurde das Modell im Technikumsmaßstab getestet, eine Performance-Evaluation vorgenommen und weitere Modellparameter optimiert. Prinzipiell ermöglichen One-Stage-Modelle die Detektion und Klassifikation in einem Schritt und eignen sich daher besonders für Echtzeitanwendungen. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, wurde ein Datensatz mit 35 Textilklassen der Erwachsenenbekleidung (Adult Clothing Dataset, ACD) generiert und anschließend mithilfe eines YOLOv8-Modells von Ultralytics trainiert. Die Modellversion YOLOv8 wurde ausgewählt, da es sich um eine der stabilsten und zugleich weitverbreitesten Ultralytics Modellarchitekturen handelt. Das Training erfolgte unter Standardeinstellungen auf einem AMD Ryzen 9 9950X 16 Core RTX 5090 GPU. Das Modell wurde insgesamt für 300 Epochen und unter Anwendung von Standardparametern trainiert. Dabei wurde ein zufälliger Datensplit im Verhältnis von 70 % Trainings-, 20 % Validierungs- und 10 % Testdaten erzeugt, wodurch die Unabhängigkeit der Datensätze voneinander gewährleistet wird. Die Ergebnisse und die Confusion Matrix ergaben eine Genauigkeit von $mAP_{50\text{-}95} > 70\%$, jedoch traten im Testset vereinzelt Fehlklassifikationen auf. Die Validierung des Modells im Technikumsmaßstab erfolgte mithilfe eines NVIDIA Jetson ORIN 64 GB Development Kits, da es eine hohe Inferenzgeschwindigkeit (< 15 ms als PyTorch Modell) und eine präzise Detektion bei vergleichsweise niedrigen Kosten ermöglicht. Die In-Line-Evaluierung ergab im Vergleich zur PC-Evaluierung vereinzelt Fehlklassifikationen. Vor allem lange und große Textilklassen wurden häufig als Heimtextilien klassifiziert. Darüber hinaus zeigte sich, dass dasselbe Kleidungsstück in aufeinanderfolgenden Aufnahmen teils unterschiedlich klassifiziert wurde. Das Datenset repräsentiert einen typischen Alttextilienmix mit variierenden Stückzahlen der Textilklassen, weist jedoch ein starkes Klassenungleichgewicht auf. Zur Verbesserung der Modellperformance wurden verschiedenste Parameter basierend auf einem Hyperparameter-Tuning angepasst und getestet. Daneben sollen künftig unterschiedliche Datenstrukturen untersucht werden, um die Sortierentscheidungen zu erleichtern und stufenweise zu optimieren. Um das leistungsstärkste Modell für das jeweilige Datenset zu identifizieren, werden künftig drei verschiedene YOLO-Versionen YOLOv8, YOLOv11 und YOLOv12, trainiert. Hinzu kommt, dass zusätzlich verschiedene YOLO-Modellgrößen (n, s, m, l und x) berücksichtigt werden. Zentrale

Auswahlkriterien sind dabei der Vergleich der Klassifikationsgenauigkeit sowie der Verarbeitungsgeschwindigkeit mithilfe des NVIDIA Jetson im Technikumsmaßstab.

Danksagung

Dieser Beitrag wird als Teil des Forschungsprojekts „StraTex“ (FO999917957) von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft gefördert.

Literatur/Quellen

Tischberger-Aldrian, A.; Stipanovic, H.; Kuhn, N.; Bäck, T.; Schwartz, D.; Koinig, G. (2023): Automatisierte Textilsortierung – Status quo, Herausforderungen und Perspektiven. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 76(1–2), 63–79. https://doi.org/10.1007/s00506-023-01004-5

Shamsuzzaman, Md.; Al. Mamun, Md. A.; Ul Hasan, H M R.; Hassan, R.; Zulkernine, A.; Atik, Md. A. R.; Islam, M. (2025): Fashion Circularity: Potential of Reusing and Recycling Remnant Fabric to Create Sustainable Products. Sustainability, 17(5), 2010. https://doi.org/10.3390/su17052010

Europäische Kommission (2022): Directorate General for Environment. Factsheet on Textiles: Sustainable and circular textiles by 2030. Publications Office. https://doi.org/10.2779/122408

Feldbaumer, M.; Granzer-Sudra, K.; Ganglberger, E. (2023): Sekundärrohstoffe für die österreichische Textilindustrie. Kurzstudie mit Handlungsempfehlungen für die österreichische FTI-Politik. Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik (ÖGUT), Wien. In Berichte aus Energie- und Umweltforschung (Vol. 4). (BMK). Internet: https://www.oegut.at/downloads/pdf/sekundaerrohstoffe-textilindustrie/schriftenreihe-2023-04-textilindustrie.pdf (Zugriff: 25.11.2025)

Industrievereinigung Chemiefaser (2023): Weltweite Produktionsmenge von Chemie- und Textilfasern im Zeitraum von 1975 bis 2022 (in 1.000 Tonnen). In Statista. Internet: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/6331/umfrage/weltweite-produktionsmenge-von-textilfasern-seit-1975/ (Zugriff: 25.11.2025)

Luptáčik, P.; Schneider, H. W.; Pöchhacker-Tröscher, G.; Scherk, J. (2021): Anreize für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft im Textil- und Bekleidungssektor in Österreich. Analyse von Rahmenbedingungen, Instrumenten und Handlungsperspektiven. Im Auftrag des BMK)

Europäisches Parlament (2025): „Fast Fashion“: EU-Gesetze für einen nachhaltigeren Textilkonsum. Internet: https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20201208STO93327/fast-fashion-eu-gesetze-fur-einen-nachhaltigeren-textilkonsum (Zugriff: 25.11.2025)

Cura, K.; Rintala, N.; Kamppuri, T.; Saarimäki, E.; Heikkilä, P. (2021): Textile Recognition and Sorting for Recycling at an Automated Line Using Near Infrared Spectroscopy. Recycling, 6(1), 11. https://doi.org/10.3390/recycling6010011

Koinig, G.; Lorber, B.; Aberger, J.; Tischberger-Aldrian, A. (2024). AVAW CVAT (Version 0.0.4) [Computer software]. https://github.com/AVAWLe-oben/AVAW_CVAT

Kontakt

Dipl.-Ing., Hannah Weber, Wissenschaftliche MitarbeiterIn
Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Tel.-Nr. + 43 660 517 90 90
E-Mail: hannah.weber@unileoben.ac.at
Homepage: https://www.avaw-unileoben.at/

Alexandra Axt, Isabel Kaphahn, Peter Quicker

Chemisches Recycling polyamidreicher Bodensysteme mittels Pyrolyse

***Abstract**: Die geringe Recyclingquote synthetischer Fasern, trotz des starken Wachstums der Faserproduktion, stellt eine zentrale Herausforderung für eine zirkuläre Textilwirtschaft dar. Auch textile Bodenbeläge, welche teilweise aus erheblichen Mengen Polyamid 6 (PA 6) bestehen, werden aufgrund von komplexen Verbundstrukturen bislang überwiegend energetisch verwertet, wodurch ein großes Recyclingpotenzial ungenutzt bleibt. Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung der Pyrolyse als chemisches Recyclingverfahren zur Rückgewinnung von Monomeren aus PA6-haltigen Teppichmaterialien.*

Dazu wurden industrielle Bodenbeläge im Labor- und Technikumsmaßstab pyrolysiert. Die Pyrolyse im Labormaßstab diente zur Analyse des temperaturabhängigen Zersetzungsverhaltens. Bei der Pyrolyse im Technikumsmaßstab wurde die entstehende Gasphase temperaturabhängig fraktioniert, kondensiert und charakterisiert. Anschließend wurde das Zielprodukt ε-Caprolactam durch eine fraktionierte Destillation aufgereinigt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Pyrolyse grundsätzlich geeignet ist, ε-Caprolactam als Hauptprodukt zu gewinnen, während Nebenprodukte in überschaubaren Mengen entstehen. Die Arbeit demonstriert die prinzipielle Machbarkeit eines chemischen Recyclingpfades für komplexe Teppichverbundsysteme.

1 Einleitung

Die globale Faserproduktion ist in den vergangenen Jahrzehnten stark angestiegen und hat sich von rund 58 Mio. t im Jahr 2000 auf 124 Mio. t im Jahr 2023 mehr als verdoppelt [1]. Demgegenüber stagniert der Anteil recycelter Fasern und lag 2023 bei lediglich 7,7 %. Besonders gering ist der Einsatz von Pre- und Post-Consumer-Rezyklaten bei synthetischen Fasern, deren Anteil unter 1 % liegt [2].

Textile Bodenbeläge weisen im Vergleich zu anderen Textilprodukten besonders hohe Anteile an Polyamid-6 auf und tragen erheblich zum Abfallaufkommen bei. In der EU bestehen Teppichfasern überwiegend aus PP (107 kt), PA6 (49 kt) und PA6.6 (39 kt), ergänzt durch geringere Mengen an PET, Wolle oder Naturfasern [3]. In Deutschland besitzen Bodenbeläge einen Anteil von etwa 8 % am Sperrmüllaufkommen, entsprechend rund 225 000 t pro Jahr. Die stoffliche Verwertung ist in der EU vernachlässigbar: Weniger als 3 % der Teppichabfälle werden recycelt, während etwa 60 % deponiert und der Rest überwiegend energetisch verwertet wird [3].

Vor diesem Hintergrund gewinnen chemische Recyclingverfahren zunehmend an Bedeutung, da sie die Möglichkeit bieten, auch komplexe Verbundsystem stofflich zu verwerten. Die Pyrolyse stellt hierbei ein thermisches Konversionsverfahren dar, bei dem organische Materialien unter Sauerstoffausschluss zersetzt und die entstehenden Produkte aus der Gasphase kondensiert werden [4]. Im Vergleich zu Polypropylen (PP) und Polyamid 6.6 besitzt Polyamid 6 ein höheres Potenzial für ein chemisches Recycling, da es sich unter Pyrolysebediungen überwiegend in sein Monomer ε-Caprolactam depolymerisiert. Dieses Monomer kann nach entsprechender Reinigung erneut zur Polymerisation von PA 6 eingesetzt werden, ohne Qualitätsverluste gegenüber dem Primärmaterial zu zeigen [4,6]. Während die Pyrolyse von reinem PA6 so-

wie ausgewählten Polymermischungen bereits untersucht wurde [5-7], liegen bislang kaum Studien zur Behandlung realer, abfallstämmiger Teppichverbundsysteme vor. Entsprechend besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Übertragbarkeit bekannter Reaktionsmechanismen auf komplexe, heterogene Materialien.

2 Material und Methoden

2.1 Material

Untersucht wurde das pyrolytische Zersetzungsverhalten textiler Bodenbeläge im Labor- und Technikumsmaßstab. Als Probenmaterial diente ein Industrieabfall der Firma Findeisen (Bodenvlies FINETT Select), dessen definierte Zusammensetzung reproduzierbare Versuche ermöglichte. Der Schichtaufbau des Materials ist in Tabelle 1 dargestellt.

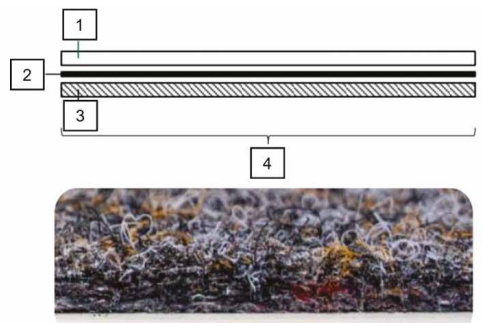


Abbildung 1: Darstellung des Querschnitts des untersuchten Bodenbelags FINETT Select mit 1) Nutzschicht, 2) Trägerschicht, 3) Rückenschicht und 4) Vollbad-Imprägnierung

Tabelle 1: Zusammensetzung der Einzelschichten des untersuchten Bodenbelags FINETT Select

	Zusammensetzung [M.-%]	Anteil [M.-%]
1) Nutzschicht	100 % Polyamid 6	42,76
2) Trägerschicht	Gewebe aus 100% Polypropylen	3,1
3) Rückenschicht	Recyclingfaser aus ca. 40% Polyacrylnitril 30% Viskose 10% Baumwolle 10% Polyamid 5% Wolle 5% Polyester	34,83
4) Vollbad-Imprägnierung	Copolymer aus Vinylacetat und Ethylen mit Zusatz eines wasserlöslichen Salzes einer organischen Säure (Carbonsäuresalz)	19,31

2.2 Pyrolyse im Labormaßstab

Im Labormaßstab wurden thermogravimetrische Analysen (TGA) der zerkleinerten Gesamtprobe sowie ausgewählter Einzelschichten durchgeführt. Die Messungen erfolgten unter Argonatmosphäre mit einer Heizrate von 5 K/min bis zu einer Endtemperatur von 700 °C.

2.3 Pyrolyse im Technikumsmaßstab

Auf Basis der TGA-Ergebnisse wurde ein Versuchskonzept für einen Pyrolyseprüfstand im Technikumsmaßstab ausgearbeitet, der eine temperaturabhängige fraktionierte Kondensation der Pyrolysegase erlaubt. In zwei Versuchsreihen wurden jeweils 2 kg Bodenbelag unter Stickstoffatmosphäre bis zu einer Ofentemperatur von 500 °C erhitzt. Die entstehenden Gase wurden auf den Temperaturniveaus fraktioniert über zwei Kondensationsstufen erfasst, die im Rahmen der TGA-Versuche ermittelt wurden. Die Kondensate wurden mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) qualitativ analysiert. Die Quantifizierung des ε-Caprolactams erfolgte mittels GC-MS mit Flammenionisationsdetektor (FID). Zur Abtrennung und Aufreinigung des Monomers wurde anschließend eine fraktionierte Destillation durchgeführt, deren Destillate erneut analytisch untersucht wurden.

3 Ergebnisse

3.1 Pyrolyse im Labormaßstab

Die thermogravimetrischen Analysen in Abbildung 2 zeigen, dass die Zersetzung des untersuchten Bodenbelags ab etwa 230 °C und bis 450 °C anhält. In diesem Temperaturintervall werden rund 85 M.-% der Masse entgast. Die Massenabnahme erfolgt über einen breiten Temperaturbereich mit zwei lokalen Maxima bei etwa 330 °C und 400 °C. Die Nutzschicht zeigt ein für Polyamid 6 typisches Zersetzungsverhalten mit einem ausgeprägten Peak zwischen 350 °C und 420 °C [5]. Die Rückenschicht weist hingegen zwei getrennte Zersetzungsbereiche auf, die auf die heterogene Zusammensetzung zurückzuführen sind.

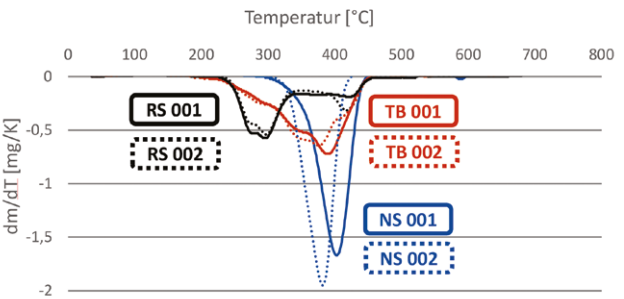


Abbildung 2: Darstellung der DTG -Ergebnisse von jeweils zwei Messungen des textilen Bodenbelags (TB), der Rückenschicht (RS) und der Nutzschicht (NS)

3.2 Pyrolyse im Technikumsmaßstab

Bei den Pyrolyseversuchen im Technikumsmaßstab zum temperaturabhängigen Zersetzungsverhalten wurden Kondensatausbeuten von insgesamt etwa 30 Ma.-% erzielt, die sich annähernd gleichmäßig auf die beiden Fraktionen verteilten. Die GC-MS-Analysen zeigen, dass ε-Caprolactam in beiden Fraktionen die Hauptkomponente darstellt. Nebenprodukte sind Nitrile, Amide sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe in geringeren Anteilen. Zwischen den beiden Kondensatfraktionen konnten keine signifikanten Unterschiede in der Produktzusammensetzung festgestellt werden.

Die Bildung von Nebenprodukten mit Nitrilgruppen und Amiden lässt sich auf typische Zerfallsmechanismen stickstoffhaltiger Polymerbestandteile in der Rückenschicht zurückführen [8]. Weitere carbonylhaltige Verbindungen sind vermutlich auf den thermischen Abbau der Imprägnierung zurückzuführen. Eine der Kondensatfraktionen wurde einer fraktionierten Destillation unterzogen, wobei rund 60 % des enthaltenen ε-Caprolactams in aufgereinigter Form abgetrennt werden konnten.

4 Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass die pyrolytische Behandlung textiler Bodenbeläge mit hohem Polyamid-6-Anteil grundsätzlich geeignet ist, ε-Caprolactam als wertvolles Monomer zurückzugewinnen. Damit wird die prinzipielle technische Machbarkeit eines chemischen Recyclingpfades für komplexe Teppichverbundsysteme aufgezeigt. Die temperaturabhängige Fraktionierung der Kondensate führte bisher nur zu geringen Unterschieden in der Produktzusammensetzung. Für eine weitergehende Prozessoptimierung sind daher

detailliertere zeit- und temperaturaufgelöste Analysen der Gasphase erforderlich. Ein wesentlicher nächster Schritt besteht in der Übertragung der Ergebnisse auf heterogene Post-Consumer-Teppichabfälle. Erst durch eine Validierung unter realistischen Abfallbedingungen kann die industrielle Relevanz und Robustheit des Verfahrens im Sinne einer geschlossenen textilen Kreislaufwirtschaft abschließend bewertet werden.

Danksagung

Das Projekt *TEPPICH* wird durch das *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)* im Rahmen des Programms *Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)* gefördert.

Literatur/Quellen

[1] Textile Exchange (2024): Materials Market Report 2024 – The Global Fiber Market.
[2] Napolano, Loredana; Foschi, Jacopo; Caldeira, Carla; Huygens, Dries; Sala, Serenella (2025): Understanding textile value chains: Dynamic Probabilistic Material Flow Analysis of textile in the European Union. In: Resources, Conservation and Recycling 212, S. 107888. DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107888.
[3] Jörg Wagner; Sonja Steinmetzer; Laura Theophil; Anna-Sophie Strues; INTECUS GmbH; Nicole Kösegi: Evaluation der Erfassung und Verwertung ausgewählter Abfallströme zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft.
[4] Tom Duhoux, Edwin Maes, Martin Hirschnitz-Garbers, Karolien Peeters, Lise Asscherickx (2021): Study on the technical regulatory economic and environmental. Final Report.
[5] Ingo Lüderwald; Friedhelm Merz; Manf*red Rothe: Mechanism of the degradation of polyamides. In:* Die Angewandte Makromolekulare Chemie 1978 (67), Artikel 1011, S. 193–202.
[6] Xu, Donghua; Wei, Yibing; Xiao, Haoyu; Zhang, Tengyue; Sheng, Zichun; Yang, Haiping et al. (2026): Pyrolysis kinetics, volatile evolution, and backbone degradation mechanisms of typical nitrogen-containing plastics based on TG-FTIR-GC/MS and density functional theory. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 193, S. 107418. DOI: 10.1016/j.jaap.2025.107418.
[7] Perez, Barbara Alejandra; Jayarama Krishna, J. V.; Toraman, Hilal Ezgi (2023): Insights into co-pyrolysis of polyethylene terephthalate and polyamide 6 mixture through experiments, kinetic modeling and machine learning. In: *Chemical Engineering Journal* 468, S. 143637. DOI: 10.1016/j.cej.2023.143637.
[8] Janus, Rafał; Natkański, Piotr; Wach, Anna; Drozdek, Marek; Piwowarska, Zofia; Cool, Pegie; Kuśtrowski, Piotr (2012): Thermal transformation of polyacrylonitrile deposited on SBA-15 type silica. In: *J Therm Anal Calorim* 110 (1), S. 119–125. DOI: 10.1007/s10973-011-2157-6.

Kontakt
Alexandra Axt, M. Sc., Wissenschaftliche Mitarbeiterin
L.u.F. Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft
Tel.-Nr. 0241 90-80715
E-Mail: axt@teer.rwth-aachen.de
Homepage: www.teer.rwth-aachen.de

TEIL 2
Thermische Verfahren

Leitung: Prof. Dr. Mario Mocker

Falk Oberreich, Fabian Gievers, Andreas Glimm

Pyrolytische Verwertung von naturfaserbasierten Alttextilien

***Abstract**: Das stoffliche Recycling von Alttextilien ist mit erheblichen Herausforderungen verbunden, da nur ein geringer Anteil für ein Faser-zu-Faser-Recycling geeignet ist. Diese Arbeit untersuchte das Potenzial und die technische Durchführbarkeit der Pyrolyse als Verwertungsweg für naturfaserbasierte Alttextilien. Ziel war die Bewertung der technischen Umsetzung im Technikums- und Labormaßstab, der Qualität der entstehenden Pflanzenkohlen sowie des ökologischen und ökonomischen Potenzials. Hierfür wurden Alttextilien analysiert, die zur energetischen Verwertung vorgesehen waren. Nach manueller Sortierung betrug der Anteil baumwollbasierter Textilien etwa 12 %. Die naturfaserbasierten Textilien wurden zerkleinert, mit Maisstärke und Wasser vermischt, pelletiert und in einer kontinuierlichen Pyrolyseanlage bei 600 °C karbonisiert. Die resultierenden Pyrolysekohlen wiesen einen Kohlenstoffgehalt von 87,1 % und einen Heizwert von 31,8 MJ/kg auf. Die organischen Schadstoffanteile waren gering. Hervorzuheben sind das niedrige H/C-Verhältnis von 0,2755 mol_H/mol_C und das O/C-Verhältnis von 0,0258 mol_O/mol_C. Nach den Kriterien des European Biochar Certificate (EBC) erreichte die Kohle nahezu die Klasse EBC-Agro, aufgrund erhöhter Kupfergehalte jedoch lediglich die Klasse EBC-Rohstoffe. Die ökologische und ökonomische Bewertung ergab einen Carbon Footprint von etwa 837 kg CO_2-äq./Mg verwerteter Baumwollaltkleidung sowie ein Kohlenstoffspeicherungspotenzial von ca. 377 kg CO_2-äq./Mg nach EBC. Unter optimalen Rahmenbedingungen könnte ein Gewinn von 10,60 €/Mg erzielt werden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse positive Ansatzpunkte zur Durchführbarkeit der pyrolytischen Verwertung von naturfaserbasierten Alttextilien und eröffnen Perspektiven für eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Kreislaufwirtschaft.*

1 Einleitung

Textilien sind ein wesentlicher Bestandteil des täglichen Lebens, insbesondere in Form von Bekleidung zum Schutz vor Umwelteinflüssen. Infolge von Industrialisierung, Digitalisierung und Trends wie Fast Fashion sind sowohl der Textilkonsum als auch das Alttextilienaufkommen in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Für Deutschland prognostiziert der Fachverband Textilrecycling im Jahr 2025 ein Alttextilienaufkommen von 17 kg pro Person [1]. Mit Inkrafttreten der Getrenntsammelpflicht für Textilien am 01.01.2025 sind öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger gemäß KrWG § 20 Absatz 2 Satz 1 Nummer 6 verpflichtet eine getrennte Entsorgung von Alttextilien anzubieten. Die derzeitige Praxis der Textilabfallentsorgung ist durch fehlerhafte Fraktionierung geprägt, die auf unzureichende Informationen zur korrekten Zuordnung von Textilien zurückzuführen ist. Dies führt zu einer überproportionalen Sammlung kontaminierter und nicht verwertbarer Textilien in Depotsammelcontainern, obwohl diese gemäß den Entsorgungsrichtlinien dem Restmüll zuzuordnen wären. Zusätzlich verstärkt Fast Fashion das Alttextilienaufkommen, da qualitativ minderwertige Kleidungsstücke in großen Mengen und zu niedrigen Preisen vertrieben werden und etwa die Hälfte dieser Textilien innerhalb eines Jahres entsorgt wird [2]. Entsprechend der Abfallhierarchie werden jährlich etwa 185.000 Mg Altkleidung durch den Second-Hand-Markt oder durch Schenkungen wiederverwendet. Beim Recycling kommen derzeit überwiegend mechanische Verfahren zum Einsatz, wodurch in Deutschland jährlich 0,7 bis 0,85 Millionen Mg Alttextilien zu Putzlappen, Malervliesen und Dämmstoffen downgecycelt

werden. Aufgrund der Faserverkürzung sind die gewonnenen Recyclingfasern nicht für erneute Spinnprozesse geeignet, weshalb der Anteil des Faser-zu-Faser-Recyclings mit etwa einem Prozent sehr gering ist [3]. Als letzter klassischer Verwertungsweg dient die energetische Verwertung in Müllverbrennungsanlagen. Von der getrennt gesammelten Altkleidung werden bis zu 144.000 Mg pro Jahr energetisch verwertet, hinzu kommen über 700.000 Mg Alttextilien, die über den Haus- und den Sperrmüll entsorgt werden [4]. Bisherige Forschungsarbeiten zur Pyrolyse von Alttextilien konzentrierten sich überwiegend auf synthetische Chemiefasern, insbesondere Polyester, sowie auf die flüssigen und gasförmigen Produkte des thermo-chemischen Konversionsprozesses. Der Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit lag daher auf der Machbarkeit und technischen Umsetzung der Pyrolyse naturfaserbasierter Alttextilien sowie auf der qualitativen Bewertung der Pyrolysekohlen und der ökologischen und ökonomischen Analyse dieses Verwertungsweges.

2 Methodik

2.1 Aufbereitung und Pyrolyse

Von einem Sortier- und Aufbereitungsunternehmen für Altkleidung wurden 300 kg Alttextilien aus der zur energetischen Verwertung vorgesehenen Fraktion bereitgestellt. Zur Bestimmung der Faserzusammensetzung wurden die Etiketten analysiert und die Textilien manuell nach Faserarten sortiert. Der massenbezogene Anteil reiner Baumwolle betrug etwa 12 %. Bei rund einem Viertel der Kleidungsstücke war die Zusammensetzung aufgrund fehlender oder unleserlicher Etiketten nicht identifizierbar. Als Störstoffe wurden überwiegend Pailletten und Strasssteine festgestellt, während Knöpfe und Reißverschlüsse nur in geringer Anzahl vorhanden waren. Störstoffe wurden manuell entfernt, wobei der Störstoffanteil bei ca. 5 % lag. Die sortierten Textilien wurden in drei Fraktionen unterteilt: Baumwolle (BW), Baumwolle mit Elasthananteil (BW95) und Viskose (VI). Anschließend erfolgte die Zerkleinerung in einer Schneidmühle mit einem Siebkorb (9 mm Maschenweite). Für die Pelletierung wurden die zerkleinerten Textilien mit Maisstärke und Wasser vermischt, wobei ein massebezogenes Mischungsverhältnis von 70 % Textil, 20 % Stärke und 10 % Wasser die höchste Pelletstabilität aufwies. Eine Reduktion des Bindemittelanteils oder eine Erhöhung der Feuchte führte zu einer geringeren Stabilität und zum Zerfall der Pellets während oder nach dem Trocknungsprozess. Zur Feuchtereduktion wurden die Pellets mindestens acht Stunden bei 105 °C getrocknet

Abbildung 1: Hergestellte Baumwollpellets und die daraus erzeugte Pflanzenkohle

und anschließend auf einem Schwingsieb mit einer Maschenweite von 5 mm klassiert. Der Feinanteil betrug 3,35 %. Die Pyrolyseversuche wurden mit einer kontinuierlichen Laborpyrolyseanlage des Typs „PYREKA“ der PYREG GmbH durchgeführt. Dabei wurden eine inerte Atmosphäre mit Stickstoff, eine Reaktortemperatur von 600 °C sowie eine Verweilzeit von 15 min eingestellt. Die Probenahmen erfolgten gemäß LAGA PN 98 unter Anwendung von Verfahren und Technik wie die Probenahme nach Ausbreitung, Riffelteiler und Drehrohrprobenteiler zur Herstellung repräsentativer Proben. Der Gehalt an organischer Trockensubstanz der Pellets (Abb. 1) wurde mittels Trocknung und Veraschung bestimmt, der Brennwert der Pellets als auch der Pyrolysekohlen (Abb. 1) wurden kalorimetrisch ermittelt. Ergänzend wurden die für das European Biochar Certificate (EBC) erforderlichen Analysen in einem externen und akkreditierten Labor durchgeführt.

2.2 Ökologische und ökonomische Betrachtung

Bei der ökologischen Betrachtung wurde ein vereinfachter Carbon Footprint für die BW Fraktion berechnet. Das Vorgehen orientierte sich an einer gate-to-gate Ökobilanz. Zur Berechnung wurde der Stromverbrauch während der Aufbereitung und Pyrolyse als auch die Abgase während des Transportes und der Pyrolyse einbezogen. Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wurden verschiedene Szenarien berechnet. Dabei basierten die Szenarien auf folgenden Parametern: Ausgaben durch Investitionskosten für die Maschinen, Energie-, Material- und Personalkosten und ggf. Mietkosten. Hinzu kamen die Einnahmen, die durch den Verkauf der überschüssigen Prozessabwärme, der nach EBC zertifizierten Pflanzenkohle und der damit zusammenhängenden Gewinne durch die Kohlenstoffsequestrierung der Pflanzenkohle erzeugt werden.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die massebezogene Kohleausbeute (Verhältnisse Output/Input) betrug 13,9 %. Für die anderen Fraktionen (BW 95 und VI) lagen die Werte ebenfalls in diesem Bereich. Weitere vergleichende Ergebnisse können in Tabelle 1 nachvollzogen werden. Die Untersuchungen der Pyrolysekohle aus BW nach EBC ergaben, dass sowohl die organischen Schadstoffgehalte als auch die Schwermetallgehalte der Pyrolysekohlen eingehalten werden, um diese mindestens in die Klasse EBC-Rohstoffe einzuordnen. Nur der Kupfergehalt lag mit 195 mg/kg über dem Grenzwert von 100 mg/kg für die Klasse EBC-Agro. Der Sauerstoffgehalt lag bei 3 % und der Wasserstoffgehalt bei 2 %. Daraus wurden die molaren Verhältnisse von 0,0258 mol_O/mol_C und 0,2755 mol_H/mol_C berechnet. Aufgrund dieser geringen Verhältnisse weist die Kohle eine sehr hohe Stabilität bezogen auf den Einsatz im Boden zur Kohlenstoffsequestrierung auf [5].

Tabelle 1: Eigenschaften der Pellets und der Pyrolysekohle

Fraktion	Kohlenstoff [%]	Schwefel [%]	Brennwert [MJ/kg]	oTS [% TS]
Pellets				
BW	48,1	0,20	17,05	99,2872
BW95	49,2	0,21	17,78	99,2907
VI	47,3	0,20	17,39	99,4604
Kohlen				
BW	87,1	0,20	32,3	

Über den Verwertungsweg werden 79 kg CO_2-äq./Mg durch den Transport, 126 kg CO_2-äq./Mg durch den relativen hohen Stromverbrauch der Maschinen unter Laborbedingungen und 1.071 CO_2-äq./Mg direkt als Abgas durch die Pyrolyse emittiert. Durch die Prozessabwärme zur Substitution fossiler Wärmeenergie findet eine Gutschrift von 439 kg CO_2-äq./Mg statt. Somit liegt der Carbon Footprint des Verwertungsweges bei 837 kg CO_2-äq./Mg Baumwoll-Alttextilien (BW). Das Potenzial der Kohlenstoffspeicherung liegt gemäß der Berechnungsgrundlage des EBC bei ca. 377 kg CO_2-äq./Mg BW. Bei der wirtschaftlichen Betrachtung vom Grundprozess können 10,60 Euro pro Tonne BW eingenommen werden. Die Einnahmen stammen zu zwei Dritteln aus dem Kohleverkauf (EBC-Agro) und der Rest zu gleichen Anteilen aus dem Verkauf der Abwärme und der Pflanzenkohle-Zertifikate. Die Hälfte der Kosten stammt aus dem Einkauf der Stärke und jeweils ein Viertel sind Strom- und Wartungskosten. Somit fehlen Transportkosten, Investitions- und Mitarbeiterkosten. Vorrangig durch Letzteres wird die Bilanz schnell negativ.

4 Fazit und Ausblick

Durch die Aufbereitung und Pyrolyse naturfaserbasierter Alttextilien konnten hochwertige Pflanzenkohlen erzeugt werden, die nahezu die Klasse EBC-Agro erreichten. Im Vergleich zur Müllverbrennung lassen sich durch die Verwertung von Baumwollaltkleidung über diesen Verwertungsweg etwa 350 kg CO_2-äq./Mg einsparen. Unter Berücksichtigung der Kohlenstoffspeicherung ergibt sich nach EBC ein Sequestrierungspotenzial von 377 kg CO_2-äq. pro Tonne Altkleidung. Auch aus ökonomischer Sicht erwies sich der Verwertungsweg als vorteilhaft, da ein Gewinn von 10,60 € pro Tonne Altkleidung erzielt werden könnte. Insgesamt weisen die Versuchsergebnisse auf eine gute technische Machbarkeit des Verwertungsweges hin. Gleichzeitig zeigen die Untersuchungen, dass neben der Pelletierung eine manuelle Sortierung und Störstoffentfernung erforderlich sind, die bei einer großtechnischen Umsetzung einer dezentralen Pyrolyseanlage zur Eigenverwertung sortenreiner Baumwollalttextilien berücksichtigt werden müssen. Parameter wie fixierter Kohlenstoffgehalt, Wasserhaltekapazität und spezifische Oberfläche wurden nicht ermittelt, sind jedoch für die Bewertung möglicher Anwendungen der Pflanzenkohle als Adsorbens, Düngemittel oder in der Metallurgie von hoher Relevanz und sollten in zukünftigen Forschungsarbeiten untersucht werden. Darüber hinaus ist die Ursache der erhöhten Kupfergehalte zu analysieren und zu minimieren. Für eine agrarische Nutzung der aus Alttextilien gewonnenen Pflanzenkohle ist zudem eine Anpassung der gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Düngemittelzulassung erforderlich.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Thüringer Innovationszentrums für Wertstoffe sowie der Hochschule Nordhausen für die Bereitstellung der Materialien, der technischen Infrastruktur zur Bearbeitung der Thematik und der Unterstützung bei der Masterarbeit.

Literatur/Quellen

[1] S. Forbrig, T. Fischer und B. Heinz (ohne Jahr). „Textilstudie 2020: Bedarf, Konsum, Wiederverwendung und Verwertung von Bekleidung und Textilien in Deutschland.“ Zugriff am: 6. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.bvse.de/dateien2020/1-Bilder/03-Themen_Ereignisse/06-Textil/2020/studie2020/bvse%20Alttextilstudie%202020.pdf

[2] J. Teufel, V. Lopez und L. Gascón (2024). „Ökologische Bewertung textiler Fasern - von „klassischen“ Fasern über Recyclingfasern bis hin zu innovativen und wiederentdeckten Fasern.“ Zugriff am: 6. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/117_2024_texte_oekologische_bewertung_textiler_fasern.pdf

[3] C. Löw, H. Lorösch und K. Moch (2024). „Textilrecycling - Status Quo und aktuelle Entwicklungen.“ Zugriff am: 30. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Textilrecycling-Status-Quo.pdf

[4] F. Naji *et al.* (2023). „Ökonomische Potenziale des Textilrecyclings und der Wasserstoffproduktion aus Textilabfällen in Bayern.“ Zugriff am: 30. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.bifa.de/fileadmin/_migrated/pics/bifa-Texte/bifa-Text_Nr.73_Oekonomische_Potenziale_des_Textilrecyclings.pdf

[5] P. Quicker und K. Weber, Hg. (2016) *Biokohle: Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten*. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016. [Online]. Verfügbar unter: http://www.springer.com/

Kontakt

M. Eng., Falk Oberreich, ehemaliger Masterand
HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminden/Göttingen, Fachgebiet Nachhaltige Energie- und Umwelttechnik (NEUTec); Hochschule Nordhausen / Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe (ThIWert)
E-Mail: falk.oberreich@gmx.de

Tim Kurtz, Daniela Merz, Krassimir Garbev, Razan Alsharqawi, Peter Stemmermann, Salar Tavakkol, Dieter Stapf

Effekt von mineralischen Füllstoffen auf die Pyrolyse von Polystyrol

***Abstract**: Mineralische Füllstoffe sind in Kunststoffen des täglichen Gebrauchs weit verbreitet, um Kosten einzusparen und die Eigenschaften der Kunststoffe anzupassen. Da diese Kunststoffe als Verunreinigung angesehen werden können, erschwert ihre Anwesenheit das Recycling. Der Einfluss von Füllstoffen auf die Pyrolyse als chemische Recyclingmethode ist bisher dennoch wenig untersucht. Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses ausgewählter Füllstoffe auf die Pyrolyse von Polystyrol. Um eine Veränderung der Zersetzungstemperatur zu identifizieren, werden thermogravimetrische Analysen durchgeführt. Ergänzt werden die Ergebnisse mit einer Analyse der primären Pyrolyseprodukte, insbesondere zur Einordnung der Styrolausbeute.*

1 Einleitung

Viele Kunststoffe des täglichen Gebrauchs enthalten Minerale als funktionelle Füllstoffe, um die Verarbeitbarkeit zu verbessern, die Kosten zu reduzieren oder physikalische Eigenschaften anzupassen (Ahmad Fauzi et al., 2022). Kunststoffrecycling lässt sich in zwei Haupttypen einteilen: mechanisches und chemisches Recycling. Während das mechanische Recycling reine Polymere erfordert, können chemische Recyclingmethoden wie die Pyrolyse mit Verunreinigungen, einschließlich mineralischer Füllstoffe, umgehen und sind daher besser für die stoffliche Verwertung geeignet (Schade et al., 2024). Der Einfluss der mineralischen Füllstoffe wurde bisher jedoch nur in begrenztem Umfang systematisch untersucht.

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Pyrolyse von Polystyrol (PS) in Anwesenheit von Mineralien. Der Großteil des Polystyrols wird in der Gebäudedämmung eingesetzt, wo aufgrund von Füllstoffen und Anhaftungen überwiegend mineralische Verunreinigungen vorliegen. Da PS während der Pyrolyse depolymerisiert, ist eines der Hauptprodukte Styrol, das Monomer von PS, das somit ein wertvolles Produkt darstellt (Maafa, 2021; Royuela et al., 2024). Um einen Recyclingweg für diesen Abfallstrom aufzuzeigen, beschreibt diese Studie das Zersetzungsverhalten von PS/Mineral-Kompositen bzw. -Mischungen. Der Fokus liegt auf der Zersetzungstemperatur, ergänzt durch die semiquantitative Zusammensetzung der primären Pyrolyseprodukte verschiedener Komposite.

2 Methodik

Gefüllte Kunststoffproben in Form binärer Mischungen aus PS und jeweils einem mineralischen Füllstoff wurden mittels Extrusion hergestellt. Die untersuchten Füllstoffe sind Calcit ($CaCO_3$), Portlandit ($Ca(OH)_2$), Anhydrit ($CaSO_4$) und Anatas (TiO_2). Sowohl die Komposite als auch die einzelnen Komponenten wurden mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) charakterisiert.

Zur Untersuchung des Einflusses der mineralischen Füllstoffe auf die Zersetzung von PS wurden thermogravimetrische Analysen (TGA) sowohl an den Einzelkomponenten als auch an den hergestellten binären Kompositen durchgeführt. Gewichtete Mittelwerte aus reinem PS und dem jeweiligen mineralischen

Füllstoff wurden berechnet und dienten als Referenz, anhand derer die Mischungen bewertet wurden. Verschiebungen der Zersetzungstemperatur oder Änderungen im TGA-Profil werden als Hinweise auf Wechselwirkungen zwischen Polymer und Füllstoffen interpretiert.

Der Einfluss mineralischer Füllstoffe auf die Styrolausbeute während der Pyrolyse wurde ebenfalls untersucht. Die primären Pyrolyseprodukte wurden mithilfe eines Mikrogramm-Pyrolysators identifiziert, der direkt an ein Gaschromatographie-Massenspektrometrie-System (GC-MS) gekoppelt ist. Dabei werden 100-µg-Proben in einer Heliumatmosphäre nahezu instantan erhitzt. Die freigesetzten Pyrolysedämpfe werden unmittelbar in das GC-MS geleitet, wodurch eine Trennung und Identifizierung der Komponenten ermöglicht wird. Die semiquantitative Auswertung der Produktspektren erlaubt eine Bewertung des Einflusses des jeweiligen mineralischen Füllstofftyps auf die Styrolausbeute.

3 Ergebnisse

Die TGA-Ergebnisse zeigen, dass sich nicht alle mineralischen Füllstoffe gleich verhalten. Die Anwesenheit von Anatas scheint die Zersetzungsrate von PS nicht zu beeinflussen und führt zu TGA-Profilen, die eng mit denen von reinem PS übereinstimmen. Calcit und Anhydrit hingegen bewirken eine Verschiebung der Zersetzungstemperatur von PS zu um etwa 15 °C höheren Temperaturen. In Anwesenheit von Portlandit erfolgt die Zersetzung von PS im Wesentlichen bei derselben mittleren Temperatur wie bei reinem PS, jedoch über einen breiteren Temperaturbereich.

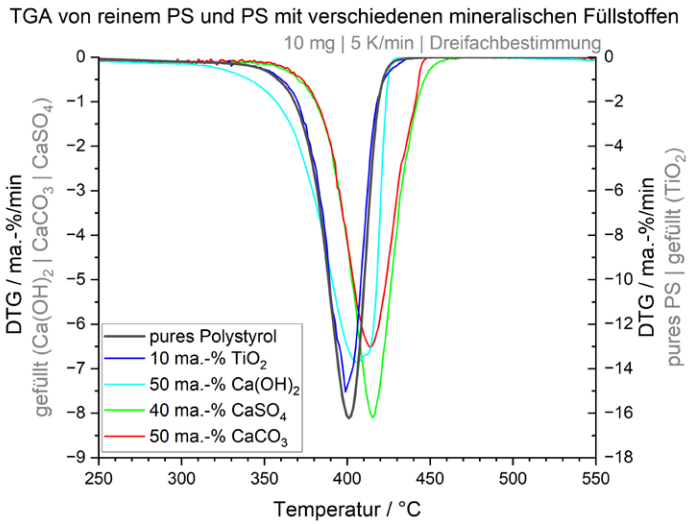


Abbildung 1: Thermogravimetrische Analyse (TGA) von binären Polystyrol -Kompositen mit Anatas (TiO_2), Portlandit ($Ca(OH)_2$), Calcit ($CaCO_3$) und Anhydrit ($CaSO_4$) verglichen zu reinem Polystyrol (PS)

Die GC-MS-Analyse der primären Pyrolyseprodukte zeigt, dass Styrol-Monomer, -Dimer und -Trimer die dominierenden Primärprodukte der PS-Pyrolyse sind, was mit der Literatur übereinstimmt (Faravelli et al., 2001; Royuela et al., 2024). Diese Beobachtung gilt auch für die binären Proben, die mineralische Füllstoffe enthalten. Obwohl Styrol-Monomer, -Dimer und -Trimer die Hauptprodukte darstellen, weist ihre relative Zusammensetzung jedoch geringe Variationen auf, die bislang nicht eindeutig erklärt werden können und Gegenstand weiterer Untersuchungen sind.

Ein Vergleich der TGA- und GC-MS-Analysen zeigt, dass Anatas die Pyrolyse von PS nicht beeinflusst. Die Ergebnisse für Portlandit führen zu einer ähnlichen Schlussfolgerung, auch wenn die TGA einen breiteren Zersetzungsbereich zeigt. Bei Calcit und Anhydrit ist die in der TGA beobachtete ähnliche Abweichung des Zersetzungsverhaltens in den GC-MS-Analysen nicht reproduzierbar. In Anwesenheit der Mineralien werden Unterschiede in der Produktzusammensetzung festgestellt.

Zusammenfassend scheinen Calcit und Anhydrit die PS-Polymerkette zu stabilisieren und deren Kettenspaltung zu unterdrücken, was zu einer höheren Zersetzungstemperatur führt. Gleichzeitig scheinen die Calcit und Anhydrit jedoch keinen spezifischen Mechanismus zu beeinflussen, der zu einer vergleichbaren Zusammensetzung der primären Pyrolyseprodukte führen würde. Die Rolle der untersuchten Mineralien bei der Förderung oder Hemmung bestimmter Zersetzungsmechanismen ist Gegenstand weiterer Forschung.

Danksagung

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „FINEST“ durchgeführt, das im Zuge der Sustainability Challenge von der Helmholtz-Gemeinschaft gefördert wird.

Literatur/Quellen

Ahmad Fauzi, A.A. et al. (2022) “On the Use of Dolomite as a Mineral Filler and Co-Filler in the Field of Polymer Composites: A Review,” Polymers, 14(14), p. 2843. Available at: https://doi.org/10.3390/polym14142843.

Faravelli, T. et al. (2001) “Thermal degradation of polystyrene,” Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 60(1), pp. 103–121. Available at: https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00159-5.

Maafa, I.M. (2021) “Pyrolysis of Polystyrene Waste: A Review,” Polymers, 13(2). Available at: https://doi.org/10.3390/polym13020225.

Royuela, D. et al. (2024) “Pyrolysis of polystyrene using low-cost natural catalysts: Production and characterisation of styrene-rich pyro-oils,” Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 182, p. 106690. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106690.

Schade, A. et al. (2024) “Plastic Waste Recycling—A Chemical Recycling Perspective,” ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 12(33), pp. 12270–12288. Available at: https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c02551.

Kontakt

M.Sc, Tim Kurtz, wissenschaftlicher Mitarbeiter
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Institut für Technische Chemie (ITC)
Tel.-Nr. +49 721 608-26545
E-Mail: tim.kurtz@kit.edu
Homepage: https://www.itc.kit.edu/72_1922.php

Isabel Kaphahn, Peter Quicker

Implementation des Oxyfuel-Verfahrens zur CO_2-Abscheidung in Müllverbrennungsanlagen

***Abstract**: Die Implementation des Oxyfuel-Verfahrens in Müllverbrennungsanlagen gilt als vielversprechender Ansatz zur CO_2-Abscheidung. In diesem Kontext werden die prozesstechnischen Auswirkungen verschiedener Abgas-Rezirkulationsstrategien anhand eines numerischen Verbrennungsmodells und ergänzender thermoanalytischer Experimente untersucht. Die Modellierung verdeutlicht, dass die Wahl des Abgas-Rezirkulationspfades die Schadstofffracht, den Wasserdampfanteil im Oxidationsmittel sowie die CO_2- und N_2-Konzentrationen im Abgas maßgeblich beeinflusst. Die experimentellen Ergebnisse belegen, dass eine Erhöhung des O_2-Gehalts die Reaktivität des Brennstoffs deutlich steigert, während H_2O lediglich eine moderat fördernde Wirkung auf die Koksverbrennung besitzt. Um vergleichbare Verbrennungscharakteristika wie im Luftbetrieb zu erreichen, sind etwa 32 bis 35 Vol.-% O_2 in CO_2 erforderlich.*

1 Einleitung

Die Europäische Union verfolgt mit dem European Green Deal das Ziel, bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität zu erreichen und die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 Prozent zu reduzieren [1]. Auch der Sektor der thermischen Abfallbehandlung (TAB) ist von diesen Vorgaben betroffen, deren CO_2-Emissionen je nach Abfallzusammensetzung zwischen 0,84 und 1,1 Tonnen CO_2 pro Tonne Abfall betragen, wovon rund die Hälfte biogenen Ursprungs sind [2], [3].

Daher rückt die Integration von CO_2-Abscheidungstechnologien zunehmend in den Fokus. Während die Aminwäsche als Post-Combustion-Verfahren zur CO_2-Abscheidung derzeit am weitesten entwickelt ist und bereits im industriellen Maßstab eingesetzt wird, bietet die Oxyfuel-Verbrennung einen alternativen Ansatz, der direkt in den Verbrennungsprozess eingreift. Indem die Verbrennungsluft durch reinen Sauerstoff und rezirkuliertes Rauchgas ersetzt wird, soll der Stickstoffeintrag in das System vermieden bzw. reduziert werden. Das Abgas besteht folglich aus hohen Anteilen CO_2 und H_2O. Nach der Kondensation des Wassers sowie nach Abtrennung von Verunreinigungen und Kompression (Compression and Purification Unit, CPU) steht das CO_2 für eine Weiterverwendung (Carbon Capture and Utilization, CCU) oder Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) zur Verfügung. [4], [5]

Obwohl das Oxyfuel-Verfahren im Bereich der Kohleverbrennung bereits umfassend erforscht wurde, bestehen hinsichtlich der Übertragbarkeit auf heterogene Abfallströme und Rostfeuerungssysteme weiterhin große Forschungslücken. Simulationen der Implementation des Oxyfuel-Verfahrens in Müllverbrennungsanlagen (MVA) adressieren bisher nicht den Vergleich der Rauchgasrezirkulation an verschiedenen Positionen im Prozess und werden selten durch experimentelle Untersuchungen zu realistischen O_2-Bedarfen oder resultierenden Verbrennungscharakteristika gestützt. [5], [6]

Die vorliegende Arbeit schließt diese Lücke, indem ein Oxyfuel-Modell mit experimentellen TGA/DTA-Daten verknüpft wird und dadurch sowohl die Prozessbedingungen als auch die praktische Umsetzbarkeit verschiedener Rezirkulationsstrategien bewertet werden kann.

2 Methodik

2.1 Modellierung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA

Zur Untersuchung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA wurde ein numerisches Modell entwickelt, das auf einer stöchiometrischen Verbrennungsrechnung unter Oxyfuel-Bedingungen basiert. Das Prozessschema der betrachteten, technischen Konfiguration der MVA und die gewählten Randbedingungen des Modells sind in Abbildung 1 dargestellt. Um stationäre Betriebsbedingungen abbilden zu können, berücksichtigt das Modell eine Rauchgasrezirkulation und Verbrennungsrechnung über einhundert Iterationsschritte. Steuergrößen sind die eingestellte O_2-Konzentration im Oxidationsmittel, der O_2-Überschuss sowie Falschluftanteile und die Abfallzusammensetzung. Anhand der Modellierung von drei verschiedenen Rezirkulationspfaden A, B und C, die in Abbildung 1 dargestellt sind, wurde der Einfluss auf die Gaszusammensetzung und den Volumenstrom entlang des Prozesses untersucht. Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss der Steuergrößen auf die CO_2- und N_2-Konzentrationen im Gasstrom zur CPU sowie auf den Sauerstoffbedarf untersucht. Ein weiterer Fokus lag auf der resultierenden Wasserdampf-Konzentration im Oxidationsmittel, dessen Effekt auf die Verbrennung in den thermoanalytischen Messungen experimentell untersucht wurde.

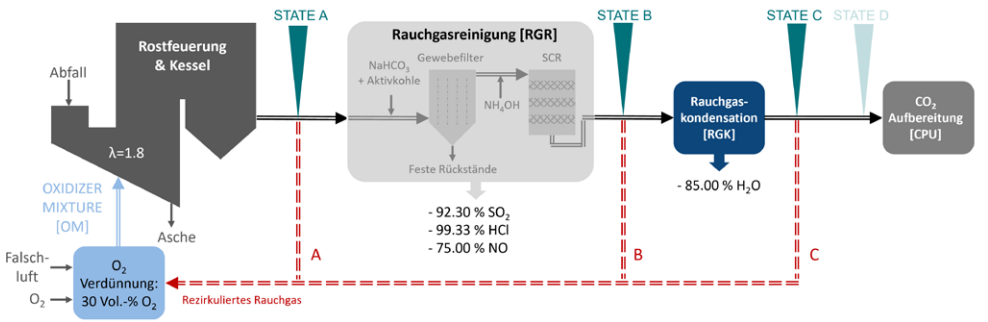


Abbildung 1: Modellierung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA

2.2 Thermoanalytische Untersuchungen der Oxyfuel-Verbrennung von EBS

Zur experimentellen Untersuchung der Oxyfuel-Verbrennung wurden thermogravimetrische Analysen (TGA) und Differenzthermoanalysen (DTA) durchgeführt. Als Probenmaterial wurde zerkleinerter Ersatzbrennstoff (EBS) mit der Korngröße < 1 mm aus einem deutschen Zementwerk verwendet, um die Homogenität des Materials im Vergleich zu Siedlungsabfällen zu verbessern. Eine Einwaage aus 10 mg ± 0,1 mg wurde unter definierten Gasatmosphären mit einer Heizrate von 10 K/min bis 1000 °C erhitzt. Die untersuchten Oxyfuel-Atmosphären waren 21, 22,5, 25, 27,5, 30, 32,5 und 35 Vol.-% O_2 in CO_2. Bei einer konstanten O_2-Konzentration von 30 Vol.-% wurde die H_2O-Konzentration von 0 auf 10, 15, 20, 25, 30 und 35 Vol.-% in CO_2 variiert. Als Referenz wurden 21 Vol.-% O_2 in N_2 mit 0, 10, 20 und 30 Vol.-% H_2O in CO_2 untersucht. Jedes Experiment wurde in Doppelbestimmung durchgeführt. Die Analyseergebnisse wurden hinsichtlich der Verschiebung von charakteristischen Temperaturen wie Onset-, Peak- und Offset-Temperaturen in Abhängigkeit von der O_2- und H_2O-Konzentration evaluiert. Anschließend wurde mithilfe einer Regressionsanalyse die Oxyfuel-Gaszusammensetzung bestimmt, bei der die Verbrennungscharakteristik der Verbrennung mit Luft entspricht.

3 Ergebnisse

3.1 Modellierung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA

Die Modellierung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA zeigt, dass die Wahl der Rezirkulationsstrategie des Rauchgases die Zusammensetzung des Oxidationsmittels, die Schadstoffbelastung und die resultierenden Abgasströme maßgeblich beeinflusst.

Wird das Rohgas vor der Rauchgasreinigung (Pfad A) rezirkuliert, befinden sich im rückgeführten Gas hohe Schadstoffgehalte. Bezogen auf die feuchte Gaszusammensetzung enthält das Oxidationsmittel rund 0,3 Vol.-% HCl und 0,1 Vol.-% SO_2. Dies resultiert in einem erhöhten Korrosionsrisiko in den Rohrbauteilen zur Rezirkulation des Rohgases und in der Zuführung des Oxidationsmittels in den Feuerraum, der die Betriebssicherheit einer Anlage gefährden kann. Vorteilhaft an der Rezirkulation des Rohgases ist jedoch der reduzierte Volumenstrom in der Abgasreinigung.

Erfolgt die Rezirkulation erst nach der Rauchgasreinigung (Pfad B), sinkt die Schadstofffracht deutlich. Der Wasserdampfgehalt im Oxidationsmittel ist sowohl bei Pfad A, als auch bei Pfad B mit rund 40 Vol.-% im Oxidationsmittel sehr hoch, daher wird der Einfluss auf die Verbrennung in 3.2 experimentell untersucht. Beide Rezirkulationsstrategien, bei denen das Abgas vor der Kondensationsstufe rezirkuliert wird, führen zu moderaten CO_2-Gehalten von rund 50 Vol.-% vor Einleitung in die CPU (bezogen auf den feuchten Abgasstrom).

Die Rezirkulation des Reingases nach der Kondensationsstufe (Pfad C) führt zu einem Oxidationsmittel mit geringem Wasserdampfanteil (3,5 Vol.-%) und zu 62 Vol.-% CO_2 im Abgasstrom zur CPU. Diese sogenannte trockene Rezirkulation senkt den Sauerstoffbedarf um rund 11,6 %, da in diesem Pfad ein größerer Anteil des zuvor nicht umgesetzten Sauerstoffs in das Oxidationsmittel zurückgeführt wird.

Eine der wichtigsten Erkenntnisse der Sensitivitätsanalyse ist, dass der CO_2-Gehalt im Abgas zur CPU überproportional stark vom Sauerstoffüberschuss abhängt, während der N_2-Gehalt wiederum fast vollständig auf den Falschlufteintrag zurückzuführen ist.

3.2 Thermoanalytische Untersuchungen der Oxyfuel-Verbrennung von EBS

Die thermoanalytischen Untersuchungen der Oxyfuel-Verbrennung von EBS bestätigen den in der Literatur bekannten, mehrstufigen Verlauf aus Trocknung, Devolatilisierung (ab ca. 300 °C), Koksausbrand und Aschereaktionen [7]. Mit steigendem Sauerstoffgehalt verschieben sich die charakteristischen Temperaturen der Koksverbrennung deutlich zu niedrigeren Temperaturen, was eine höhere Reaktivität signalisiert. Die Devolatilisierung wird dagegen kaum beeinflusst. Aus der linearen Regressionsanalyse der charakteristischen Temperaturen in Abhängigkeit von der O_2-Konzentration wurde eine O_2-Konzentration von 32-35 Vol.-% O_2 in CO_2, bestimmt, bei der die Oxyfuel-Verbrennung den Charakteristika bei Luftverbrennung entspricht. Diese Werte liegen etwas höher als in Teilen der Literatur angegeben. Dies ist durch die hohe Variabilität des Abfalls und unterschiedliche Materialfraktionen erklärbar [5].

Ein erhöhter Wasserdampfgehalt im Oxidationsmittel bewirkt ebenfalls eine leichte Verschiebung des Koksausbrandes zu niedrigeren Temperaturen, was einer erhöhten Reaktivität entspricht. Diese Effekte sind jedoch deutlich schwächer ausgeprägt als die der Sauerstoffanreicherung. Die Devolatilisierung zeigt praktisch keine Abhängigkeit vom Wasserdampfgehalt. Die experimentellen Ergebnisse belegen somit, dass die Rezirkulation von feuchtem Abgas einen moderat beschleunigenden Einfluss auf die Verbrennung haben kann.

4 Diskussion

Die Kombination aus Modellierung und thermoanalytischen Untersuchungen verdeutlicht, dass die technische Umsetzung der Oxyfuel-Verbrennung in MVA wesentlich von der Wahl des Rezirkulationspfades abhängt. Die Effizienz des Oxyfuel-Verfahrens, gemessen an der CO_2-Konzentration im Abgas zur CPU, ist maßgeblich von der Reduktion des Falschlufteintrags und des O_2-Überschusses abhängig. Um hohe Schadstoffgehalte im Oxidationsmittel zu vermeiden, sollte die Rezirkulation nach der Abgasreinigung stattfinden. Die Rezirkulation des feuchten Reingases führt zu hohen Wasserdampfanteilen im Oxidationsmittel, die die Reaktivität des Koksausbrandes, wie experimentell gezeigt, leicht erhöhen.

Die Rezirkulation des Reingases nach der Kondensationsstufe führt zu den höchsten CO_2-Konzentrationen im Abgas zur CPU und hat den geringsten Sauerstoffbedarf. Die Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass selbst geringe Fehlluftanteile den N_2-Gehalt im Abgas erheblich erhöhen und dadurch den Energieaufwand der CPU stark beeinflussen. Damit wird die Minimierung von Falschlufteinträgen zu einem zentralen technischen Ziel bei der industriellen Umsetzung. Die thermoanalytischen Ergebnisse verdeutlichen den starken Einfluss des O_2-Gehalts auf den Verbrennungsprozess, was die Notwendigkeit präziser O_2-Regelungen in zukünftigen Oxyfuel-MVA hervorhebt.

5 Fazit und Ausblick

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Implementation der Oxyfuel-Verbrennung für CCU/CCS in MVA prozesstechnisch vielversprechend ist, sofern eine geeignete Rauchgas-Rezirkulationsstrategie, eine Minderung des Falschlufteintrags und optimierte O_2-Einstellungen realisiert werden. Für eine belastbare Bewertung der Oxyfuel-MVA sind jedoch weitere Schritte zwingend notwendig. Dazu gehören experimentelle Validierungen im Technikumsmaßstab, um Reaktivität, Schadstoffverteilung und Feuchtebedingungen sowie die Wechselwirkung aus O_2-Konzentration und O_2-Überschuss zu erfassen. Auf der Modellierungsseite sind Erweiterungen erforderlich, die neben der Massenbilanz der Gasphase auch Wärmeübertragung, Rostkinetik und Variabilität der Primär- und Sekundärluft einbeziehen. Zudem muss eine vollständige energetische und wirtschaftliche Gesamtbilanzierung durchgeführt werden, die die Beiträge der Sauerstofferzeugung und der CPU in Bezug auf zu erzielende CO_2-Reinheiten evaluiert.

Danksagung

Das Projekt wurde durch die großzügige finanzielle Unterstützung der Stiftung Sustainable Industrial Society Foundation ermöglicht.

Literatur/Quellen

[1] Europäisches Parlament: Reduktion von CO_2-Emissionen: Ziele und Maßnahmen der EU. URL: https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20180305STO99003/reduktion-von-co2-emissionen-ziele-und-massnahmen-der-eu [Stand: 18.06.2024]

[2] Arnold, K.; Scholz, A.; Taubitz, A.; Wilts, H.: Unvermeidbare Emissionen aus der Abfallbehandlung – Optionen auf dem Weg zur Klimaneutralität. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen

[3] Dietz, W.; Schönemann, M.; Seitz, M.; Thiel, N.; Rommel, W.: Nutzungsmöglichkeiten und Potenziale bei Abfallbehandlungsanlagen zur Sektorenkopplung, Energiebereitstellung und CO_2-Abscheidung. Umweltbundesamt, August 2024

[4] Acampora, L.; Grilletta, S.; Costa, G.: The Integration of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) in Waste-to-Energy Plants: A Review. In: Energies. 18. Jg., 2025, Nr. 8, S. 1883

[5] Wienchol, P.; Szlęk, A.; Ditaranto, M.: Waste-to-energy technology integrated with carbon capture – Challenges and opportunities. In: Energy. 198. Jg., 2020

[6] Becidan, M.; Ditaranto, M.; Carlsson, P.; Bakken, J.; Olsen, M. N. P.; Stuen, J.: Oxyfuel Combustion of a Model MSW—An Experimental Study. In: Energies. 14. Jg., 2021, Nr. 17

[7] Lv, J.; Yan, B.; Zhou, S.; Wu, Z.; Liu, X.; Lu, S.; Zhu, X.; Sun, Y.; Li, J.; Lin, F.; Chen, G.: Ignition, combustion and pollutant emissions characteristics of excavated waste in low oxygen concentration and O_2/CO_2 atmosphere. In: Waste management. 200. Jg., 2025, Nr. 114770

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

Joel da Silva Félix, Daniel Wohter, Peter Quicker

Optimierung der industriellen Rauchgasreinigung durch Additivierung kalkbasierter Sorbentien zur SO_2-Abscheidung

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

1 Einleitung

Die thermische Abfallbehandlung (TAB) nimmt innerhalb der Kreislauf- und Abfallwirtschaft eine zentrale Rolle zur sicheren und umweltgerechten Entsorgung von Restabfällen ein. Durch die Verbrennung des heterogenen Abfallgemischs entsteht ein komplexes Emissionsprofil, das eine aufwändige nachgeschaltete Abgasreinigung (AGR) erfordert. Die Grenzwerte für bereits reglementierte Schadstoffe wie die säurebildenden Gase Schwefeldioxid (SO_2), Chlorwasserstoff (HCl) oder Fluorwasserstoff (HF) werden regelmäßig verschärft, zuletzt mit der Novellierung der 17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (17. BImSchV) 2024. Der Einsatz neu aufkommender Materialien und Chemikalien, die über industrielle oder private Anwendungen in den Restabfallstrom eingetragen werden, lässt zudem die Bildung neuer Schadstoffe erwarten. Stand der Technik zur Abscheidung säurebildender Gase ist der Einsatz von natrium- und/oder calciumbasierten Sorbentien [1]. Aufgrund des hohen wirtschaftlichen Drucks für Anlagenbetreiber und des Inkrafttretens schärferer Grenzwerte gilt es, Optimierungspotenziale für vorhandene AGR-Anlagen auszuschöpfen [2].

Ziel der Arbeiten war es, die Abscheideleistung bestehender Rauchgasreinigungsverfahren durch gezielte Additivierung kalkbasierter Sorbentien zu steigern. Vor dem Hintergrund verschärfter Emissionsgrenzwerte und begrenzter wirtschaftlicher Spielräume für Anlagenbetreiber besteht ein hoher Bedarf, die Leistungsfähigkeit vorhandener Systeme ohne umfangreiche verfahrenstechnische Anpassungen zu erhöhen. Dabei stellen kalkbasierte Sorbentien aufgrund ihrer breiten Verfügbarkeit und ihres Potenzials zur Abscheidung säurebildender Schadstoffe eine zentrale Komponente der Rauchgasreinigung dar, weisen jedoch unter realen Rauchgasbedingungen häufig reaktive Limitierungen auf. Die Additivierung bietet einen vielversprechenden Ansatz, bekannte physikalische und chemische Wirkmechanismen gezielt zu verstärken [3] und damit bestehende Reaktionshemmnisse zu überwinden.

2 Methodik

2.1 Materialauswahl und Sorbentien-Charakterisierung

Für die Materialauswahl wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, auf deren Basis eine Vorauswahl an Additiven erstellt wurde. In der Literatur wurden dabei Stoffe identifiziert, die bislang überwiegend als Reinstoffe untersucht wurden, sowie industrielle Rest- und Nebenprodukte oder Naturprodukte, die im Hinblick auf ökonomische und ökologische Gesichtspunkte eine praxisnahe Anwendung erwarten lassen. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft lag der Fokus auf Reststoffen mit kaskadierten Nutzungsmöglichkeiten. Die Vorauswahl der Materialien erfolgte anhand der erwarteten physikalischen und chemischen Wirksamkeit. Die Priorisierung der Additive wurde in enger Abstimmung mit Industrievertretern im Rahmen eines projektbegleitenden Ausschusses vorgenommen, wodurch deren industrielle Relevanz und Anwendbarkeit sichergestellt wurde.

Zur Untersuchung der Wirkung hygroskopischer Additive wurden Calciumchlorid ($CaCl_2$), Natriumhydroxid (NaOH) und Natriumsilikat (Na_2SiO_3) ausgewählt. Ziel war es, die Partikelfeuchte der kalkbasierten Sorbentien zu erhöhen und dadurch die Abscheideleistung gegenüber SO_2 zu verbessern. Zusätzlich wurden Puzzolane aus Papierschlammasche (PS) oder aus Flugasche (FA) eines Braunkohlekraftwerks hergestellt und sowohl als separate Sorbentien als auch als Additive zum Kalkhydrat untersucht.

Zur Charakterisierung der physikalischen Materialeigenschaften wurde die spezifische Oberfläche mittels Brunauer-Emmett-Teller-Analyse (BET) bestimmt. Ergänzend erfolgte eine bildgebende Bewertung der Partikelmorphologie anhand von Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen (REM). Die elementare Zusammensetzung der Materialien wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ermittelt.

2.2 Versuchsstand und Betriebsbedingungen

Zur reproduzierbaren Aufnahme von Durchbruchskurven wurde ein Versuchsstand im Technikumsmaßstab („MiniPlant“) errichtet, der die synthetische Erzeugung von Gasen zur Nachbildung industrieller Emissionsprofile ermöglicht. Der Versuchsstand besteht im Wesentlichen aus den drei Modulen Gaskonditionierung, Wirbelschichtreaktor und Gewebefilter. Über die Gaskonditionierung wird ein Trägergas aus Sauerstoff (O_2), Stickstoff (N_2) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) gemischt, welches anschließend bis zu einem Wassergehalt von etwa 30 Vol.-% befeuchtet und auf Temperaturen von bis zu 500 °C erhitzt werden kann. Daran schließt sich die Injektion der Schadgase SO_2 und HCl an, wobei praxisrelevante Konzentrationen (z. B. Klärschlammverbrennung) von jeweils über 5000 mg/m^3 eingestellt werden können. Die Einstellung der jeweiligen Volumenströme erfolgt über Flaschengase mittels Mass-Flow-Controllern (MFC). Der stationäre Wirbelschichtreaktor dient der intensiven Durchmischung von Feststoff (Batch von 100 g) und Gas zur Untersuchung der Abscheidewirkung.

Zur Bewertung der Abscheidewirkung der eingesetzten Sorbentien und Sorbensmischungen wurden Durchbruchskurven erstellt. Hierzu wurde die SO_2-Ausgangskonzentration (C_{SO2}) der SO_2-Eingangskonzentration ($C_{0,SO2}$) gegenübergestellt. Sobald das Verhältnis $C_{SO2}/C_{0,SO2}$ einen Wert von 0,9 erreicht, wird angenommen, dass nur noch 10 % des einströmenden SO_2 abgeschieden werden. Dieser Zeitpunkt wird als vollständiger Durchbruch definiert und der zugehörige Zeitpunkt t_{90} als Kenngröße zur relativen Bewertung der Abscheideleistung herangezogen. Die SO_2-Eingangskonzentration wurde vor der Zugabe des jeweiligen Feststoffs anhand von Nullmessungen ohne Sorbens bestimmt. Zur Messung der Gaskomponenten wurde das Infrarotfilterfotometer MCS100E (Fa. SICK) mit beheizter Entnahmesonde verwendet.

3 Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt die morphologischen Veränderungen der Ausgangsmaterialien PS (a) und FA (b) infolge der puzzolanischen Aufbereitung. Die spezifische Oberfläche der Papierschlammasche konnte dabei von 7,27 m²/g auf 49,18 m²/g gesteigert werden und übertrifft damit die des in der Versuchsreihe eingesetzten Kalkhydrats (ca. 18 m²/g) deutlich. Das aus Flugasche hergestellte Puzzolan erreichte mit 16,30 m²/g in etwa das Niveau des Kalkhydrats, ausgehend von einer spezifischen Oberfläche von 1,53 m²/g. Die REM-Aufnahmen bestätigen die ausgeprägten Veränderungen der Partikeloberfläche infolge der Aufbereitung der PS sowie der FA zur Herstellung von Puzzolanen im Labormaßstab.

Die Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse zeigen, dass das Puzzolan aus Papierschlammasche mit 39,60 Gew.-% einen deutlich höheren Calciumanteil aufweist als das aus Flugasche hergestellte Puzzolan (29,04 Gew.-%). Für das in der Versuchsreihe eingesetzte Kalkhydrat wurde ein Calciumgehalt von 55,65 Gew.-% bestimmt. Die übrigen Bestandteile der Puzzolane bestehen im Wesentlichen aus Silizium, Eisen und Aluminium, welche eine überwiegend inerte Matrix bilden. Während das Puzzolan aus PS etwa 8 Gew.-% dieser inerten Bestandteile enthält, liegt der Anteil beim FA-Puzzolan bei etwa 17 Gew.-%.

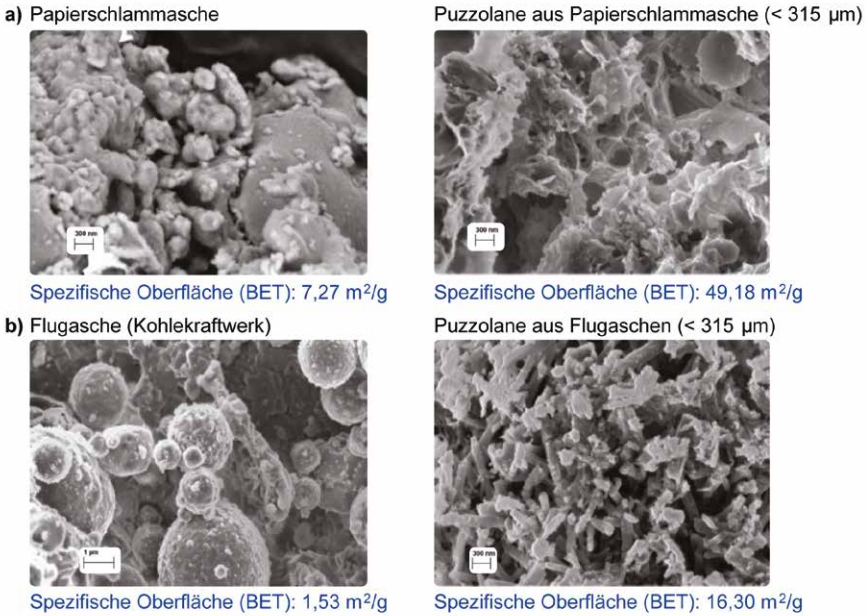


Abbildung 1: REM-Aufnahmen Ausgangsmaterial gegenüber Puzzolan a) PS b) FA

Die Durchbruchskurven der ersten Screening-Versuche für hygroskopische Stoffe (links) sowie für puzzolanische Zuschlagstoffe (rechts) sind in Abbildung 2 dargestellt. Für die Untersuchung wurden entweder 100 g Kalkhydrat (KH) mit jeweils 2 Ma.-% des Additivs versetzt oder durch 100 Ma.-% des jeweiligen Puzzolans ersetzt. Versuche mit 100 Ma.-% reinem KH dienen als Referenz. Durch die Additivierung mit hygroskopischen Stoffen konnte in allen untersuchten Fällen eine Verbesserung der Abscheideleistung be-

obachtet werden. Nach einer Versuchsdauer von 30 min wurde eine Erhöhung des t_{90}-Werts um mehr als 40 % gegenüber dem Referenzsorbens (100 Ma.-% KH) erreicht. Das Abflachen der Konzentrationsanstiege bei Einsatz von $CaCl_2$, NaOH und Na_2SiO_3 deutet auf einen verbesserten Stofftransport hin.

Der Einsatz von FA zeigte als Additiv einen positiven Effekt auf die Abscheideleistung mit einer Verlängerung des t_{90}-Werts um mehr als 40 %, während die Verwendung als eigenständiges Sorbens zu einer Reduktion der Abscheideleistung um etwa 37 % führte. Dieses Verhalten ist auf den vergleichsweise geringen Calciumgehalt zurückzuführen. Das Puzzolan aus PS verbesserte die Abscheideleistung als eigenständiges Sorbens um etwa 17 %. Als Additiv wurde hingegen ein früherer Durchbruch (ca. 24 %) beobachtet. Der verzögerte Konzentrationsanstieg bei höheren PS-Anteilen weist auf eine potenziell verbesserte Verfügbarkeit der reaktiven Calciumzentren hin.

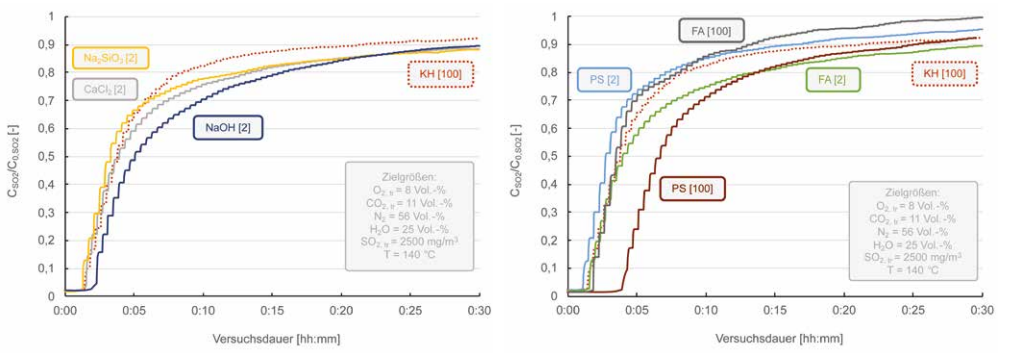


Abbildung 2: Durchbruchskurven hygroskopischer Stoffe (links) und puzzolanischer Zuschlagstoffe aus Papierschlammasche (PS) bzw. Flugasche (FA) (rechts); Massenanteil in [Ma.-%] auf 100 g Kalkhydrat

4 Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse stellen erste Indikatoren für das Potenzial der Additivierung kalkbasierter Sorbentien dar und bedürfen einer weiterführenden Validierung im Technikumsmaßstab. Zukünftige Arbeiten konzentrieren sich auf die vertiefte Untersuchung der zugrunde liegenden physikalischen und chemischen Wirkmechanismen, um die beobachteten Effekte besser einordnen zu können. Parallel dazu sollen die Ergebnisse auf industrielle Anwendungen übertragen werden. Hierfür werden bereits Versuche an der Wirbelfeuerung des Lehr- und Forschungsgebiets TEER geplant, die eine Monoklärschlammverbrennung mit anschließender Rauchgasreinigung ermöglicht [4]. Dort werden hergestellte Sorbentien oder Sorbensmischungen unter realen Bedingungen erprobt.

Danksagung

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

Literatur/Quellen

[1] *Abgasreinigung durch Chemisorption*, 3928:2017-01, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Berlin, Jan. 2017. [Online]. Available: https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3928-abgasreinigung-durch-chemisorption

[2] European Commission, *Best Available Techniques (BAT) reference document for waste incineration: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU* (Integrated Pollution Prevention and Control). Luxembourg: Publications Office, 2019.

[3] R. Karpf, „Prozessoptimierung an kalkbasierenden Rauchgasreinigungsverfahren," VDI Wissensforum, Seminar 435918, 2006.

[4] E. Peters, M. Schnell, K. J. Stark, and P. Quicker, „Betriebserfahrungen aus der kleinsten Klärschlammverbrennungsanlage der Welt," in Wasser und Abfall. [Online]. Available: https://www.springerprofessional.de/betriebserfahrungen-zur-verbrennung-von-klaerschlamm-im-kleinstm/51696572

Kontakt

M. Sc., Joel da Silva Félix, wissenschaftlicher Mitarbeiter
L.u.F. Thermoprozesse und Emissionsminderung in der Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft
Tel.-Nr. 0241 80-96575
E-Mail: dasilvafelix@teer.rwth-aachen.de
Homepage: www.teer.rwth-aachen.de

TEIL 3
Circular Economy/Geschäftsmodelle

Leitung:

Prof. Dr. Kathrin Greiff

Lisa Reissner, Mareike Fröhling, Miriam Sartor

Nachhaltigkeitskommunikation im Verbrauchermarkt

***Abstract**: Nachhaltige Konsumentscheidungen sind ein zentraler Hebel zur Erreichung globaler Umwelt- und Sozialziele, wie sie in den Sustainable Development Goals (SDGs) verankert sind. In diesem Beitrag wird untersucht, wie Nachhaltigkeitskommunikation im Verbrauchermarkt durch mehrdimensionale Labels und verbesserten Informationszugang transparenter, vertrauenswürdiger und wirkungsvoller gestaltet werden kann. Die Methodik umfasst eine umfassende Literaturanalyse, eine Marktanalyse von über 1000 Drogerieprodukten, eine deutschlandweite Online-Umfrage (n=527) sowie einen partizipativen Workshop mit acht ExpertInnen. Die Ergebnisse zeigen, dass derzeit vorherrschende Eigenlabels zwar dominant sind, aber nur geringe Glaubwürdigkeit besitzen. Verbraucher bevorzugen mehrdimensionale Labels, welche ökologische, soziale und ökonomische Kriterien vereinen und durch digitale Informationssysteme ergänzt werden. Diese ermöglichen eine einfache Zugänglichkeit und tiefere Transparenz, fördern das Vertrauen in Nachhaltigkeitsversprechen und erhöhen die Kaufbereitschaft für nachhaltige Produkte. Gleichzeitig werden Datenschutz- und Benutzeraufwandsbedenken als Barrieren identifiziert. Die Studie unterstreicht die Notwendigkeit unabhängiger Zertifizierungen, regelmäßiger Aktualisierungen sowie einer integrierten Kommunikationsstrategie, die alle Dimensionen der Nachhaltigkeit berücksichtigt. Abschließend werden praxisnahe Empfehlungen für die Weiterentwicklung von Nachhaltigkeitslabels gegeben, die eine lebensfähige Transformation hin zur Kreislaufwirtschaft unterstützen.*

1 Einleitung

Nachhaltigkeit ist ein zentrales Thema unserer Zeit und umfasst Ressourcenschutz, Artenvielfalt, Ökosystemschutz, nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sowie Klimaschutzmaßnahmen. Diese Aspekte sind in den 17 Sustainable Development Goals (SDG`s) der UN verankert. Besonders SDG 12 fordert nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster. Konsumentscheidungen stehen in einem Zusammenhang mit Ressourcenverbrauch und Emissionen, daher kann die Gestaltung von Informationsangeboten im Verbrauchermarkt ein potenzieller Ansatzpunkt zur Förderung von Nachhaltigkeitszielen sein. Eine wirksame Nachhaltigkeitskommunikation ist somit ein Schlüssel zur Umsetzung der Ziele der Kreislaufwirtschaft [1,2]. Die vorliegende Studie untersucht, wie VerbraucherInnen besser über nachhaltigen Konsum informiert werden können und welchen Einfluss Nachhaltigkeitslabels auf das Kaufverhalten haben. Forschungsfragen sind dabei:

RQ1: Inwieweit erhöht die Erweiterung mehrdimensionale Labels mit verbessertem Informationszugang die Transparenz von Produkten?

RQ2: Inwieweit beseht Interesse an leicht zugänglichen Produktinformationen?

RQ3: Inwieweit steigern mehrdimensionale Labels mit Informationszugang die Akzeptanz nachhaltiger Produkte?

Ziel ist es, Anforderungen an eine transparente, glaubwürdige und praxisnahe Nachhaltigkeitskommunikation zu formulieren, die zu umweltbewusstem Handeln beiträgt.

2 Methodik

Die Methodik soll eine ganzheitliche Betrachtung ermöglichen und kombiniert eine umfassende Literaturanalyse über 200 Veröffentlichungen, die Marktrecherche über 1065 Produkte in Drogeriemärkten, eine Marktanalyse zur technischen Machbarkeit, eine Online-Umfrage mit 527 Teilnehmenden aus ganz Deutschland mit unterschiedlichem Bildungsstand und aus unterschiedlichen Altersgruppen sowie einen Ideation-Workshop mit acht Teilnehmenden aus unterschiedlichen Berufsgruppen. Analysiert wurden u. a. die Informationslage, die Akzeptanz von Labels, das Vorkommen unabhängiger vs. eigener Zertifizierungen sowie innovative Ansätze zur Verbesserung der Nachhaltigkeitskommunikation [3,4]. Die Auswertung erfolgte in Excel sowohl quantitativ mittels Pivot-Tabellen, Häufigkeitsverteilungen und Chi²-Tests als auch qualitativ (Clusterung der Workshop-Ideen). Der Erhebungszeitraum erfolgte vom 08.01.2024 bis zum 28.02.2024 und erfolgte mittels Snowball Sampling über verschiedene soziale Medien, ortsansässige Unternehmen und Behörden. Die Datenanalyse erfolgte ausschließlich in anonymisierter Form.

2.1 Marktanalyse

In der Marktbegehung wurden Drogerieartikel auf Vorhandensein von Nachhaltigkeitskennzeichnungen geprüft. Dabei wurden die zwei größten Drogeriemärkte und die größte Parfümeriekette Deutschlands ausgewählt, um ein breites Angebot in unterschiedlichen Preiskategorien zu untersuchen. Die Häufigkeiten gelabelter Produkte betrugen in unserer Stichprobe 71% (DM), 78% (Rossmann)und 63% (Douglas). Unabhängige Zertifizierungen traten in der Stichprobe deutlich seltener auf als Händler-Eigenlabel. Diese rufen oftmals Greenwashing-Vorwürfe hervor [1,2] und übertragen das schlechte Image auf unabhängige Zertifizierungen [5]. Die Marktrecherche offenbarte zudem eine deutliche Diskrepanz zwischen den propagierten Nachhaltigkeitskommunikation der tatsächlichen Label-Nutzung in Drogeriemärkten [4].

2.2 Umfrage

Nur 4 der Befragten gaben an, derzeitigen Labels vollständig zu vertrauen, über 50% äußerten Skepsis (Umfrage, [3]). Teilnehmende bewerteten mehrdimensionale Labels (ökologische + soziale Kriterien + digitaler Informationszugang) in unserer Umfrage signifikant positiver als binäre Labels (nur ökologische, nur soziale Kriterien oder einzelne Aussagen). 67 % gaben in der Selbstauskunft an, dass ein mehrdimensionales Label im Vergleich zu binären Labels mit einer höheren Kaufbereitschaft für nachhaltige Produkte verbunden wäre [6]. Soziale Medien und persönliche Empfehlungen erwiesen sich als zentrale Informationsquelle. Teilnehmende sehen digitales Zusatzangebot (z. B. QR-Code/App) als potenziell nützlich an, gleichzeitig nannten sie Datenschutz und Aufwand als Nutzungshinderungen.

2.3 Marktrecherche

Die Marktrecherche untersuchte bereits vorhandene technische Möglichkeiten, zusätzliche Produktinformationen zu erhalten. Sie zeigt, dass es bereits Apps gibt, mit denen Kosmetikprodukte per Scan identifiziert und anhand eines Ampelsystems hinsichtlich ihrer Inhaltsstoffe bewertet werden können [7, 8]. Der Fokus liegt dabei ausschließlich auf der persönlichen Gesundheit, insbesondere auf Schad- und Zusatzstoffen. Technisch sind die Anwendungen praxistauglich, ihre Popularität scheint jedoch begrenzt. Eine Bewertung hinsichtlich der Nachhaltigkeit erfolgt nicht.

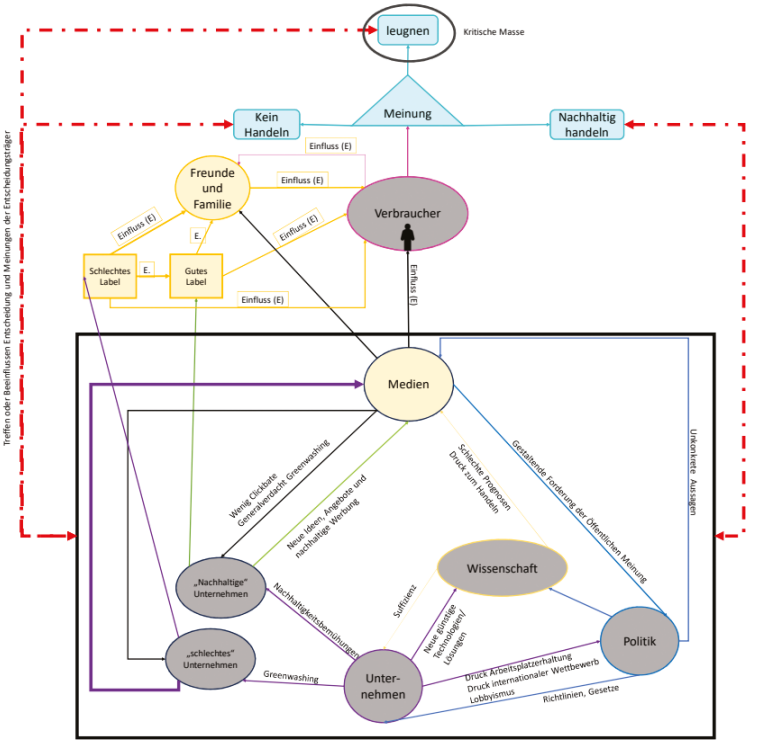
2.4 Workshop

In einem partizipativen Workshop wurden Ideen für die Gestaltung eines mehrdimensionalen Labels mit digitaler Anbindung erarbeitet. Die Beiträge wurden thematisch geclustert und in ein Konzept überführt.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass mehrdimensionale Labels mit digitalem Informationszugang von Befragten positiver bewertet werden und in der Selbstauskunft mit höherem Vertrauen assoziiert sind. Mehrdimensionale Labels werden als transparenter wahrgenommen und in der Selbstauskunft mit einer höheren Kaufbereitschaft für nachhaltige Produkte in Verbindung gebracht, unklare Vermittlungen können hingegen Verwirrung stiften [6]. Die im Workshop entwickelten Konzepte wurden nicht prototypisch getestet, sondern verbleiben auf konzeptioneller Ebene.

3 Ergebnisse

Die vorliegenden Befunde deuten darauf hin, dass mehrdimensionale Labels in Kombination mit digitalem Informationszugang von Befragten positiver bewertet werden und das Potential haben, Vertrauen zu fördern. Für eine belastbare Aussage über Wirksamkeit und Vertrauensbildung sind jedoch experimentelle oder feldbasierte Evaluationen erforderlich, die Ergebnisse zeigen aber vielversprechende Ansätze. Sie ermöglichen transparente, differenzierte Informationen und stärken möglicherweise das Vertrauen der VerbraucherInnen. Um Greenwashing zu verhindern, sind unabhängige Zertifizierungen und regelmäßige Aktualisierungen unerlässlich [1,2,6]. Nachhaltigkeitskommunikation muss ökologische, ökonomische und soziale Kriterien integrieren, um glaubwürdig und wirksam zu sein.



Die Untersuchung stellt konkrete Kommunikationsinstrumente vor, die Konsumentenverhalten ressourcenschonender, langlebiger und weniger CO_2-intensiver Produkte beeinflussen. Durch den mehrschrittigen ganzheitlichen Aufbau der Studie liefert die Arbeit sowohl Evidenz über bestehende Defizite (z. B. Vertrauensdefizite, Dominanz von Eigenlabels) als auch praxisnahe Ansätze (mehrdimensionale Labels + Informations-Tool), die Transformation hin zu zirkulären Workshopprozessen unterstützen könnten. Eine transparente, glaubwürdige Kommunikation wird von Befragten mit einer stärkeren Orientierung an ökologischen und sozialen Kriterien in Verbindung gebracht, dies könnte die Transformation von linearer zu zirkulärer Wirtschaftsweise unterstützen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Nachhaltigkeitskommunikation im Verbrauchermarkt in einem vielschichtigen Kommunikationssystem eingebettet ist, in der Politik, Unternehmen, Wissenschaft und Verbraucher interagieren. Die Medien, insbesondere soziale Netzwerke und persönliche Empfehlungen, fungieren als zentrale Vermittler. Eine klare, transparente und vertrauenswürdige Kommunikation von Nachhaltigkeitsinformationen gelingt nur, wenn diese komplexen Informationsflüsse berücksichtigt und gestaltet werden. Mehrdimensionale Labels mit integriertem digitalen Informationszugang können in diesem System eine Schlüsselrolle als unmittelbare und verständliche Informationsquelle am Point of Sale übernehmen.

4 Diskussion

Das Vertrauen der Verbraucher ist stark von der Glaubwürdigkeit sowohl der Labelanbieter als auch der übergeordneten Akteure abhängig. Missverständnisse, Überangebot und Greenwashing entstehen häufig durch ineffiziente Kommunikationsprozesse und fehlende Regulierung in den vorgelagerten Instanzen. Für eine effektive Nachhaltigkeitskommunikation ist daher neben der Entwicklung innovativer Label- und Informationssysteme auch eine verbesserte Koordination und Regulierung innerhalb der Kommunikationsstruktur erforderlich, um Informationsasymmetrien zu reduzieren und nachhaltige Kaufentscheidungen nachhaltig zu fördern.

Aufbauend auf den Erkenntnissen zur Bedeutung transparenter und mehrdimensionaler Nachhaltigkeitskommunikation wird die weitergehende Forschung insbesondere die Bedürfnisse und Herausforderungen kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) in den Fokus stellen. Ziel ist die Entwicklung und Evaluation eines digitalen Assistenzsystems, das suffizienz- und konsistenzbasierte KPIs integriert, um KMU bei der Umsetzung nachhaltiger Geschäftsmodelle praxisnah und effektiv zu unterstützen. Dabei werden soziale und organisationale Barrieren untersucht, die die Einführung solcher Technologien in KMU erschweren, und Strategien zu deren Überwindung entwickelt. Gleichzeitig soll das System helfen, die nachhaltigen Eigenschaften von Produkten transparenter zu machen und damit Verbrauchervertrauen und Akzeptanz nachhaltiger Produkte stärken – eine Forderung, die auch aus den Verbraucherumfragen und Workshops hervorgeht. Somit leistet die Forschung einen wichtigen Beitrag zur Förderung nachhaltiger Innovationsprozesse und zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit von KMU im Kontext von Industrie 5.0.

Danksagung

Ich danke Prof. Miriam Sartor sowie Dr. Mareike Fröhling herzlich für die wertvolle Unterstützung, fachliche Begleitung und konstruktiven Anregungen, die maßgeblich zum Gelingen dieser Forschung beigetragen haben. Die weitergehende Forschung für das digitale Assistenzsystem wird im Projekt *:bergische rohstoffschmiede* durch den *Europäische Union* im Rahmen des *EFRE.NRW* Programme gefördert.

Literatur/Quellen

[1] Grunert, K. G., Hieke, S., & Wills, J. (2014). Sustainability labels on food products: Consumer motivation, understanding and use. Food Policy, 44, 177–189. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2013.12.001

[2] Horne, R. E. (2009). Limits to labels: The of eco-labels in the assessment of product sustainability and routes to sustainable consumption. International Journal of Consumer Studies, 33(2), 175–182. https://doi.org/10.1111/j.1470-6431.2009.00752.x

[3] Verbraucherzentrale. (2023). Greenwashing: Nachhaltigkeitswerbung schadet mehr, als sie nutzt. Verbraucherzentrale Bundesverband. Abgerufen von https://www.vzbv.de/pressemitteilungen/greenwashing-nachhaltigkeitswerbung-schadet-mehr-als-sie-nutzt

[4] Göfke, N., Duplat, V., Wickert, C., & Tjemkes, B. (2021). A multi-stakeholder perspective on food labelling for environmental sustainability: Attitudes, perceived barriers, and solution approaches towards the "Traffic Light Index". Sustainability, 13(2), 933. https://doi.org/10.3390/su13020933

[5] Darnall, N., Ji, H. & Vazquez-Brust, D. (2018). Third-party certification, sponsorship and consumers' ecolabel use. Journal of Business Ethics, 150(4), 953-969. doi:10.1007/s10551-016-3138-2.

[6] Weinrich, R., & Spiller, A. (2016). Developing food labelling strategies: Multi-level labelling. Journal of Cleaner Production, 137, 1138–1148. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.156

[7] Yuca SAS. (2017). Yuka – Produkt Scanner [Mobile App]. Apple App Store/Google Play Store. https://yuka.io/de/

[8] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V. (2016). ToxFox – Der Produktcheck [Mobile App]. Apple App Store/Google Play Store. https://www.bund.net/themen/chemie/toxfox/

Kontakt

M.Sc. Lisa Reissner, wissenschaftliche Mitarbeiterin
Technische Hochschule Köln, :metabolon
Tel.-Nr. 02261 81966513
E-Mail: lisa.reissner@th-koeln.de
Homepage: https://www.th-koeln.de/personen/lisa.reissner/

Maximilian Vincent Erdmann, Gari Walkowitz

Zur Wirksamkeit von Ökomodulationen: Experimentelle Evidenz von Branchenexperten zur Erweiterten Herstellerverantwortung

***Abstract**: Die erweiterte Herstellerverantwortung (EPR) ist eine umweltpolitische Strategie, mit der Hersteller für das Lebenszyklusende ihrer Produkte verantwortlich gemacht werden sollen. Innerhalb dieses Rahmens werden unterschiedliche Formen der Ökomodulation als alternative Anreizmechanismen zur bestehenden EPR-Gebührenstruktur diskutiert, um ein nachhaltigeres Ökodesign von Produkten und Verpackungen zu fördern. Auf Grundlage eines groß angelegten verhaltensökonomischen Experiments mit Branchenexperten (N = 377) untersuchen wir unter kontrollierten Bedingungen die Wirksamkeit verschiedener Anreizstrategien auf das Ökodesign, das Produktgewicht, die ökologischen Auswirkungen sowie die Einnahmen der EPR-Systembetreiber. Zugleich analysieren wir die zugrunde liegenden psychologischen Mechanismen, die das Entscheidungsverhalten der Teilnehmenden beeinflussen. Die Ergebnisse zeigen erstmals in diesem Forschungsfeld, dass Ökomodulationen eine gerichtete Wirkung hin zu einem nachhaltigeren Ökodesign und einer Reduktion ökologischer Externalitäten entfalten. Im Gegensatz dazu setzt die derzeit vorherrschende Gebührenstruktur primär Anreize zur Reduktion des Produktgewichts. Umweltbezogene Werte der Branchenexperten weisen einen starken positiven Einfluss auf Ökodesign-Entscheidungen, jedoch lösen EPR-Gebühren einen Crowding-out-Effekt aus, der insbesondere bei weiblichen Teilnehmenden beobachtet wird. Darüber hinaus zeigen wir, dass Ökomodulationen trotz rückläufiger Einnahmen die Kosteneffizienz von EPR-Systembetreibern verbessern können.*

1 Einleitung

Die erweiterte Herstellerverantwortung hat sich seit den 1990er-Jahren als zentrales Instrument der europäischen Abfall- und Kreislaufwirtschaftspolitik etabliert. Ihr normatives Kernanliegen besteht darin, das Verursacherprinzip umzusetzen, indem Hersteller für die Entsorgungs- und Verwertungskosten ihrer Produkte am Lebenszyklusende aufkommen (Sachdeva et al. 2021). Neben der Finanzierung der Abfallbewirtschaftung verfolgt EPR jedoch ein weitergehendes Ziel: Durch geeignete Anreizstrukturen sollen Hersteller dazu motiviert werden, bereits in der Designphase ökologische Kriterien zu berücksichtigen und so die Kreislauffähigkeit ihrer Produkte und Verpackungen zu verbessern sowie Umweltbelastungen zu reduzieren (Lifset et al. 2023; Gui et al. 2018). Trotz ihrer breiten Implementierung bleibt jedoch umstritten, inwieweit bestehende EPR-Gebührensysteme tatsächlich geeignet sind, nachhaltiges Ökodesign wirksam zu fördern. Insbesondere die in der Praxis dominierende, gewichtsbasierte Gebührenstruktur steht in der Kritik. Zwar schafft sie Anreize zur Reduktion des Materialeinsatzes, sie setzt jedoch keine gezielten Signale für qualitative Aspekte des Ökodesigns, etwa Recyclingfähigkeit, Materialkomplexität oder übergreifende Zirkularität. Vor diesem Hintergrund rücken Ökomodulationen zunehmend in den Fokus von Forschung und Politik (Pruess and Garrett 2025; Lifset et al. 2023; Laubinger et al. 2021; Hogg et al. 2020). Sie zielen darauf ab, die EPR-Gebühren stärker an den tatsächlichen Umweltwirkungen bzw. End-of-Life-Kosten (EoL-Kosten) unterschiedlicher Produktdesigns auszurichten, etwa durch Bonus-, Malus- oder granular differenzierte Ge-

bührensysteme.

Trotz wachsender politischer und wissenschaftlicher Aufmerksamkeit besteht bislang ein zentrales Defizit: Es fehlt an belastbarer kausaler empirischer Evidenz zur tatsächlichen Wirksamkeit unterschiedlicher Formen der EPR-Gebühren und Ökomodulation. Der Mangel an geeigneten Daten erschwert bislang eine fundierte politikökonomische Bewertung bestehender EPR-Systeme sowie deren gezielte Weiterentwicklung im Hinblick auf die gesellschaftlichen Ziele der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft. Lifset et al. (2023) identifizieren diese Evidenzlücke explizit und plädieren dafür, Ökomodulation als experimentelles Politikfeld zu begreifen, das systematische Evaluationen erfordert. Unser Forschungsprojekt adressiert diese Forschungslücke, indem es erstmals kausale empirische Evidenz zur Wirkung unterschiedlicher EPR-Anreizstrukturen liefert. Auf Basis eines groß angelegten verhaltensökonomischen Experiments mit Branchenexperten (N = 377) untersuchen wir unter kontrollierten Bedingungen, wie sich verschiedene Gebühren- und Ökomodulationssysteme auf Ökodesign- und Produktgewicht-Entscheidungen, ökologische Auswirkungen sowie die Einnahmen der EPR-Systembetreiber auswirken. Darüber hinaus analysieren wir die zugrunde liegenden psychologischen Mechanismen, welche das Entscheidungsverhalten der Entscheidungsträger beeinflussen.

2 Die experimentelle Methode in der EPR-Forschung

Die Forschung zur erweiterten Herstellerverantwortung ist bislang stark von spieltheoretischen Modellierungen, institutionellen Analysen und ex-post-Fallstudien realer Systeme geprägt. Diese Ansätze sind unverzichtbar, stoßen jedoch an methodische Grenzen, wenn es um die Identifikation eindeutiger Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge geht. In realen Märkten wirken EPR-Gebühren stets im Zusammenspiel mit weiteren Regulierungen, Kostenstrukturen, Marktpreisen und organisationalen Zielkonflikten. Dadurch bleibt häufig unklar, ob beobachtete Veränderungen im Produktdesign tatsächlich durch EPR-Anreize ausgelöst wurden (Pruess and Garrett 2025). Experimentelle Methoden bieten hier einen komplementären Zugang. Durch die gezielte Variation einzelner institutioneller Parameter unter kontrollierten Bedingungen ermöglichen sie es, kausale Effekte isoliert zu identifizieren (Falk and Heckman 2009). Während Laborexperimente in der Umwelt- und Verhaltensökonomik etabliert sind, wurden sie im Kontext der Industrial Ecology und der EPR-Forschung bislang kaum eingesetzt. Gerade hier liegt jedoch ein erhebliches Potenzial, da EPR-Systeme explizit auf Verhaltensänderungen von Führungskräften abzielen.

Unser Verhaltensexperiment ist als Between-Subjects-Design mit fünf Treatments konzipiert. Die Teilnehmenden (N = 377) – allesamt Branchenexperten mit Managementerfahrung – übernahmen die Rolle von Unternehmensentscheidern, die ein zentrales Produkt ihres Unternehmens gestalten. Jede Entscheidung umfasste zwei Dimensionen: ein Ökodesign-Level sowie das Produktgewicht. Diese Kombination bestimmte sowohl den monetären Gewinn als auch die verursachten Umweltwirkungen. Die Treatments bildeten unterschiedliche regulatorische Szenarien ab: einen unregulierten Markt, ein gewichtsbasiertes EPR-Gebührensystem sowie drei Formen der Ökomodulation (Bonus-, Malus- und granulare Systeme). Die Gebühren wurden von einem EPR-Systembetreiber erhoben, dessen Einnahmen den aggregierten Gebührenzahlungen entsprachen. Ein zentrales Merkmal des Designs bestand darin, dass sowohl monetäre Anreize als auch Umweltwirkungen real waren: Die monetären Auszahlungen erfolgten tatsächlich, und die Umweltwirkungen wurden durch den realen Erwerb und die Stilllegung von CO_2-Zertifikaten mithilfe der Klimaschutzorganisation myclimate operationalisiert. Durch dieses Design lassen sich die reinen Anreizwir-

kungen unterschiedlicher EPR-Gebühren- und Ökomodulationssysteme unter kontrollierten Bedingungen kausal identifizieren. Gleichzeitig ermöglicht der experimentelle Ansatz, verhaltensökonomische Einflussfaktoren systematisch zu berücksichtigen, indem individuelle Wertpräferenzen der Teilnehmenden mithilfe standardisierter Fragebögen erhoben werden (Schwartz 2012). Auf diese Weise können neben den direkten Anreizwirkungen auch zugrunde liegende psychologische Mechanismen analysiert werden, die das Entscheidungsverhalten der Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger im Kontext der erweiterten Herstellerverantwortung beeinflussen (Falk and Heckman 2009).

3 Ergebnisse und Implikationen

Die Ergebnisse des Experiments zeigen deutliche Wirkungsunterschiede zwischen gewichtsbasierten Gebühren und Ökomodulationen. Das gewichtsbasierte System führt im Vergleich zum unregulierten Markt nicht zu einer signifikanten Verbesserung des Ökodesigns, sondern primär zu einer Reduktion des Produktgewichts. Diese Anpassung verbessert zwar bestimmte Umweltwirkungen, etwa durch Materialeinsparungen oder transportbezogene Emissionen, kann jedoch zulasten der Recyclingfähigkeit und damit der Zirkularität des Produkts gehen (Sachdeva et al. 2021; Maitre-Ekern 2021; Shi and Min 2013). Demgegenüber entfalten alle getesteten Formen der Ökomodulation eine klare Lenkungswirkung hin zu nachhaltigeren Ökodesign-Levels und zu einer signifikanten Reduktion ökologischer Externalitäten. Insgesamt schneiden Bonus-Ökomodulationen der Tendenz nach am besten gegenüber strafenbasierten Malus-Systemen und komplexeren granularen Gebührenstrukturen ab. Dies deutet darauf hin, dass positive Anreize ein besonders geeignetes Instrument darstellen, um nachhaltiges Ökodesign ohne zusätzliche regulatorische Komplexität zu fördern. Umweltbezogene Werte wirken sich positiv auf nachhaltige Designentscheidungen aus; zugleich zeigen sich aber Crowding-out-Effekte durch monetäre EPR-Anreize, insbesondere bei weiblichen Teilnehmenden, welche die Wirkung ihrer intrinsischen Anreize leicht abschwächen. Aus Sicht der EPR-Systembetreiber gehen Ökomodulationen zwar mit geringeren Einnahmen einher, stärken jedoch die Umsetzung des Verursacherprinzips, da Gebühren enger an den tatsächlichen EoL-Kosten der Produktgestaltung ausgerichtet sind und damit eine kosteneffizientere Internalisierung ökologischer Externalitäten ermöglichen.

4 Fazit und Ausblick

Unsere Forschung zeigt, dass experimentelle Methoden einen substantiellen Mehrwert für die EPR-Forschung bieten. Sie ermöglichen es, unterschiedliche Gebührendesigns kausal zu vergleichen und deren Wirkmechanismen systematisch offenzulegen. Für die Politik implizieren die Ergebnisse, dass Ökomodulationen ein wirksames Instrument zur Förderung nachhaltigen Ökodesigns darstellen, während sie EPR-Systembetreibern eine kosteneffizientere Internalisierung ökologischer Externalitäten ermöglichen können. Im Hinblick auf zukünftige Forschung sollten experimentelle Ansätze stärker mit Feldstudien kombiniert werden, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf konkrete Produktkategorien und institutionelle Kontexte weiter zu prüfen. Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse die Notwendigkeit, EPR-Systeme als lernende und evidenzbasierte Politikfelder zu begreifen, deren Weiterentwicklung auf systematischer Wirkungsanalyse beruhen sollte.

Danksagung

Die Autoren danken Reid Lifset, Eugénie Joltreau, Arno Apffelstaedt, Stephan Henneberg, Simon Glöser-Chahoud, Heike Hennig-Schmidt und Alexander Leischnig für wertvolle Hinweise und Kommentare sowie Hari Krishnan Suresh für seine Unterstützung im Forschungsprozess. Hilfreiche Anregungen aus Diskussionen auf der ESA 2024 (Helsinki), der ESA 2025 (Brno), dem BEES-Workshop 2024 (Florenz) und der Konferenz Is and Ought of Business Ethics 2025 (Wittenberg) werden ebenfalls dankend anerkannt. Das Forschungsprojekt wurde von der TU Bergakademie Freiberg gefördert.

Literatur/Quellen

Falk, Armin; Heckman, James J. (2009): Lab Experiments Are a Major Source of Knowledge in the Social Sciences. In *American Association for the Advancement of Science* (326), pp. 535–538. Available online at https://www.science.org/doi/10.1126/science.1168244, checked on 7/17/2025.

Gui, Luyi; Atasu, Atalay; Ergun, Özlem; Toktay, L. Beril (2018): Design Incentives Under Collective Extended Producer Responsibility. A Network Perspective. In *Management Science* 64 (11), pp. 5083–5104. Available online at https://www.jstor.org/stable/48748343.

Hogg, D.; Sherrington, C.; Papineschi, J.; Hilton, M.; Massie, A.; Jones, P. (2020): Study to Support Preparation of the Commission's Guidance for Extended Producer Responsibility Schemes: Recommendations for Guidance. Eunomia Research & Consulting Ltd. Available online at https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08a892b7-9330-11ea-aac4-01aa75ed71a1/language-en, checked on 11/12/2025.

Laubinger, Frithjof.; Brown, A.; Börkey, P.; Dubois, M. (2021): Modulated fees for extended producer responsibility schemes (EPR). OECD. Available online at https://one.oecd.org/document/ENV/EPOC/WPRPW(2020)2/FINAL/En/pdf, checked on 11/12/2025.

Lifset, Reid; Kalimo, Harri; Jukka, Antti; Kautto, Petrus; Miettinen, Mirella (2023): Restoring the incentives for eco-design in extended producer responsibility: The challenges for eco-modulation. In *Waste Managemen*t 168, pp. 189–201. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.05.033.

Maitre-Ekern, Eléonore (2021): Re-thinking producer responsibility for a sustainable circular economy from extended producer responsibility to pre-market producer responsibility. In *Journal of Cleaner Production* 286, p. 125454. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125454.

Pruess, Jakob T.; Garrett, Rachael D. (2025): Potential effectiveness of extended producer responsibility: An ex-ante policy impact analysis for plastic packaging waste in Belgium, France, and Germany. In *Resources, Conservation and Recycling* 219, Article 108297. DOI: 10.1016/j.resconrec.2025.108297.

Sachdeva, A.; Araujo, A.; Hirschnitz-Garbers, M. (2021): Extended Producer Responsibility and Ecomodulation of Fees. Opportunity: Ecomodulation of Fees as a Way Forward for Waste Prevention. Available online at https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2021/50052-Extended-Producer-Responsibility-and-ecomodulation-of-fees-web.pdf, checked on 11/12/2025.

Schwartz, Shalom H. (2012): An Overview of the Schwartz Theory of Basic Values. In *Online Readings in Psychology and Culture* 2 (1). DOI: 10.9707/2307-0919.1116.

Shi, Wenbo; Min, Kyung Jo (2013): A Study of Product Weight and Collection Rate in Closed-Loop Supply Chains with Recycling. In *IEEE Trans. Eng. Manage*. 60 (2), pp. 409–423. DOI: 10.1109/TEM.2012.2214222.

Kontakt

M.A., Maximilian Vincent Erdmann, wissenschaftlicher Mitarbeiter
TU Bergakademie Freiberg, Freiberg Center for Circular Economy (FCCE)
Tel: +493731394189
E-Mail: Maximilian-Vincent.Erdmann@bwl.tu-freiberg.de
Homepage: https://tu-freiberg.de/fakultaet6/wirtschaftsethik/team
LinkedIn: https://www.linkedin.com/in/maximilian-vincent-erdmann/

Lena-Marie Hupperich, Stefanie Kraft, Jörg Woidasky, Anne-Kathrin Cassier-Woidasky

An der Schnittstelle zwischen Nutzung und Entsorgung: Analyse von Einmalgebrauchsprodukten im Operationssaal

***Abstract**: Trotz ihres hohen Abfallaufkommens sind Operationsbereiche (OP) bislang kaum Gegenstand abfallwirtschaftlicher Untersuchungen. Insbesondere der Zeitpunkt der Abfallentstehung an der Schnittstelle zwischen Nutzung und Entsorgung von Einmalgebrauchsprodukten ist unzureichend erforscht. Ziel des Beitrags ist die systematische, zeitaufgelöste Analyse der Abfallentstehung im OP. Dazu wurden 14 Operationen (OP) mittels einer über dem Instrumentier-Tisch positionierten Kamera dokumentiert und alle Abfallbehälter prä- und postoperativ verwogen. Für jedes verwendete Produkt wurden minutengenau Auspacken, Nutzung und Entsorgung erfasst und die Produkt- und Abfallströme in Sankey-Diagrammen visualisiert. An drei Erhebungstagen fielen insgesamt 78,93 kg Abfall an (Ø 5,63 kg pro OP), wobei auch gleichartige Eingriffe deutliche Masse-Unterschiede zeigten. Die meisten Produkte wurden in der Vorbereitungsphase ausgepackt, die Entsorgung erfolgte überwiegend gebündelt in der Nachbereitungsphase, obwohl viele Produkte bereits früher genutzt wurden. Verpackungsmaterialien fielen in der Vorbereitungsphase ohne Patientenkontakt an, hier besteht Potential für kreislaufwirtschaftliche Maßnahmen, während Trennungsansätze während der laufenden OP nur begrenzt praktikabel erscheinen. Die Erhebung liefert eine erste belastbare Datengrundlage über die zeitliche Abfallentstehung im OP und bietet eine Grundlage, um Kreislaufwirtschaftspotenziale zu identifizieren sowie Materialeinsatz und Abfallmanagement im Gesundheitswesen zu optimieren.*

1 Einleitung

Der Gesundheitssektor hat einen erheblichen Einfluss auf Klima und Umwelt und ist in Deutschland für 6,1 % der gesamten Treibhausgas-Emissionen verantwortlich (Pichler, o.D.). Pro Krankenhausbett fallen jährlich 1.545 kg Abfall an (Vielsack et al., 2025). Operationsbereiche gehören zu den abfallintensivsten Bereichen eines Krankenhauses, werden jedoch bisher abfallwirtschaftlich kaum untersucht und gelten als Black Box (Cassier-Woidasky et al., 2025).

Einmalgebrauchsprodukte tragen erheblich zum Abfallaufkommen bei und ersetzen zunehmend wiederverwendbare Produkte (Sousa et al., 2021). Dennoch werden sie nahezu ausschließlich thermisch verwertet, wodurch wesentliche kreislaufwirtschaftliche Potentiale ungenutzt bleiben (Feld et al., 2023).

Der Zeitpunkt, an dem Produkte im Prozess einer Operation zu Abfall werden, ist bislang nur unzureichend erforscht, denn kreislaufwirtschaftliche Untersuchungen fokussieren meist vor- und nachgelagerte Produktlebenszyklusphasen. Erste Erkenntnisse liefert ein Vorgängerprojekt, welches während Kataraktoperationen alle genutzten Produkte und deren Abwurfzeitpunkte erfasste. Aufgrund der begrenzten Stichprobe und des methodischen Vorgehens bestand jedoch Bedarf an umfassenderen und detaillierteren Untersuchungen (Rando et al., 2023).

Der vorgelegte Beitrag zielt darauf ab, den Status Quo der Abfallentstehung im OP an der Schnittstelle zwischen Nutzung und Entsorgung systematisch und zeitaufgelöst zu erfassen.

2 Feldzugang

Zur Vorbereitung der Datenerhebung wurden fünf explorative Hospitationen in OP-Bereichen von drei Kliniken durchgeführt. Ziel war es, die Abfallprozesse im OP sowie Rahmenbedingungen für die geplante Erhebung zu erfassen.

3 Methodik

Die Datenerhebung erfolgte strukturiert unter Einsatz von Kamera und Waage. Eine Actionkamera (GoPro Hero 13 Black) wurde über dem sterilen Instrumentier-Tisch positioniert. Alle Abfallbehälter wurden vor und nach jeder OP mittels einer Industriewaage (Kern IFC 30 K3) verwogen. Patienten- und Personaldaten wurden nicht erfasst und der Ton der Videoaufnahmen wurde entfernt. Ergänzend wurden Feldnotizen angefertigt. Die Methode wurde vorab in einem Pretest in einer Klinik erprobt und optimiert. Für jedes Produkt wurde minutengenau Auspacken, Nutzung und Entsorgung tabellarisch erfasst. Die zeitaufgelösten Produkt- und Abfallströme wurden in Sankey-Diagrammen (Software: e!Sankey 5 pro) visualisiert.

4 Ergebnisse

Es wurden 14 Operationen an 3 Tagen erfasst. Der Schwerpunkt lag auf Eingriffen der Adipositas- und Viszeralchirurgie (Magen-Bypass, Cholezystektomien, Leisten- und Nabelhernien), ergänzt durch 2 Lungenoperationen und 2 Notfalleingriffe. Die durchschnittliche Operationsdauer betrug 94 Minuten (Min: 57 min; Max: 204 min).

An den 3 Erhebungstagen fiel ein Gesamtabfall von 78,93 kg an. Davon entfielen 85 % auf klinische Abfälle ohne besondere Entsorgungsanforderungen (AS 18 01 04), 14 % auf Verpackungen (AS 15 01 06) und 0,6 % auf Spitzabfälle (AS 18 01 01). Pro OP lag die Abfallmasse im Schnitt bei 5,63 kg (Min: 3,17 kg; Max: 8,69 kg). Auch gleichgeartete Eingriffe wiesen deutliche Unterschiede in den Abfallmassen auf (z.B. Cholezystektomien 3,83 kg vs. 3,17 kg, Magen-Bypass-OPs 8,69 kg vs. 8,08 kg).

Die zeitaufgelöste Analyse der Produkt- und Abfallströme zeigt charakteristische Muster der Abfallentstehung im OP. Der überwiegende Teil der Einmalgebrauchsprodukte wird bereits in der Vorbereitungsphase ausgepackt und bereitgestellt, während der operativen Phase werden nur vereinzelt zusätzliche Produkte nachgereicht. Die Entsorgung erfolgt hingegen überwiegend gebündelt in der Nachbereitungsphase, obwohl der Nutzungszeitpunkt vieler Produkte bereits deutlich früher im OP-Verlauf liegt. Einzelne Produkte verbleiben am oder im Patienten (z.B. Clips, Pflaster) und gehen nicht unmittelbar in den Abfallstrom über. Mengenmäßig dominieren unter anderem Tupfer und Kompressen sowie Abdecktücher die Produkt- und Abfallströme, was sich auch im Sankey-Diagramm widerspiegelt (s. Abbildung 1). Flüssige Materialien wie Spül- und Desinfektionslösungen konnten aufgrund der freien Dosierung durch das Personal nur eingeschränkt quantifiziert werden.

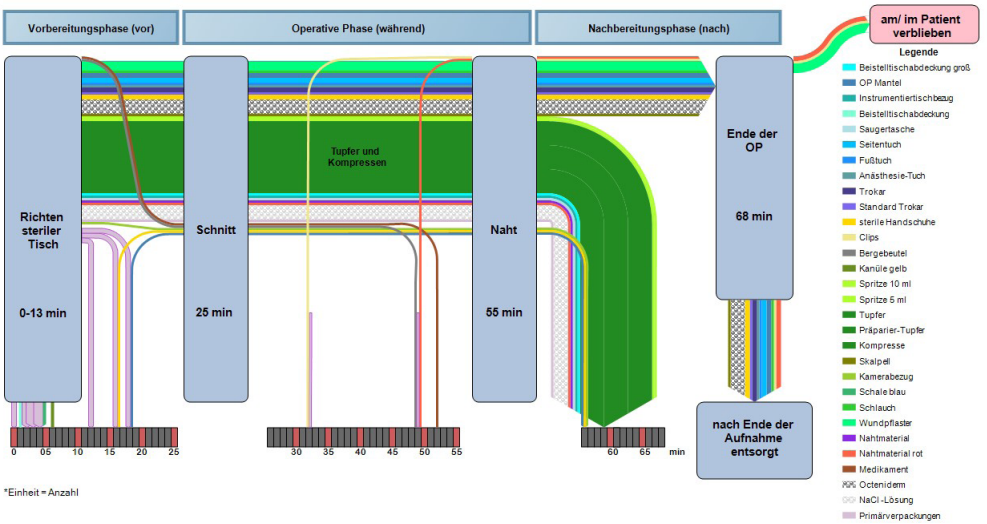


Abbildung 1: Sankey-Diagramm einer Cholezystektomie-OP (Dauer: 67min, Abfallmasse: 3,17 kg)

5 Diskussion

Die zeitliche Differenz zwischen Nutzung und Entsorgung verdeutlicht, dass Abfall im OP nicht punktuell, sondern prozessual entsteht. Die gebündelte Entsorgung in der Nachbereitungsphase ist vor allem durch Anforderungen an Sterilität, Arbeitsorganisation und Sicherheit erklärbar, etwa durch Zählkontrollen von Tupfern und Kompressen. Trennungsansätze während der laufenden OP erscheinen daher nur begrenzt praktikabel. Insbesondere in der Vorbereitungsphase zeigt sich ein relevantes Potential, da hier große Mengen an Verpackungsmaterialien ohne Patientenkontakt anfallen. Eine nachträgliche Sortierung der kontaminierten Abfälle in der Nachbereitungsphase ist aus Hygiene- und Arbeitsschutzgründen kaum praktikabel und verdeutlicht einen Bedarf an übergeordneten Lösungsansätzen.

Aufgrund der begrenzten Zahl erfasster OPs ist die Generalisierbarkeit der Ergebnisse noch eingeschränkt, die Methode ist jedoch auf weitere OPs und abfallintensive Krankenhausbereiche übertragbar. Zukünftig wäre es zudem methodisch wünschenswert, systematisch erfassen zu können, welches Produkt welchem Abfallbehälter in der Entsorgung zugeführt wird.

6 Fazit

Die zeitaufgelöste Erfassung von Produkt- und Abfallströmen im OP stellt eine methodische Innovation dar und liefert eine erste belastbare Datengrundlage zur Abfallentstehung und -zusammensetzung im Operationsprozess. Sie ermöglicht die Identifikation zeitlicher und prozessualer Ansatzpunkte für kreislaufwirtschaftliche Maßnahmen und bildet eine Grundlage für weiterführende Analysen, in denen Werk- und Wertstoffe identifiziert und in zeitaufgelöste Stoffstrombilder überführt werden können.

Die Ergebnisse sind praxisrelevant für Kliniken, Hersteller und Entsorger zur Planung und Optimierung von Materialeinsatz und Abfallmanagement. Damit leistet die Arbeit einen ersten Beitrag, um Recyclingpotentiale im OP systematisch zu erschließen und den Gesundheitssektor in Richtung Kreislaufwirtschaft weiterzuentwickeln. Die Beobachtungen bestätigten ein hohes Abfallaufkommen, geringe Abfalltrennung und heterogene, historisch gewachsene Entsorgungsstrukturen. Zugleich zeigte sich, dass kreislaufwirtschaftliche Ansätze an die Machbarkeit aus Nutzerperspektive angepasst werden müssen und neben lokalen auch umfassendere (Branchen-) Lösungen erforderlich sind.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Vorhabens MEiK - „Medizinische Einmalgebrauchsprodukte in der Kreislaufwirtschaft – Wege von der Beseitigung zur stofflichen Verwertung“. Es wird mit dem Förderkennzeichen 03EI5020A vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert.

Literatur/Quellen

Cassier-Woidasky, A.-K., Zecha, F., Vielsack, A., & Woidasky, J. (2025). Mit Kreislaufwirtschaft im Krankenhaus gegen die Klimakrise. Viele Ansätze, aber wenig Daten sowie weitere Hürden für ein wichtiges Zukunftsthema. Dr. med. Mabuse, 3, 55–59. https://zeitschrift-mabuse.de/content/component/content/article/18918-mit-kreislaufwirtschaft-im-kra562736

Feld, M., Riedel, M., Schmidt, J., Auer, M., Fimpeler, S., Cassier-Woidasky, A.-K., & Woidasky, J. (2023). Kreislaufwirtschaftliche Ansätze für das Gesundheitswesen. MÜLL und ABFALL, 10, 8. https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2023.10.08

Pichler, P. (o.D.). Sachbericht zum Projekt. Evidenzbasis Treibhausgasemissionen des deutschen Gesundheitswesens GermanHealthCFP. https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/5_Publikationen/Gesundheit/Abschlussberichte/GermanHealthCFP_Sachbericht.pdf

Rando, S., Haas-Adam, J., Mühlbauer, J., Spengler, R., Wirth, L., Woidasky, J., & Cassier-Woidasky, A.-K. (2023). Abfall beseitigen. Ansätze zur Kreislaufwirtschaft im OP. Pflegeintensiv. Fachzeitschrift für Intensiv-, Anästhesie- und OP-Pflege, 20(4), 1–11.

Sousa, A. C., Veiga, A., Maurício, A. C., Lopes, M. A., Santos, J. D., & Neto, B. (2021). Assessment of the environmental impacts of medical devices: A review. Environment, Development and Sustainability, 23(7), 9641–9666. https://doi.org/10.1007/s10668-020-01086-1

Vielsack, A., Cassier-Woidasky, A.-K., & Woidasky, J. (2025). Benchmarkstudie zur Abfallentstehung an deutschen Krankenhäusern. Kurzdarstellung der Ergebnisse. https://www.hs-pforzheim.de/fileadmin/user_upload/uploads_redakteur/Forschung/IWWT/Projekte/meik/Aktuelle_Benchmarkstudie_Version.pdf

Kontakt

M.A., Lena-Marie Hupperich, wissenschaftliche Mitarbeiterin
Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes
Tel.-Nr. 0681 5867 99070
E-Mail: lena-marie.hupperich@htwsaar.de

TEIL 4
Stoffstrommanagement und -bewertung

Leitung:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky

Lucia Aguirre Molina, Sarah Schmidt, David Laner

Recycling von Kunststofffolien in Deutschland: Materialflüsse und Recyclingpotenziale

***Abstract**: Der Anstieg des globalen Konsums von Kunststoffprodukten resultiert in einer kontinuierlichen Zunahme von Kunststoffabfallmengen, wobei Kunststofffolien einen signifikanten Anteil darstellen. Aufgrund ihrer heterogenen Polymerzusammensetzung und komplexen Schichtstrukturen stellen sie eine besondere Herausforderung für die stoffliche Verwertung dar. Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Materialflüsse von Kunststofffolien in Deutschland systematisch zu erfassen, deren Zusammensetzung und sektorale Verteilung zu analysieren sowie ungenutzte Recyclingpotenziale aufzuzeigen. Die Untersuchung basiert auf einer hochauflösenden Materialflussanalyse (MFA) für das Jahr 2023, die auf Literatur- und Datenrecherchen sowie ergänzenden Abfallprobenahme- und Charakterisierungskampagnen beruht. Die Bilanzierung der Stoffströme erfolgt mit der Software STAN unter expliziter Berücksichtigung von Unsicherheiten. Erste Untersuchungsergebnisse zeigen, dass im Jahr 2023 rund 2 Millionen Tonnen (Mt) Kunststofffolienabfälle in Deutschland anfielen, wovon über 70 % dem Verpackungssektor zuzuordnen sind. Hinsichtlich der Materialzusammensetzung dominierten Polyethylen und Polypropylen. Bezüglich der Anwendungsbereiche wird deutlich, dass Mehrschichtfolien überwiegend im Lebensmittelverpackungsbereich eingesetzt wurden. Derzeit werden lediglich etwa 26 % der Kunststofffolienabfälle stofflich recycelt, während der Großteil energetisch verwertet wird. Die Ergebnisse liefern eine fundierte Grundlage zur Bewertung von Kreislaufpotenzialen und zur Weiterentwicklung von Recyclingstrategien für Kunststofffolien in Deutschland.*

1 Einleitung

Der weltweit steigende Materialbedarf infolge von Bevölkerungswachstum und zunehmendem Wohlstand hat Kunststoffe zu einem zentralen Werkstoff moderner Massenproduktion gemacht (Kaiser 2024). Im Jahr 2023 erreichte die globale Kunststoffproduktion rund 413,8 Millionen Tonnen (Mt), wovon 12,3 % auf Europa entfielen (Plastics Europe 2024). In Deutschland wurde im selben Jahr ein Kunststoffverbrauch von etwa 11,2 Mt ermittelt (Conversio 2024). Aufgrund ihrer kurzen Nutzungsdauer fallen insbesondere Kunststoffverpackungen nahezu im gleichen Umfang als Abfall an.

Kunststofffolien sind ein wichtiger Bestandteil des Kunststoffmarktes, da sie leicht und flexibel einsetzbar sind (Bredács et al. 2025; Makarova et al. 2025). In Europa entfallen rund 22 % der Nachfrage für PE und PP auf Folien, die etwa 45 % der Kunststoffverpackungen ausmachen (Arnold et al. 2022; Plastic Recyclers Europe und Independent Commodity Intelligence Services 2023). In Deutschland lag ihr Anteil an Einwegkunststoffverpackungen 2017 bei rund 42 % (Schmidt und Laner 2021). Trotz vergleichsweise hoher Sammelquoten werden Kunststofffolien bislang nur zu geringen Anteilen stofflich verwertet. Besonders Mehrschicht- und Multimaterialfolien erschweren die mechanische Verwertung und werden in der Regel energetisch verwertet (Morris 2024; Bredács et al. 2025). Obwohl für Deutschland umfassende Kunststoffmassenbilanzen vorliegen, fehlt eine spezifische, hochaufgelöste Bilanzierung von Folien. Ziel der Studie ist es daher, die Materialflüsse von Kunststofffolien systematisch zu erfassen, Recyclingpotenziale aufzuzeigen und Optimierungsstrategien für die Abfallwirtschaft abzuleiten.

2 Methodik

Zur Erstellung der Kunststofffolienbilanz in Deutschland wurde eine Materialflussanalyse (MFA) auf Güter- und Subgüterebene durchgeführt. Materialflussanalysen dienen zur systematischen Untersuchung von Lagern und Flüssen innerhalb eines zeitlich und räumlich definierten Systems (Brunner und Rechberger 2014).

Die Grundlage der Analyse bilden umfangreiche Sekundärdaten aus Literatur und nationalen sowie europäischen Datenquellen, darunter Studien von Conversio und PlasticsEurope. Dabei werden Informationen zu Polymerarten, Schichtstrukturen, Nutzungssektoren und Entsorgungswegen von Kunststofffolien gesammelt und aufbereitet. Ergänzend werden Primärdaten aus Abfallprobenahmen, Charakterisierungskampagnen und Interviews mit relevanten Stakeholdern genutzt, um die Datenqualität zu validieren und die Modellannahmen abzusichern. Die aufbereiteten Daten wurden mit der Software STAN (https://www.stan2web.net/) bilanziert, wobei Unsicherheiten explizit berücksichtigt wurden, um die wesentlichen Flüsse von Kunststofffolien abzubilden. Das Modell dokumentiert die Sammel-, Sortier- und Behandlungswege, erfasst den Verbrauch und Abfallströme und berücksichtigt kritische Faktoren wie Mehrschichtstrukturen. Auf diese Weise wird der Status quo für das Jahr 2023 abgebildet und eine Analyse unterschiedlicher Szenarien ermöglicht.

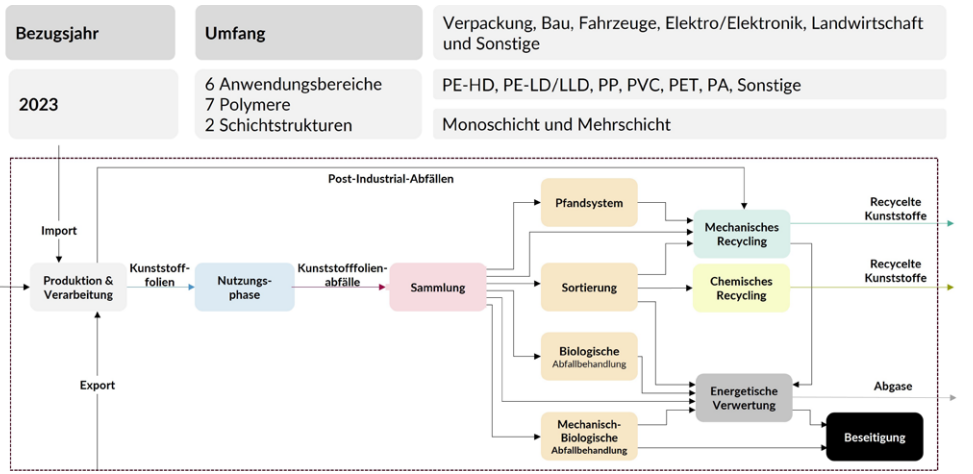


Abbildung 1: Vereinfachtes qualitatives Materialflussdiagramm der Kunststofffolienbilanz in Deutschland

Die Analyse umfasst sieben unterschiedliche Polymerarten auf Subgüterebene, die als Grundlage zur Ermittlung der Gesamtmengen an Kunststofffolien auf der Güterebene dienen. Als Eingabedaten wurden Flussdaten, Transferkoeffizienten und Massenanteile genutzt. Auf Basis der modellierten Flüsse wurde eine Datenbank zu Materialeigenschaften, Polymerarten und Recyclingpfaden erstellt, die als Grundlage für weitere Szenarioanalysen und Optimierungsstrategien dient.

3 Ergebnisse

Erste Ergebnisse zeigen, dass im Jahr 2023 in Deutschland rund 2,7 Mt Kunststofffolien verbraucht wurden, was etwa 24 % des gesamten Kunststoffverbrauchs entspricht. Mit einem Anteil von über 50 % ist der Verpackungssektor der bedeutendste Verbraucher von Kunststofffolien, wobei der überwiegende Teil der Folien unmittelbar als Abfall anfiel. Insgesamt fielen 2,0 Mt Kunststofffolienabfälle an, was etwa 50 % des gesamten Kunststoffabfalls entspricht. Bezüglich der Materialzusammensetzung dominierten Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD), Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) und Polypropylen (PP), die zusammen rund 84 % aller Kunststofffolienabfälle ausmachten. Die Menge an Mehrschichtfolienabfällen betrug knapp 0,4 Mt und stammte überwiegend aus Lebensmittelverpackungen.

Vorläufige Ergebnisse zu den Entsorgungswegen zeigen, dass im Jahr 2023 etwa ein Viertel der Kunststofffolienabfälle recycelt wurden. Dabei wurden vor allem Verpackungs- und Agrarfolien gezielt einer stofflichen Verwertung zugeführt, während der Rest energetisch verwertet wurde. Von 0,7 Mt Kunststofffolien, die dem Recycling zugeführt wurden, konnten 0,5 Mt tatsächlich recycelt werden.

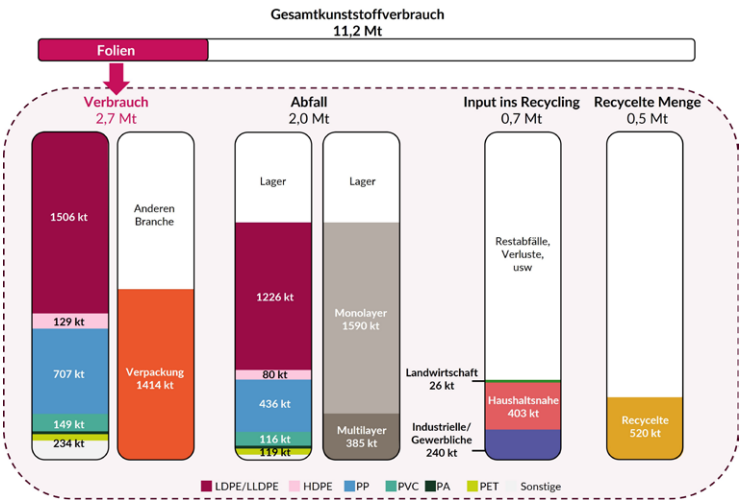


Abbildung 2: Kunststofffolien in Deutschland 2023 nach Polymer, Anwendung und Schichtstruktur

4 Fazit

Kunststofffolien machen einen erheblichen Anteil des Kunststoffverbrauchs in Deutschland aus, wobei Verpackungen den größten Teil der Abfälle verursachen. Nur etwa ein Viertel der Folien wird recycelt, während Mehrschichtstrukturen die stoffliche Verwertung erschweren. Die vorläufigen Ergebnisse werden durch detaillierte Analysen der Entsorgungswege und Recyclingpotenziale ergänzt, um gezielte Optimierungsmaßnahmen für die Kunststoffkreisläufe abzuleiten.

Danksagung

Der Beitrag wurde im Rahmen des Forschungsprojekts BioLoop erstellt, welches durch die VolkswagenStiftung im Rahmen der Förderinitiative „Zirkularität mit recycelten und biogenen Rohstoffen“ gefördert wird.

Literatur/Quellen

Arnold, Mona; Manoochehri, Shahrzad; Wahlström, Margareta; Nelen, Dirk; Colgan, Shane (2022): Flexible plastics in Europe’s circular economy.

Bredács, Márton; Barretta, Chiara; Geier, Jutta; Feuchter, Michael; Plevová, Kateřina; Oreski, Gernot et al. (2025): Progress towards composition-based inline sorting and recycling of multilayer polymer packaging. In: Sustainable Materials and Technologies, e01385. DOI: 10.1016/j.susmat.2025.e01385.

Conversio (2024): Langfassung zur Conversio Studie „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 - Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen“.

Kaiser, Katharina; Schmid, Markus; Schlummer, Martin (2018): Recycling of Polymer-Based Multilayer Packaging: A Review. In: Recycling 3 (1), S. 1. DOI: 1210.3390/recycling3010001.

Laner, David; Rechberger, Helmut; Astrup, Thomas (2014): Systematic Evaluation of Uncertainty in Material Flow Analysis. In: J of Industrial Ecology 18 (6), S. 859–870. DOI: 10.1111/jiec.12143.

Makarova, Oksana A.; Ravi, Basuhi; Sobkowicz, Margaret J.; Masato, Davide; Olivetti, Elsa A. (2025): Addressing Favorable and Challenging Flexible Plastic Packaging Waste Flows: A Material Flow Analysis. In: J Adv Manuf & Process, Artikel e70014. DOI: 10.1002/amp2.70014.

Morris, Barry A. (2024): Flexible packaging past, present and future: Reflections on a century of technology advancement. In: Journal of Plastic Film & Sheeting 40 (2), S. 151–170. DOI: 10.1177/87560879241234946.

Plastic recyclers Europe; Independent Commodity Intelligence Services (2023): 2023 FLEXIBLE FILMS MARKET IN EUROPE. STATE OF PLAY PRODUCTION, COLLECTION AND RECYCLING DATA.

Plastics Europe (2024): Plastics - the Facts 2024. Schmidt, Sarah; Laner, David (2021): The multidimensional effects of single-use and packaging plastic strategies on German household waste management. In: Waste management (New York, N.Y.) 131, S. 187–200. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.06.003.

Schmidt, Sarah; Laner, David (2021): The multidimensional effects of single-use and packaging plastic strategies on German household waste management. In: Waste management (New York, N.Y.) 131, S. 187–200. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.06.003.

Kontakt
Lucia Aguirre Molina, M.Sc., wissenschaftliche Mitarbeiterin
Universität Kassel
Tel.-Nr.: +49 561 804-1835
E-Mail: aguirre-molina@uni-kassel.de
Homepage: www.uni-kassel.de/go/RMAT/

Johannes Scholz, Lukas Hoppe, Vera Susanne Rotter

bioDYM: Dynamische Materialflussmodellierung biogener Systeme für das Kohlenstoffmanagement

***Abstract**: Dynamische Materialflussmodellierung stellt in den Bereichen Industrial Ecology, Kreislaufwirtschaft und Kohlenstoffmanagement eine wichtige Methode zur Quantifizierung und Bewertung von Systemleistungen dar. Insbesondere die Modellierung zeitlicher Abhängigkeiten von Prozessen ist für bisherige Lösungen herausfordernd. bioDYM ist eine Python-basierte Open-Source-Software für die Modellierung dynamischer MFA-Systeme. Basierend auf dem ODYM-Framework bietet es zahlreiche Module (z.B. DSM, biologischer Abbau, Szenario- & Unsicherheitsmanager) und Verteilungsfunktionen. Durch eine dreigeteilte Struktur in bioDYM-System-Manager, bioDYM-Engine und bioDYM-Dashboard wurde eine nutzerfreundliche Lösung geschaffen, welche die Modellierung von der Berechnung trennt und so Reproduzierbarkeit und Transparenz ermöglicht. Der wissenschaftliche Mehrwert für das Kohlenstoffmanagement wird anhand einer komplexen Fallstudie über C-Sequestrierung im Weizenstroh-Kohlenstoffkreislauf demonstriert. Die Ergebnisse zeigen deutlich den positiven Einfluss von Kohlenstoffstabilität und Produktlebensdauer durch Pyrolyse gegenüber direktem Bodeneintrag oder stofflicher Nutzung auf den Umfang der Lagerstätten.*

1 Einleitung

Kohlenstoffmanagement-Strategien (CMS) zielen darauf ab, entstandene Treibhausgase aus der Atmosphäre fernzuhalten oder zu entfernen, sowie Kohlenstoff zu recyceln und so Abhängigkeiten von fossilem Kohlenstoff zu reduzieren (Pfeiffer et al., 2024). Ein zentrales Element ist der Aufbau von Kohlenstofflagerstätten außerhalb der Atmosphäre mittels „Carbon Dioxide Removal“ (CDR) (IPCC, 2023). Biomasse nimmt eine wichtige Funktion als biogene Kohlenstoffquelle und Senke ein. Die gezielte Nutzung und Akkumulation von biogenem Kohlenstoff in der Anthro-, Bio- oder Lithosphäre wird als CDR-Strategie klassifiziert. Dazu zählen auch kurzfristige Methoden (Jahrzehnte bis Jahrhunderte) wie die Nutzung von biobasierten Produkten im Bau, die Herstellung von Pflanzenkohle aus landwirtschaftlichen Reststoffen und die Sequestrierung von Kohlenstoff im Boden (IPCC, 2023).

Die Evaluierung von CMS erfordert die Analyse komplexer Systeme über lange Zeiträume. Die Materialflussanalyse (MFA) und insbesondere die dynamische MFA (dMFA) haben sich als Methoden zur Bilanzierung von Sektoren oder ganzer Systeme bewährt (Aryapratama and Pauliuk, 2019; Brunner and Rechberger, 2020; Wang and Haller, 2024), da diese dynamische Faktoren wie z.B. Produktlebensdauern oder biologische Prozesskinetik modellieren können. Bestehende Softwarelösungen weisen jedoch Limitationen auf: Entweder erlaubt die statische Struktur nicht die notwendige Flexibilität zur Modellierung dynamischer oder spezifischer biologischer Prozesse (z. B. STAN 2.7 (Cencic and Rechberger, 2008)) oder sie erfordern Einarbeitungsaufwand und Programmierkenntnisse (z.B. ODYM (Pauliuk and Heeren, 2020)).

Ziel dieser Arbeit ist es, diese Lücke durch die Entwicklung der modularen und nutzerfreundlichen dMFA-Software bioDYM (Biogenic Dynamic Material Systems Model) zu schließen. Der Mehrwert wird anhand einer Fallstudie über das Kohlenstoffmanagement von Weizenstroh demonstriert.

2 Methodik

bioDYM basiert technisch auf dem ODYM-Framework (Pauliuk and Heeren, 2020) und den allgemeinen MFA-Grundlagen (Baccini and Brunner, 2012; Brunner and Rechberger, 2020). Es wurde als Python-Software mit Fokus auf Nutzerfreundlichkeit entwickelt. Es besteht aus drei Hauptbestandteilen:

1. *bioDYM-System Manager*: Das MFA-System inklusive Systemkonfiguration, Systemgrenzen und aller Systemparameter wird in einer umfangreichen MS-Excel Datei definiert. Durch Eingabeüberprüfungen, Drop-Down Eingaben und Tooltips wird die Systemdefinition ohne Programmierkenntnisse möglich. Ein Referenz-Manager dient zum Referenzieren von Literatur.
2. *bioDYM-Engine:* Der Python-Code importiert alle definierten Systemparameter und berechnet das System. Neben herkömmlicher MFA-Berechnung sind z.B. auch Module zur dynamischen Lager-Modellierung (DSM) und für biologische Mineralisierungsprozesse erster Ordnung (FOMP) mittels eines Zwei-Pool-Modells (Cayuela et al., 2010) integriert. Ein Szenario- & Unsicherheitsmanager mittels Monte-Carlo-Simulationen erlauben die Ergebnisvalidierung.
3. *bioDYM-Dashboard*: Ein Jupyter-Notebook dient als Nutzeroberfläche zur Systemauswertung. Lediglich der Dateipfad der Input-Datei muss hier definiert werden. Ansonsten ist keine Interaktion mit dem Code notwendig. Alle Berechnungsergebnisse werden visualisiert und als Exceldateien exportiert. Massenbilanz- und Konsistenzprüfung helfen Fehler zu identifizieren. Ein dynamisches Sankey-Diagramm sowie zahlreiche interaktive Visualisierungen und Diagramme erlauben die Ergebnisauswertung und Interpretation.

2.1 Fallstudie: Kohlenstoffkreislauf von Weizenstroh

Die Forschungsfrage der Fallstudie lautet: Welcher Verwertungspfad von Weizenstroh schafft nach 100 Jahren das größte Kohlenstofflager? Untersucht wird das Speicher- und C-Sequestrierungspotenzial von Weizenstroh auf einer Anbaufläche von 1.000 km² in Deutschland im Zeitraum 2025-2125. Modelliert werden die hierarchischen Ebenen Material, Wassergehalt (WC) und Trockenmasse (DM) sowie der Kohlenstoffgehalt der DM (CC). Das System ist als Kohlenstoffkreislauf modelliert: Aus der Atmosphäre (P0) und der Umwelt (P1) werden Kohlenstoff und weitere Substanzen (Wasser, Mineralien etc.) in Biomasse umgewandelt und nach Lebensende zersetzt und rückgeführt. So soll die Bildung von Biomasse mittels Photosynthese und die Zersetzung durch biologischen Abbau oder thermische Verwertung dargestellt werden. Abbildung 1 stellt das untersuchte System inklusive der Systemgrenzen dar.

Die Inputdaten basieren auf einer Modellierung und Extrapolation verfügbarer Erntestatistiken in Deutschland. Verglichen werden drei Verwertungsstrategien mit einem Anteil von jeweils 33%:

1. Die direkte Bodeneinarbeitung nach der Getreideernte,
2. die Pyrolyse mit anschließender Ausbringung von Biokohle und
3. die stoffliche Nutzung von Stroh als Baustoff mit anschließender thermischer Verwertung.

Alle Prozessparameter (Effizienzen, Produktlebensdauer, Abbauparameter) basieren auf folgender Fachliteratur und sind im *bioDYM-System Manager* verfügbar.

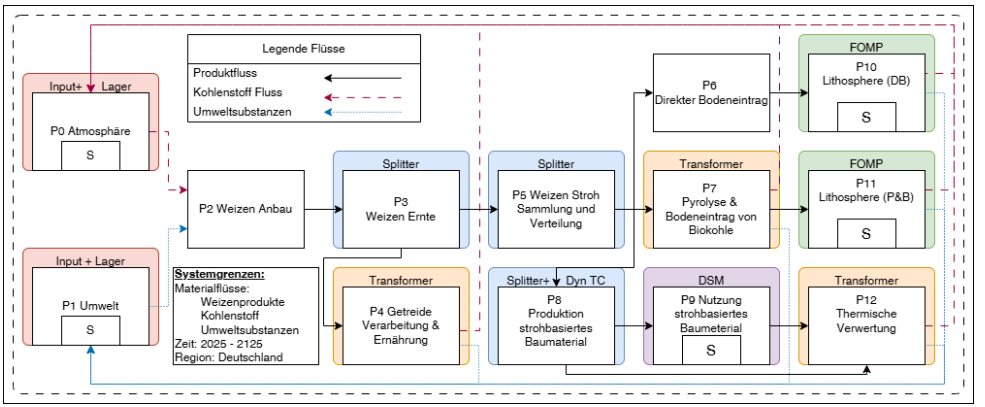


Abbildung 1: Systemdiagramm inklusive der Systemgrenzen. Abgebildet sind 12 Prozesse mit 5 Lagern. Farbige Rahmen stellen die unterschiedlichen Prozesstypen dar. Verwendet werden Input+ Lager-, Splitter-, Transformer-, DSM- und FOMP-Prozesse.

3 Ergebnisse

bioDYM steht als Open-Source-Software (MIT-Lizenz) auf GitHub[1] zur Verfügung. Das Programm umfasst etwa 200 Funktionen, 20.000 Zeilen Code und 43 Python-Tests. Die modulare Architektur erlaubt die Modellierung komplexer Systeme auf Basis des ODYM-Frameworks und ergänzt dieses durch Nutzerfreundlichkeit und bioDYM-Module. Eine umfangreiche Dokumentation, Hilfestellungen sowie Beispielstudien vereinfachen den Start in die Nutzung. Tabelle 1 beschreibt die Hauptmodule und Kernfunktionen von bioDYM. Eine genauere Übersicht ist in der Projektdokumentation enthalten.

Tabelle 1: Übersicht über Hauptmodule und Kernfunktionen von bioDYM

Hauptmodul	**Beschreibung der Kernfunktion**
Systemkonfiguration	Definition von Systemgrenzen, Materialien & Elementen, (Material --> Wassergehalt/ Trockenmasse --> C-Gehalt)
Flussmodellierung	Definition von Flüssen und Flusszusammensetzung, Dynamischer MFA-Input nach Jahren
Prozessmodellierung	Definition von Prozessen/ Prozesstypen (Input; Output; Splitter; Transformer) Definition von Transferkoeffizienten (statisch /dynamisch)
Lagermodellierung	Definition von Lagern und Lagertypen; DSM: kohortenbasierte Produktlebensdauer FOMP: Zwei-Pool-Modell nach (Cayuela et al., 2010) Initial Stock: Definition von Anfangsbeständen.

1 https://github.com/JScholz-tech/Biodym_JS

Systemprüfung	Massenbilanzprüfung und Konsistenzprüfung inklusive Nutzerfeedback; Fehler wenn ≠ 100%;
Visualisierung	Dynamische Multi-Element-Sankey-Diagramme; Visualisierungen von Flüssen, Prozessen und Lagern.
Szenario-Manager	Multiplikation, Addition oder Ersetzen der meisten Systemparameter sowie Visualisierung von Szenario-Differenzen
Monte Carlo Simulation	Definition von Unsicherheiten der meisten Systemparameter mittels Verteilungsfunktionen (Normal, Lognormal, Uniform, Triangular)

3.1 Fallstudie: Kohlenstoffkreislauf im Weizenstroh

Der Weizenanbau in den Systemgrenzen entnimmt der Atmosphäre über 100 Jahre ca. 62 Mio. Mg C, wovon 83% im Kreislauf geführt werden. Abbildung 2 visualisiert die Kohlenstoffflüsse in einem Sankey-Diagramm im Jahr 2125. Aussagekräftig sind die Unterschiede zwischen Input und Output der Lager, welche auf die Lagerakkumulation hindeuten. Die untersuchten Verwertungswege und Lager speichern im Jahr 2125 kumuliert ca. 9,5 Mio. Mg C. Dabei sind deutliche Effizienzunterschiede zu beobachten. Die Verwendung von Weizenstroh als Baumaterial schafft aufgrund hoher angenommener Lebenszeiten bis zum Jahr 2075 ein Lager von ca. 3,2 Mio. Mg C. Aufgrund der angenommenen Zunahme der Erntemenge und Effizienzsteigerungen in der Produktion steigt dieses auf ca. 4,2 Mio. Mg C bis 2125 an. Durch eine schnelle Zersetzungsrate ist der direkte Bodeneintrag von Weizenstroh, mit ca. 0,53 Mio. Mg C, kaum dazu in der Lage Kohlenstoff im Boden zu speichern. Obwohl die Vorbehandlung mittels Pyrolyse lediglich eine Kohlenstoffausbeute von 50% hat, wächst das Lager in der Lithosphäre auf ca. 4,8 Mio. Mg C. Aufgrund der hohen Kohlenstoffstabilität bildet der Kohlenstoff in der Lithosphäre (P&B) nach etwa 85 Jahren das größte Kohlenstofflager im System. Die Inputdatei für die Studie „Weizenstroh_DGAW“ sowie alle Modellierungsergebnisse, Szenarios und MC-Simulation-Ergebnisse sind auf GitHub einsehbar und können im Detail mit bioDYM getestet werden.[2]

bioDYM – Fallstudie Kohlenstroffkreislauf Weizenstroh – Element: CC Jahr: 2125

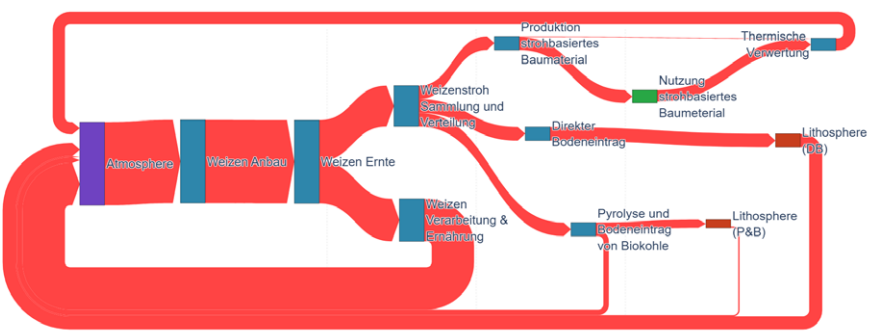


Abbildung 2: Interaktives bioDYM-Sankey-Diagramm auf Kohlenstoffebene (Ausschnitt aus dem Jahr 2125). Im Sankey zu sehen sind Kohlenstoffflüsse (rot), Lager (Lila), reguläre Prozesse (blau), DSM-Prozesse (grün), FOMP-Prozesse (braun).

2 https://github.com/JScholz-tech/Biodym_JS/tree/master/03_studies

4 Fazit & Ausblick

bioDYM steht als validierte und getestete Open-Source-Software für weitere Studien und Entwicklungen zur Verfügung. Es ist dabei nicht auf Biomasse beschränkt, sondern erlaubt die freie Wahl von Gütern und Gestaltung von Systemen. Es positioniert sich damit in der Lücke zwischen statischen MFA-Tools und komplexen Programmier-Frameworks. Durch die Trennung von Modellierung und Code sollen dMFAs zugänglicher werden. Kommende Schritte könnten die Implementierung von Data-Reconciliation als alternativen Lösungsansatz sowie eine Verbesserung der Nutzeroberfläche umfassen.

Die Fallstudie Weizenstroh macht die Relevanz derartiger Lösungen für das Kohlenstoffmanagement deutlich, da so dynamische CMS inklusive komplexer biologischer Prozesse modelliert werden können. Insbesondere die hohe Relevanz der Kohlenstoffstabilität und Produktlebensdauern wird deutlich, welche das Speicherpotenzial maßgeblich beeinflussen. Der modulare Aufbau von bioDYM ermöglicht die Erweiterung um weitere biomassespezifische Prozessmodule wie die Modellierung von Bio- oder Deponiegasbildung.

5 Literatur/Quellen

Aryapratama, R., Pauliuk, S., 2019. Estimating in-use wood-based materials carbon stocks in Indonesia: Towards a contribution to the national climate mitigation effort. Resources, Conservation and Recycling 149, 301–311. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.010

Baccini, P., Brunner, P.H., 2012. Metabolism of the Anthroposphere: Analysis, Evaluation, Design, 2nd ed. The MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/8720.001.0001

Brunner, P.H., Rechberger, H., 2020. Handbook of material flow analysis: for environmental, resource, and waste engineers, Second edition, First issued in paperback. ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York.

Cayuela, M.L., Oenema, O., Kuikman, P.J., Bakker, R.R., Van Groenigen, J.W., 2010. Bioenergy by-products as soil amendments? Implications for carbon sequestration and greenhouse gas emissions. GCB Bioenergy 2, 201–213. https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01055.x

Cencic, O., Rechberger, H., 2008. Material Flow Analysis with Software STAN. Journal of Environmental Engineering and Management 18.

IPCC (Ed.), 2023. Mitigation Pathways Compatible with Long-term Goals, in: Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, pp. 295–408. https://doi.org/10.1017/9781009157926.005

Pauliuk, S., Heeren, N., 2020. ODYM—An open software framework for studying dynamic material systems: Principles, implementation, and data structures. J of Industrial Ecology 24, 446–458. https://doi.org/10.1111/jiec.12952

Pfeiffer, J., Erlach, B., Fischedick, M., Fuss, S., Geden, O., Löschel, A., Pittel, K., Ragwitz, M., Stephanos, C., Weidlich, A., 2024. Kohlenstoffmanagement integriert denken: Anforderungen an eine Gesamtstrategie aus CCS, CCU und CDR. Schriftenreihe “Energiesystem der Zukunft” (ESYS). https://doi.org/10.48669/esys_2024-5

Wang, R., Haller, P., 2024. Dynamic Wood Consumption Forecast in Germany from 2020 to 2050. Forests 15, 1943. https://doi.org/10.3390/f15111943

Kontakt

Johannes Roland Scholz, wissenschaftlicher Mitarbeiter
Technische Universität Berlin
Tel.-*Nr. +49(0)30 - 314 79765*
E-Mail: J.Scholz@tu-berlin.de
Homepage: https://www.tu.berlin/circulareconomy

Magdalena Werner

Ökologische Betrachtung verschiedener Entsorgungswege von Bauschutt- und Bodenabfällen

***Abstract**: Diese Arbeit untersucht die ökologischen Auswirkungen der gängigen Entsorgungs- und Verwertungswegen für Bauschutt und Bodenabfälle mit Hilfe einer vergleichenden Ökobilanz. Als Wirkungsindikatoren werden Global Warming Potential, Abiotic Depletion Potential – Fossil Fuels, kumulierter Energieaufwand und Naturraumbeanspruchung, die mit LANCA® bewertet wird, betrachtet. Werden Betonabfälle verfüllt, entstehen ökologische Mehrbelastungen von 60-150 % in den betrachteten Wirkungskategorien, bei den Bodenabfällen von 150-3600 % und bei den gemischten Bauschuttabfällen von 17-360 %. Es kommt zu ökologischen Entlastungen bei einer Verfüllung der Abfälle bei den Wirkungsindikatoren der Naturraumbeanspruchung nach der Renaturierung (Phase der Transformation). In der Nutzungsphase (Phase der Occupation) ist ein Recycling der Abfälle jedoch umweltschonender, da Umweltschäden vermieden werden. Insgesamt zeigt sich, dass ein Recycling ökologisch vorteilhafter ist, wenn die hergestellten RC-Materialien bautechnische Eigenschaften erfüllen, Schadstoffgrenzwerte einhalten und über kurze Distanzen transportiert werden. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse für die Transportdistanzen ist eine Verfüllung einem Recycling vorzuziehen, wenn die Abfälle für ein Recycling über mehr als 30 km transportiert werden müssen. Es wird deutlich, dass das Recycling von Bauschutt und Bodenabfällen ein hohes Potential für ein nachhaltiges Wirtschaften bietet. Ein geringerer Flächenverbrauch und (ggf.) kürzere Transportdistanzen führen zu geringeren Umweltbelastungen. Dies wird im Hinblick auf den in Deutschland herrschenden Flächendruck umso bedeutsamer. Werden Bauschutt- und Bodenabfälle vermehrt verfüllt oder deponiert, ist langfristig davon auszugehen, dass Abbauflächen für Sand und Kies und Deponieflächen in Deutschland knapp werden, was wiederum zu noch längeren Transportdistanzen führen würde.*

1 Einleitung

Das Bauwesen ist eine der ressourcen- und energieintensivsten Branchen. Es verursacht etwa 40 % des gesamten Energieverbrauchs und mehr als ein Drittel der CO_2-Emissionen (Global Alliance for Buildings and Construction, 2020). In Deutschland hat es einen Rohstoffbedarf von ca. 500 Mio. t Gesteinskörnung und ist für den Großteil des Abfallaufkommens verantwortlich (KWB, 2023). Angesichts der ehrgeizigen Klimaziele der EU, insbesondere des Ziels der Klimaneutralität bis 2050 im Rahmen des European Green Deal und des „Fit-for-55"-Pakets, besteht erheblicher Handlungsbedarf, um den Ressourcenverbrauch und die Treibhausgasemissionen in der Bauindustrie zu reduzieren. Hierfür muss eine Vielzahl von Maßnahmen ergriffen werden. Dazu zählen unter anderem die Verlängerung der Nutzungsphasen von Bauwerken sowie ressourcenschonendes Bauen. Diese Arbeit widmet sich der Entsorgung der anfallenden mineralischen Bau- und Abbruchabfälle sowie den potenziellen Umweltbelastungen, die dabei entstehen können.

Zur Quantifizierung dieser Umweltbelastungen wird eine vergleichende Ökobilanz durchgeführt, in der gängige Entsorgungswege der Abfallfraktionen Boden und Steine (AVV-Nr. 17 05 01; jährlich ca. 125 Mio. t), Beton (AVV-Nr. 17 01 01; jährlich ca. 25 Mio. t) sowie gemischte Bauschuttabfälle (Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik; AVV-Nr. 17 01 07; jährlich ca. 27 Mio. t) untersucht werden

(Destatis, 2024). Ziel ist es, Chancen aufzuzeigen, die ein ökologisch vorteilhaftes Management dieser Abfälle bieten kann.

2 Methodik und Durchführung der Ökobilanz

Die vergleichende Ökobilanz wird gemäß den Vorgaben der DIN EN ISO 14040/14044 durchgeführt, mit der Anpassung, dass nicht der gesamte Lebenszyklus eines Produkts betrachtet wird, sondern ausschließlich die End-of-Life-Phase. Dies ist im Bauwesen sinnvoll, da sich die Nutzungsphase von Gebäuden in der Regel über mehrere Jahrzehnte erstreckt und Veränderungen in der Herstellungsphase keinen Einfluss auf die in derselben Zeitspanne anfallenden Abfallmengen haben. Für die betrachteten Abfallfraktionen werden die gängigen Entsorgungswege (End-of-Life-Szenarien) im Geltungsbereich Deutschlands bei durchschnittlichem Technologiestand analysiert und miteinander verglichen. Gleiche Prozessmodule werden – wie bei diesem Typ von Ökobilanz üblich – nicht berücksichtigt.

Eine Ökobilanz besteht aus der Festlegung der funktionellen Einheit und des Untersuchungsrahmens, der Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung sowie der Auswertung. Als funktionelle Einheit wird die Entsorgung einer Tonne Abfall definiert. Entsprechend den Anforderungen der DIN EN ISO 14044 (Deutsches Institut für Normung, 2021) werden die Systeme so ausgelegt, dass ihre Vergleichbarkeit gewährleistet ist. Es werden folgende Szenarien untersucht:

- Für Betonabfälle: Recycling im Hochbau, Recycling im Tiefbau sowie Verfüllung der Abfälle
- Für saubere Bodenabfälle: Recycling und Verfüllung der Abfälle
- Für verschmutzte Bodenabfälle: Recycling, Verfüllung und Deponierung der Abfälle
- Für gemischte Bauschuttabfälle: Recycling und Verfüllung der Abfälle

Untersuchungsrahmen und Sachbilanz basieren auf verschiedenen Datenquellen. Es wurden Interviews mit Vertreter:innen der Entsorgungsbranche (Rückbau und Aufbereitung), von Verbänden, von Bauunternehmen sowie des öffentlichen Bauwesens geführt. Darüber hinaus standen Daten zum Energieverbrauch und zu Mengenflüssen einer Aufbereitungsanlage zur Verfügung. Ergänzend wurden Daten des Statistischen Bundesamtes zum Abfallaufkommen und -verbleib genutzt (Destatis, 2024), in Verbindung mit einer Literaturrecherche sowie der Ökobaudat als frei zugänglicher Datenbank (Ökobaudat, 2025).

Zur Abschätzung von Dauer und Ausmaß der Flächennutzung beim Abbau von Primärmaterial wurden Rahmenbetriebspläne von Tagebauen ausgewertet, die im Rahmen von Planfeststellungs- oder Raumordnungsverfahren öffentlich zugänglich sind. Diese enthalten unter anderem Angaben zur Abbaufläche und zur geplanten Abbaumenge sowie Informationen zur Dauer des Abbaus und zur Nutzung der Flächen vor und nach ihrer Inanspruchnahme. Insgesamt wurden 20 Rahmenbetriebspläne geplanter Vorhaben aus Sachsen, Brandenburg, Baden-Württemberg und Bayern ausgewertet. Alle Sachbilanzdaten wurden im Rahmen der Auswertung auf Konsistenz und Vollständigkeit geprüft.

Bei der Auswahl der Wirkungsindikatoren wurden sowohl die Einschätzungen der Expert:innen als auch die in vergleichenden Studien verwendeten Indikatoren sowie die Datenverfügbarkeit berücksichtigt. Betrachtet werden das Potenzial zur Verknappung fossiler Energieträger (Abiotic Depletion Potential, Fossil Fuels; ADPF), der kumulierte Energiebedarf (KEA), das Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential, GWP) sowie die Naturraumbeanspruchung, berechnet mit LANCA® (Bos et al., 2016).

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verfüllung von Betonabfällen ökologische Mehrbelastungen von 60–150 %, bei Bodenabfällen von 150–3600 % und bei gemischtem Bauschutt von 17–360 % verursacht, jeweils im Vergleich zu einem Recycling. Einzig bei der Naturraumbeanspruchung in der Transformationsphase kann die Verfüllung zu ökologischen Entlastungen führen. Diese entstehen, wenn vormals zerstörte Waldflächen (z. B. durch Kiesabbau) renaturiert und durch Ausgleichsmaßnahmen ökologisch aufgewertet werden.

In der Nutzungsphase (Occupation) hingegen ist das Recycling der Abfälle ökologisch vorteilhafter. Voraussetzung für ein Recycling ist, dass die hergestellten Recycling-Baustoffe die bautechnischen Anforderungen erfüllen, Schadstoffgrenzwerte eingehalten werden und die Transportdistanzen kurz bleiben.

Die Sensitivitätsanalyse macht deutlich, dass eine Verfüllung ökologisch vorteilhafter sein kann, wenn Primärmaterialien lokal verfügbar sind. In vielen urbanen Räumen, wo der Bedarf an Baustoffen und das Abfallaufkommen hoch sind, ist dies meist nicht der Fall. Hier bietet sich das Recycling an, insbesondere bei regionalen Engpässen der Sand- und Kiesversorgung. (Elsner, 2022).

Der Flächenbedarf für den Abbau von Primärbaustoffen variiert stark und ist abhängig von der Ausprägung der Vorkommen in den vorgesehenen Abbaugebieten. Je größer der Flächenbedarf, desto intensiver der Eingriff in den Naturraum, was eine höhere Umweltbelastung bei einer Verfüllung oder Beseitigung der Abfälle bewirkt.

Kritisch zu betrachten ist die ökologische Bewertung der Deponierung, besonders in der Phase der Transformation. Es wurde angenommen, dass stillgelegte Deponien unter die Nutzungsklasse ungenutztes Grasland fallen. So ergeben sich rechnerisch ökologische Vorteile, die tatsächlichen, langfristigen Schädigungen von Ökosystemen werden jedoch nicht ausreichend berücksichtigt, z. B. durch eingeschränkte Nutzbarkeit der Fläche oder die gestörte Grundwasserregeneration durch technische Abdichtungen. Hier zeigte sich, dass generische Charakterisierungsfaktoren in LANCA® die tatsächlichen Umweltauswirkungen nicht widerspiegeln.

Trotz einer nicht immer vollständigen Datenlage ist das Ergebnis eindeutig. Recycling bietet ein großes Potenzial für nachhaltiges Wirtschaften. Geringerer Flächenverbrauch und (ggf.) kürzere Transportwege reduzieren die Umweltbelastung. Neue Deponien oder Abbauflächen zu erschließen, welche Transportdistanzen verkürzen könnten, wäre unter dem bestehenden Flächendruck nur begrenzt realisierbar und wirkt sich nachteilig auf die Naturraumbeanspruchung aus.

4 Fazit

Ein stärkerer politischer Wille zur Förderung des Recyclings ist erforderlich. Gespräche mit Fachleuten und ebenfalls Aussagen der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (BMUV, 2024) zeigen, dass RC-Baustoffe im öffentlichen Bau kaum Anwendung finden, weder in Beton (RC-GK Typ 1 und 2) noch als ungebundene Materialien im Straßenbau. Beispielsweise werden ehemalige Trag- und Frostschutzschichten bei Straßenerneuerungen häufig verfüllt, obwohl sie durch einfache Siebung erneut verwendet werden könnten.

Hürden bestehen vor allem in einem hohen bürokratischen Aufwand, rechtlicher Unsicherheit im Umgang mit der Ersatzbaustoffverordnung und mangelnder politischer Unterstützung. Das führt dazu, dass öffentliche Auftraggeber lieber auf Primärbaustoffe zurückgreifen.

Danksagung

Ein Großteil der Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekt INTEGRAL (2020-2025) im Projektverbund Stadt-Land-Plus, das vom (damaligen) BMBF gefördert wurde. Ein weiteres Dankeschön gilt allen Expert:Innen, die im Rahmen des Projekts mit uns Gespräche geführt haben.

Literatur/Quellen

BMUV (2024): Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. URL: file:///C:/Users/s6956188/Downloads/nationale_kreislaufwirtschaftsstrategie_bf.pdf

Bos, U.; Horn, R.; Beck, T.; Lindner J. P. und Fischer, M. (2016): *LANCA® Characterization Factors for Life Cycle Impact Assessment - Version 2.0*. Frauenhofer Verlag.

Destatis (Mai 2024): 32111-0002 Abfallentsorgung: Deutschland, 2022, Bau- und Abbruchabfälle. Genesis (eigene Anfrage). Statistisches Bundesamt.

Deutsches Institut für Normung (Feb. 2021): *DIN EN ISO 14044 Umweltmanagement -Ökobilanz -Anforderungen und Anleitungen*. Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung (2006). DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement -Ökobilanz -Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth Verlag.

Elsner, H. (2022): Sand und Kies in Deutschland - Band I: Grundlagen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Global Alliance for Buildings and Construction (2020): 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction. Sector - Executive Summary. URL: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/34572.

KWB (2023): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020 - Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020. Kreislaufwirtschaft Bau

Ökobaudat (2025). Anwendung der ÖKOBAUDAT-Datenbank. Zuletzt abgerufen am: 12.08.2025. URL: https://www.oekobaudat.de/anleitungen/datennutzer.html.

Kontakt
MSc. Magdalena Werner, wissenschaftliche Mitarbeiterin
Technische Universität Dresden, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft
Tel.-Nr. +49 351 463-44131
E-Mail: magdalena.werner@tu-dresden.de
Homepage: https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/iak/das-institut

Teresa Weber, Julika Knapp, Anke Bockreis

Ökologische Bewertung von zirkulär produzierten biologisch abbaubaren Hanffaserverbundbauteilen (FALCON)

***Abstract**: Das Ziel des Projektes FALCON besteht darin, einen Beitrag zu nachhaltigerer Mobilität zu leisten. Dafür wird ein biobasierter Verbundstoff entwickelt, der als Alternative zu Carbon- bzw. Glasfaserverbundstoffen eingesetzt werden kann. Dieser Verbundstoff aus Hanffasern und Polylactid (PLA) als Matrixmaterial weist Vorteile gegenüber den fossilen Referenzmaterialien in der Produktion auf und bietet Potential zur zirkulären Nutzung. Es werden zwei Bauteile der Flugzeuginnenausstattung aus dem Bioverbundstoff hergestellt und mittels ökobilanzieller Betrachtung hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit im Vergleich zu den Referenzbauteilen bewertet. Erste Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung zeigen, dass das Material im Vergleich zu den Referenzmaterialien ökologische Vorteile aufweist. Die größte Herausforderung besteht in einem potentiellen Gewichtsunterschied der Bauteile.*

1 Einleitung

Besonders im Fahrzeugbau sind ultraleichte und hochstabile Bauteile aus Carbon- oder Glasfaserverstärkten Kunststoffen (CFK & GFK) weit verbreitet. Sie ermöglichen eine leichte Bauweise, die zu niedrigen Kraftstoffverbräuchen führt und bieten gleichzeitig die erforderliche Stabilität. Neben diesen positiven Eigenschaften bringen diese Materialien aber auch Nachteile mit sich: sie sind nahezu komplett aus fossilen Rohstoffen hergestellt, benötigen eine große Menge an Energie in der Produktion und es gibt derzeit keinen ökologisch sinnvollen Weg, sie zu verwerten bzw. zu entsorgen (Lopez-Arraiza et al., 2025; Zhang et al., 2020). Um auf diese Problematik zu reagieren, werden vermehrt Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) eingesetzt. Bei diesen Materialien wird die Stabilität durch biogene Fasern, wie z.B. Jute, Hanf, Flachs gewährleistet. Allerdings besteht auch bei diesen Bioverbundstoffen die Matrix, die die Fasern zusammenhält, in den meisten Fällen aus fossilen Kunststoffen (FNR, 2019).

Im Projekt FALCON werden zwei Bauteile der Flugzeuginnenausstattung aus einem NFK hergestellt, bei dem sowohl die Fasern als auch das Matrixmaterial aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt sind. Als Fasermaterial wurde Hanf gewählt, da Hanffasern, ähnlich wie Carbon- oder Glasfasern eine hohe Steifigkeit bei niedrigem Gewicht aufweisen (Liu et al., 2017; Pickering et al., 2016). Darüber hinaus ist der Hanfanbau in nahezu allen Klimazonen der Welt unter nachhaltigen Bedingungen möglich (Amaducci & Gusovius, 2010; Thaler, 2020). Ein weiterer Vorteil der Hanffaser besteht darin, dass die Hanfstängel genutzt werden, die in der Produktion von Hanfsamen und -blüten anfallen und bisher wenig Nutzen haben. PLA wurde als Matrixmaterial ausgewählt, da es biobasiert und biologisch abbaubar ist und als Thermoplast gute Eigenschaften für die Verarbeitung in Verbundwerkstoffen bei gleichzeitig hoher Festigkeit aufweist (Trivedi et al., 2023).

Folgende zwei Bauteile werden für das Projekt aus dem Hanf-PLA Verbundstoff hergestellt: eine Überkopfeinheit im Cockpit, in der Lüftungs- und Beleuchtungselemente verbaut sind und die Verkleidung der Griffschale in der Tür. Eines der beiden aktuell verwendeten Referenzbauteilen besteht aus einem Verbund aus Carbonfasern und Epoxidharz, das andere aus Glasfasern und Epoxidharz.

Am Arbeitsbereich für Umwelttechnik der Universität Innsbruck wird im Rahmen des Projektes sowie einer Dissertation eine ökologische Bewertung der Bauteile und eine Evaluierung verschiedener Recyclingstrategien durchgeführt.

2 Methodik – Ökobilanzielle Betrachtung der Bauteile

Um die tatsächliche ökologische Nachhaltigkeit der Bauteile aus dem Hanf-PLA Verbund zu überprüfen, wird derzeit eine umfassende vergleichende ökobilanzielle Betrachtung der Bauteile in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 14040 (2021); ÖNORM EN ISO 14044 (2021) durchgeführt. Dafür wurde bisher als erster Schritt eine Cradle-to-Gate Analyse der Bauteile aus CFK, GFK und dem Hanf-PLA Verbundstoff durchgeführt. Aufgrund des noch unbekannten Gewichtes der Bauteile aus NFK wurde als vorläufige Funktionale Einheit „1 kg Bauteile“ gewählt. Es wurden alle Prozesse von der Rohstoffgewinnung bis zur abgeschlossenen Produktion der fertigen Bauteile betrachtet. Verwendet wurde dafür die Software *EASETECH (Clavreul et al., 2014)* und die Methode *Environmental Footprint 3.1 (European Commission: Joint Research, 2023)*. Bei dieser Methode werden insgesamt 16 Wirkungskategorien betrachtet. Ein besonderer Fokus liegt im Rahmen dieser Arbeit auf dem Treibhausgaspotential, ausgedrückt in kg CO_2-Äquivalenten. Für die Modellierung der Produktion der Referenzbauteile aus CFK und GFK wurden überwiegend Prozesse aus der Ökobilanzdatenbank *Ecoinvent* (Version 3.11 und 3.12) verwendet. Für die Modellierung des Hanf-PLA Bauteils wurden die Daten direkt bei den Projektpartnern erhoben. Die Daten für den Hanfanbau und die Produktion des PLAs sind für diesen Anbau- und Erntezyklus sowie aus Vorprojekten, bereits bekannt und in dieser Modellierung enthalten. Da die Produktion der Bauteile noch nicht abgeschlossen ist, wurde anstatt der tatsächlichen Daten der Projektpartner ein Spritzgussprozess von *Ecoinvent* verwendet, welcher später durch die tatsächlichen Daten der verwendeten Prozesse ersetzt wird. Die Produktionsbedingungen werden realitätsnah in Europa angenommen. Ausgenommen sind dabei das PLA, welches aus Thailand importiert wird und die Glas- und Carbonfaser-Matten, welche laut Projektpartner derzeit aus Japan importiert werden. Hier wurden globale Prozesse gewählt. Für den Transport wurden Standart *Ecoinvent* Prozesse (global bzw. Europa) verwendet.

3 Vorläufige Ergebnisse und Diskussion

Anhand der vorläufigen Ergebnisse der Cradle-to-Gate Modellierung der drei verschiedenen Verbundstoffe zeigt sich, dass der Hanf-PLA Verbund gegenüber CFK und GFK in der Produktion ein niedrigeres Treibhausgaspotential aufweist. Wie in Abbildung 1 ersichtlich ist, werden in der Produktion des CFK Bauteils 22,2 kg CO_2-eq pro kg Bauteile ausgestoßen. Das entspricht dem höchsten Treibhausgaspotential (THP) unter den 3 betrachteten Stoffen. Dabei ist die energieintensive Produktion der Carbonfasern der Prozess mit dem größten Einfluss. Die Produktion des GFK weist mit 5,9 kg CO_2-eq ein niedrigeres THP auf und der Hanf-PLA Verbund mit 2,8 kg CO_2-eq das niedrigste. Die End-of-Life (EoL)-Phase ist zwar noch nicht modelliert, aber hier sind ebenfalls Einsparungen des THP bei der Verwendung des NFK anstatt CFK und GFK zu erwarten.

Es ist zu beachten, dass aufgrund des bislang unbekannten Gewichts der fertigen Bauteile, hier jeweils 1 kg der Materialien modelliert und verglichen wurden. Aufgrund der Tatsache, dass Hanffasern dicker als Carbon- und Glasfasern sind, ist es jedoch möglich, dass die neuen Bauteile schwerer werden als die Referenzbauteile und ein 1:1 Vergleich nicht zulässig ist. Das hätte nicht nur auf die Ergebnisse der

Modellierung von Produktion und EoL Auswirkungen, sondern auch auf die Nutzungsphase, da im Flugzeugbetrieb mehr Treibstoff verbraucht wird, wenn das Gewicht des Flugzeuges höher wird.

Eine besondere Herausforderung in der Modellierung besteht in der EoL-Phase. Für die Referenzmaterialien ist ungeklärt, wie eine Entsorgung modelliert werden soll, da es bisher keine zufriedenstellende Entsorgungstechnik für CFK und GFK gibt. Auch für die Bauteile aus NFK ist noch nicht geklärt, wie das beste Recyclingszenario aussieht. Es gibt Ansätze zum mechanischen Recycling, zum chemischen Recycling und zur Kompostierung. Diese Annahmen werden im weiteren Verlauf hinsichtlich ihrer realen Umsetzbarkeit in Laborversuchen geprüft und bewertet.

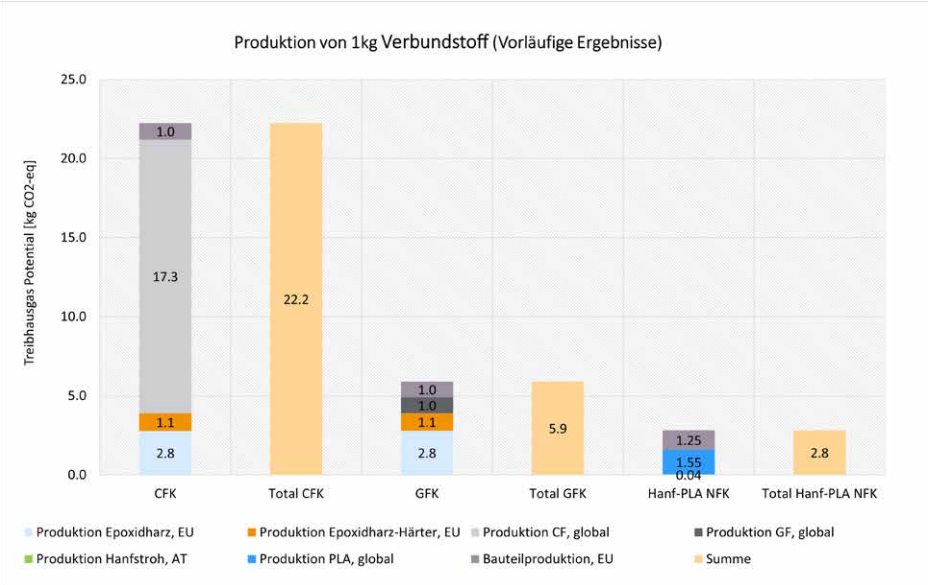


Abbildung 1: Gegenüberstellung des Treibhausgaspotentials der Produktion des Hanf-PLA Verbundmaterials, Glasfaserverstärktem Kunststoff und Carbonfaserverstärktem Kunststoff

4 Ausblick

Im weiteren Projektverlauf wird die Modellierung verfeinert und abgeschlossen. Dafür werden die finalen tatsächlichen Daten der Produktion der Bauteile in die Modellierung aufgenommen. Ein besonders relevanter Faktor wird das Gewicht der fertigen Bauteile sein. Basierend auf dem eventuellen Gewichtsunterschied wird voraussichtlich auch die Nutzungsphase bzw. Unterschiede in der Nutzungsphase in die Modellierung aufgenommen. Auch die EoL-Phase wird nach Treffen passender Annahmen modelliert. Um mögliche Recycling- und Verwertungsstrategien unter realen Bedingungen zu überprüfen werden außerdem Laborversuche durchgeführt. Diese widmen sich der Überprüfung der biologischen Abbaubarkeit, der toxikologischen Unbedenklichkeit potentieller Reststoffe und der Möglichkeit das PLA durch Hydrolyse-Verfahren aus den Bauteilen wiederzugewinnen. Die Strategien, die sich in den Laborversuchen als möglich und sinnvoll erweisen, werden ebenfalls in die Modellierung aufgenommen.

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

Clavreul, J., Baumeister, H., Christensen, T. H., & Damgaard, A. (2014). An environmental assessment system for environmental technologies. *Environmental Modelling & Software*, *60*, 18–30. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.06.007

European Commission: Joint Research, C. (2023). *Updated characterisation and normalisation factors for the environmental footprint 3.1 method*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/doi/10.2760/798894

FNR. (2019). BIOVERBUNDWERKSTOFFE Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) und Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC). In B. f. E. u. L. Deutschland (Ed.).

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

Lopez-Arraiza, A., Essamari, L., Iturrondobeitia, M., Boullosa-Falces, D., & Justel, D. (2025). Life cycle assessment of glass fibre versus flax fibre reinforced composite ship hulls. *Scientific Reports*, *15*(1), 16283. https://doi.org/10.1038/s41598-025-00811-y

ÖNORM EN ISO 14040. (2021). Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätzliche Rahmenbedingungen. In. Austrian Standards: Austrian Standards International.

ÖNORM EN ISO 14044. (2021). Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. In. Austrian Standarts: Austrian Standarts International.

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

Thaler, G. (2020). Hanffaserproduktion in Europa – ein LCAScreening zur Abschätzung der Umweltauswirkungen.

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

Zhang, J., Chevali, V. S., Wang, H., & Wang, C.-H. (2020). Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling. *Composites Part B: Engineering*, *193*, 108053. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108053

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/

TEIL 5
Biologische Verfahren und Deponie

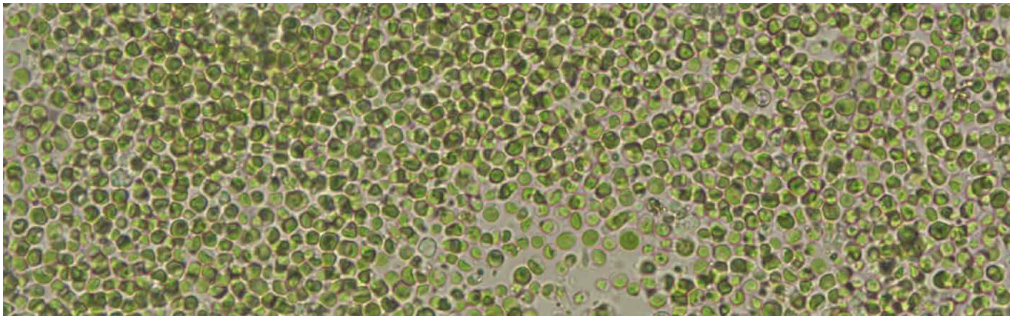
Leitung:

Prof. Dr. mont. Michael Nelles

Alexander Kuß, Miriam Sartor

Behandlung von Deponieemissionen mit Hilfe von Mikroalgen-Bakterien-Konsortien

***Abstract**: Bisher scheitert die Integration von Mikrolagen-Bakterien-Konsortien in die Behandlung von Deponieemissionen (Deponiesickerwasser und Deponiegas) insbesondere an den hohen Ammoniumkonzentrationen, die eine Verdünnung der Sickerwässer zur Kultivierung der Algen notwendig macht, sowie an dem hohen Flächenbedarf derartiger Systeme, die eine Integration in bestehende Infrastruktur erschwert. In der Forschungsarbeit am LFZ :metabolon konnte nachgewiesen werden, dass standortangepasste Mikroalgen-Bakterien-Konsortien ohne Verdünnung in den Sickerwässern verschiedener deutscher Hausmülldeponien wachsen- und abwasserrelevante Inhaltsstoffe aufnehmen können. Zudem wurde ein Photobioreaktor im Demonstrator-Maßstab aufgebaut, um zu veranschaulichen, dass der Flächenbedarf durch die Verwendung von Lichtleitermaterialien wesentlich verringert werden kann. Die mit diesem Prototyp bisher erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass gelöste Stickstoffverbindungen (gesamt-N) bis auf Einleiterkriterien verringert werden können. Dazu ist ausschließlich die Zugabe von Licht und CO_2 notwendig, wodurch im Gegensatz zu etablierten Verfahren bakterielle Nährsubstrate eingespart und Nährstoffe in Form von Biomasse zurückgewonnen werden können. Stammt das benötigte CO_2 aus Deponiegas, kann der Methangehalt auf diese Weise indirekt erhöht werden. Es wurde nachgewiesen, dass standortangepasste Mikroalgen-Bakterien Konsortien, die in unverdünntem Deponiesickerwasser wachsen, CO_2 aus Deponiegas aufnehmen und dadurch den Methangehalt signifikant erhöhen können (Aufwertung des Gases).*



1 Einleitung: Integration von Mikroalgen in die Behandlung von Deponieemissionen

Mülldeponien mit organischen Abfällen (DK II) emittieren Deponiesickerwasser (DSW) und Deponiegas (DG), die zum Schutze der Umweltmedien aufgefangen, behandelt oder verwertet werden müssen [1, 2]. Traditionelle Methoden zur DSW-Aufbereitung sind kostenintensiv, führen zum Nährstoffverlust und benötigen teure Nährsubstrate für die am Prozess beteiligten Bakterien [3, 4]. An älteren Deponien dieser Art entsteht zudem Schwachgas (niederkalorisches Biogas (NKG)), dessen Methangehalt kleiner als ca. 35-40% ist, sodass dieses in Blockheizkraftwerken nicht mehr effizient verwertet werden kann. Es wird des-

halb typischerweise in einer Stützfeuerung abgefackelt, um einen Eintrag des Methans in die Atmosphäre zu verhindern [2, 5].

Im Rahmen der Forschungsarbeiten am LFZ :metabolon wird an der Entwicklung innovativer Photobioreaktoren (PBRs) gearbeitet, die mit Hilfe von Mikroalgen-Bakterien Konsortien (MBK) speziell nährstoffreiche Abwässer, wie DSW, effizient aufbereiten und gleichzeitig den Methangehalt in NKG erhöhen können, um daraus nutzbares Biogas zu gewinnen. Die MBK nutzen direkt die nährstoffreichen Eigenschaften des DSW und binden CO_2 aus NKG durch Photosynthese, was die Wasserqualität erheblich verbessert und das Gas gleichzeitig energetisch aufwertet. Dieses Verfahren ermöglicht so die effiziente Rückgewinnung von Nährstoffen aus DSW in Form von Algenbiomasse und die Umwandlung von NKG in wertvolles Biogas, wodurch zugleich Treibhausgasemissionen reduziert werden. Das Potenzial der Integration von MBK in die Aufbereitungsprozesse von Deponieemissionen wie DSW [6] oder Schwachgasen [7]. wird in aktuellen Veröffentlichungen diskutiert; bisher sind jedoch keine erfolgreichen Skalierungsversuche in den industriellen Maßstab bekannt.

In der Regel müssen DSW aufgrund ihrer hohen TAN-Konzentrationen (∑NH4+,NH3) stark verdünnt werden, um ein Wachstum von Mikroalgen zu ermöglichen [6, 8]; eine Voraussetzung, die die industrielle Umsetzung erheblich einschränkt.

Die Integration von MBK wird industriell zudem durch schlechte Lichtverfügbarkeit und den damit verbundenen, hohen Flächenbedarf begrenzt [8–10]. Die Lichtverfügbarkeit kann jedoch durch Integration von Lichtleiterfasern in die Prozesse verbessert werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen PBR-Systemen, die von außen beleuchtet werden, wachsen die MBK in Form von Biofilmen direkt auf den Oberflächen der Lichtleiter, wodurch eine Skalierbarkeit der PBR-System- sowie eine Integrierbarkeit in bestehende Infrastruktur erleichtert werden könnte [11]. Bisher liegen jedoch keine Untersuchungen vor, die dieses Konzept außerhalb des Labormaßstabs oder im Kontext der Aufbereitung von Deponiesickerwasser (DSW) evaluieren.

Die im DSW wachsenden MBK benötigen zudem CO_2 als Kohlenstoffquelle. Dieses kann aus den an Deponiestandorten anfallenden Deponiegasen entnommen werden. In der aktuellen Literatur werden mehrere mikroalgen-bakterienbasierte Konzepte zur Gasaufbereitung beschrieben, bei denen Abwässer oder abwasserbasierte Ströme gezielt als Kultivierungsmedien eingesetzt werden, um Nährstoffe bereitzustellen und eine Prozessintegration zu ermöglichen [12]. Bisher wurde jedoch noch kein integriertes Konzept beschrieben, wo unverdünntes Deponiesickerwasser als Medium zur Deponiegasaufbereitung verwendet wurde. Die Forschungsarbeiten betrachten Lösungsansätze, die diese Forschungslücken adressieren und die Grundlage für eine integrierte, skalierbare Nutzung von MBK zur kombinierten Aufbereitung von DSW und NKG schaffen.

2 Methodik und bisherige Ergebnisse

2.1 Wachstum und Nährstoffaufnahme standortangepasster Mikroalgen in unverdünnten, hochbelasteten Deponiesickerwässern

Standortangepasste MBK wurden vom Standort der Leppe Deponie in Lindlar isoliert und genetisch charakterisiert. Im Anschluss wurde das Wachstum der Mikroalgen sowie dessen Einfluss auf die Veränderung der Nährstoffkonzentrationen in vier unverdünnten DSW von drei deutschen Deponiestandorten analysiert, mit Ammoniumstickstoff-Konzentrationen von 250-930 mg L^{-1}, einem chemischen Sauerstoffbedarf von 500–2100 mg L^{-1} und Phosphatphosphor-Konzentrationen von 1,5–7 mg L^{-1}. Die Mikroalgen erreichten

maximale Wachstumsraten von bis zu 1,20 g L^{-1} d^{-1} und Endbiomassekonzentrationen von bis zu 5,1 g L^{-1}. Im Vergleich zu Studien anderer Forschender[6,8] war keine Verdünnung der DSW notwendig.

Nach 15 Tagen zeigten die mit den standortangepassten MBK Kulturen angeimpften Kulturen zudem signifikant geringere Konzentrationen an Phosphat, Nitrit und Nitrat als die unbeimpften Kontrollkulturen, während keine direkte Ammoniumelimination beobachtet wurde. Dies weist auf eine Präferenz der Mikroalgen für oxidierte Stickstoffformen hin, die durch nitrifizierende Bakterien gebildet werden. Die Ammoniumentfernung erfolgt somit indirekt über das Zusammenspiel von Mikroalgen und Bakterien, wobei der für die Nitrifikation benötigte Sauerstoff von den Mikroalgen bereitgestellt wird. Die Fähigkeit dieser standortangepassten MBK, in unverdünnten, hochbelasteten Sickerwässern ohne Vorbehandlung zu wachsen und hohe Ammoniakkonzentrationen zu tolerieren, unterstreicht ihr Potenzial für die Integration in Abwasserbehandlungsprozesse zur verbesserten Nährstoffrückgewinnung und Ressourceneffizienz.

2.2 Quantifizierung von THG-Emissionen und Ökobilanzierung

Ein Photobioreaktor (PBR) im Demonstrator-Maßstab wurde entwickelt, aufgebaut und über einen Zeitraum von etwa einem Jahr betrieben. Durch die Integration von Lichtleitermaterialien konnte in einem Beckenvolumen von ca. 375 L und bei einem Flächenbedarf von lediglich 1 m² die effektiv beleuchtete Oberfläche um den Faktor 30 erhöht werden.

Es wurden sowohl semikontinuierliche als auch diskontinuierliche Betriebsweisen unter variierenden Kultivierungsparametern untersucht. Ziel war es, diese systematisch zu erfassen und eine belastbare Datengrundlage für Leistungs-Kosten-Analysen zu schaffen. Zum Vergleich wurden Betriebs- und Kostendaten einer konventionellen Sickerwasserreinigungsanlage als industrielle, standortspezifische Referenzanalyse herangezogen; eine abschließende Bewertung des Verfahrens steht zum aktuellen Zeitpunkt noch aus. Aktuell kann jedoch bereits dargestellt werden, dass mit dem entwickelten System eine Verringerung der Stickstoff- und Phosphorbelastung auf Direkteinleiterkriterien möglich ist [13]. Als Prozessinputs wird ausschließlich die Zugabe von Licht und CO_2 erforderlich, wodurch Einsparungen im Vergleich zu herkömmlichen, bakterien-basierten Verfahren erzielt werden können.

Die MBK-Biomasse wird als konzentrierter Biofilm (5–10 % Trockensubstanz) aus dem System abgeerntet, wobei pro Kubikmeter DSW durchschnittlich 3,2 kg Trockensubstanz erhalten werden.

Die erzeugte Biomasse ist proteinreich und enthält mittlere Anteile an Kohlenhydraten und Lipiden, wodurch sie grundsätzlich als Substrat für Bioraffinerie-Anwendungen geeignet ist. Zusätzlich erhöhen enthaltene Pigmente, Nährstoffe und ein günstiges Fettsäureprofil das Verwertungspotenzial.

2.2 Mikroalgen-Bakterien-Konsortien zur Aufwertung von niederkalorischem Deponiegas

In Laborversuchen wurden Veränderungen der Gaszusammensetzung von Deponiegas (DG) bei der Einleitung in eine wachsende Mikroalgen-Bakterien-Kultur in unbehandeltem Deponiesickerwasser (DSW) untersucht. Sowohl das DG als auch das DSW wurden ohne Vorbehandlung eingesetzt. Zum Gasaustausch wurde das DG in das DSW eingeleitet. Auf diese Weise konnte CO_2 aus dem Gasstrom entfernt und der Methangehalt signifikant, im Vergleich zu einer Kontrollkultur ohne Mikroalgen-Inokulation, erhöht werden. Gleichzeitig wurde das Wachstum der Mikroalgen durch die Gaseinleitung und die damit verbundene verbesserte CO_2-Verfügbarkeit gefördert.

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt dem Landesamt für Natur, Umwelt und Klima NRW (MUNV, NRW und dem LANUK) für die Förderung des Projektes ERA³, durch das ein Großteil der bisherigen Projektergebnisse erhalten wurden.

Literatur/Quellen

[1] Christensen, T. H., Cossu, R. & Stegmann, R. Landfilling of Waste: Leachate. (CRC Press, 2019). doi:10.1201/9781482288933.
[2] Stegmann, R. Landfilling of Waste: Biogas. Landfilling of Waste: Biogas (Christensen, Cossu, Stegmann, Hamburg, Germany, 2020). doi:10.1201/9781003062097.
[3] Babaei, S., Mohammad, &, Sabour, R., Moftakhari, S. & Movahed, A. Combined landfill leachate treatment methods: an overview. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16358-0/Published (2021) doi:10.1007/s11356-021-16358-0/Published.
[4] Wang, J. & Qiao, Z. A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies. Front Environ Sci 12, (2024).
[5] Manasaki, V., Palogos, I., Chourdakis, I., Tsafantakis, K. & Gikas, P. Techno-economic assessment of landfill gas (LFG) to electric energy: Selection of the optimal technology through field-study and model simulation. Chemosphere 269, (2020).
[6] Nawaz, T. et al. A review of landfill leachate treatment by microalgae: Current status and future directions. Processes 8, 1–20 (2020).
[7] Saldarriaga, L. F., Almenglo, F., Cantero, D. & Ramírez, M. Influence of leachate and nitrifying bacteria on photosynthetic biogas upgrading in a two-stage system. Processes 9, (2021).
[8] Torres-Franco, A., Passos, F., Figueredo, C., Mota, C. & Muñoz, R. Current advances in microalgae-based treatment of high-strength wastewaters: challenges and opportunities to enhance wastewater treatment performance. Rev Environ Sci Biotechnol 20, 209–235 (2021).
[9] Ahmed, S. F. et al. Progress and challenges of contaminate removal from wastewater using microalgae biomass. Chemosphere 286, (2022).
[10] Oviedo, J. A. et al. A half-century of research on microalgae-bacteria for wastewater treatment. Algal Res 67, (2022).
[11] Tang, C. C. et al. Designing light-guiding carriers in microalgal-bacterial systems: From optimization to integration and development perspectives. Chemical Engineering Journal vol. 525 Preprint at https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.169957 (2025).
[12] Madureira, L. et al. Insights on microalgae-based technologies with potential impact on global methane budget – Perspectives for industrial applications. Bioresour Technol 431, (2025).
[13] AbwV. Verordnung Über Anforderungen an Das Einleiten von Abwasser in Gewässer. 1–93 (2016).

Kontakt

Alexander Kuß, wissenschaftlicher Mitarbeiter TH-Köln, Promotionsstudent Universität Duisburg-Essen
TH-Köln / Universität Duisburg-Essen
Tel.-Nr. 0163/7831604
E-Mail: alexander.kuss@th-koeln.de

She Ming Ng, Sathwik Kurapati, Kerstin Kuchta

In-situ Biomethanation in Biowaste-based Trickle-Bed Reactor under Solid-state Discontinuous Mesophilic Conditions

***Abstract**: Integration of in-situ biomethanation in conventional biogas plants operating under discontinuous, solid-state and mesophilic conditions is feasible and represents a positive advancement toward further decarbonization. The implementation of in-situ biomethanation has found improved the biogas quality, by achieving an average increase of 3.2-13.6 % in CH_4:CO_2 of biogas in comparison to anaerobic digestion systems. The findings obtained from this study provide a valuable reference to biogas system operators seeking to understand the implementation, performance outcomes, and potential operational concerns.*

1 Introduction

Germany is aiming to be climate neutral by year 2045 as climate change is one of the most defining challenges of the present day. Integration of in-situ biomethanation with conventional anaerobic digestion (AD) process is one of the promising innovative technologies that can significantly enhance energy density of produced biogas by utilizing the carbon dioxide (CO_2) produced internally. Besides, with increased methane (CH_4) yield, requirement for expensive biogas upgradation procedures could be simplified. Also, with hydrogen (H_2) being injected directly into the reactor active volume, existing facility capacity could be maximized to the fullest potential, omitting the need to retrofit existing infrastructure with costly modification (Agneessens et al., 2017; Voelklein, Rusmanis, & Murphy, 2019). Existing studies have been focusing mainly in investigating the integration of in-situ biomethanation in liquid-state, manure-based anaerobic processes (Corbellini et al., 2021; Wahid & Horn, 2021). However, the outcomes and findings obtained from studies with liquid-state manure-based are hardly referrable for biowaste-based biogas plants, as they are mainly (55 %) operated under solid-state, not even considering the different characterizations of input biomass used (Daniel-Gromke et al., 2018). Furthermore, according to a study done by Jensen (2021) on in-situ biomethanation under liquid-state codigestion of manure, straw briquettes and other solids (grass silage, deep litter, maize silage etc.), as high as 90 % of H_2 injected was found leaving the system unconverted due to limitation arises from H_2 gas-liquid mass transfer despite the relatively low (3.4-33.5 m³) H_2 volume injected into the digester working volume (1110 m³). The volume of H_2 injected was approximately 4-40 % of digester headspace volume (Jensen, Jensen, Ottosen, & Kofoed, 2021).

Therefore, this study investigates the integration of in-situ biomethanation at scaled-down laboratory set-ups that were configured similarly to biogas plants digesting municipal biowaste, operating under discontinuous, solid-state and mesophilic condition. The laboratory set-ups would imitate the operation of an industrial-scaled garage type fermenter that collect effluent produced during the process with a percolate tank. H_2 that is introduced through the holes found on the floor of the garage type fermenter would also be considered for the laboratory set-ups. Besides that, in contrast to the optimal H_2:CO_2 stoichiometric ratios of 4:1 as widely proposed and reported (Agneessens et al., 2017; Wahid, Mulat, Gaby, & Horn, 2019), H_2 injection based on H_2:CO_2 stoichiometric ratios of 1:8, 1:4 and 1:2 are designed for this study. Another high-

light of this study would contribute to answer the concern of process instability resulted from exogenous H_2 injection into the dynamic and complex anaerobic digestion system.

2 Research methodology

2.1 Reactor configuration

A reactor set-up comprised of trickle-bed reactor (8 L) and a percolate tank (3.5 L). The trickle-bed reactor would be layered first with 100 g structural materials (e.g. twigs and small branches) and then layered with 1 kg of biowaste freshly sourced from a mesophilic operated biowaste-based municipal biogas plant. The percolate tank would be filled with 3 L of fresh percolate collected from the same biogas plant. Representable sampling of both biowaste and percolate was done in compliance with VDI 4630 during winter (December) time. A peristaltic pump was installed to recirculate the percolate (2 L/day, split into 4 intervals) from percolate tank to the trickling module in the trickle-bed reactor, in order to maintain substrate moisture and facilitate inoculation. There was a Ritter-milligascounter for biogas volume measurement after sufficient biogas produced reached the tipping pressure within. A 500 mL beaker was installed before the Ritter-milligascounter to function as a unit to retain backflow of Silox liquid in case of the sub-atmospheric system pressure. The 500 mL beaker was connected with gas sample sampling point and manometer to monitor system pressure. At the bottom of the trickle-bed reactor, there was an inlet for H_2 injection. This inlet was excluded for reactor set-up designed to reflect conventional anaerobic digestion. All the reactor set-ups were built and operated within a temperature-controlled room at mesophilic region (37.7°C ± 0.2°C).

2.2 Process operation

The whole experiment was designed for 2 cycles: Cycle 1 (C1) consisting a reactor reflecting conventional anaerobic digestion (C1-AD), a reactor injected with H_2 according to H_2:CO_2 stoichiometric ratio of 1:8; and Cycle 2 (C2) consisting a reactor reflecting conventional anaerobic digestion (C2-AD), a reactor injected with H_2 according to H_2:CO_2 stoichiometric ratio of 1:4 and a reactor injected with H_2 according to H_2:CO_2 stoichiometric ratio of 1:2. The hydraulic retention time (HRT) of the process lasted for 22 days in total. AD reactor was started up 2 days in advance of the other reactors injected with H_2. H_2 volume to be injected was calculated based on the designed H_2:CO_2 stoichiometric ratios referring to the CO_2 emitted in the AD reactor on the specified operation day. H_2 was injected once daily at a controlled flowrate of 23 NmL/min starting from day 3 and stopped on day 16. Upon start-up, each reactor set-up would be flushed with pure nitrogen (N_2) gas for 15 minutes to achieve anaerobic condition within the system (<5 vol.-% O_2).

2.3 Analytical methods

During the experiments, gas samples for gas composition analysis were analyzed with HP 6890 gas chromatography (GC ChemStation), which have been collected using 1 mL gas syringe before H_2 injection and 20 minutes after completion of H_2 injection. When H_2 was found remaining in the gas composition 20 minutes after H_2 injection, further gas samples had been acquired and analyzed on hourly basis until H_2 concentration in the biogas reached around 0 vol.-%. Fresh biowaste before experiment and digestate collected after experiment were analyzed for total solid content (TS), organic total solid content (oTS). Percolate samples had been collected once every 3 days for process stability monitoring. For process stability monitoring, the percolate samples were analyzed for TS, oTS, pH, ammonium concentration (NH_4-N), bicarbonate alkalinity (also known as hydrogencarbonate, HCO_3^-), total volatile fatty acid (VFA), and volatile fatty acid/total inor-

ganic carbon ratio (VFA/TIC). As these ex-situ analyses demand for skilled labour and considerable time, the collected samples were analysed as soon as availability permitted, in compliance with DIN EN ISO 5667-3.

3 Results and discussion

3.1 In-situ biomethanation performance

H_2 injected according to H_2:CO_2 stoichiometric ratio of 1:2 demonstrated the maximum CH_4:CO_2 ratio (2.03) was achieved in biogas composition compared to other reactor configurations, as displayed in Figure 1. CH_4:CO_2 ratio was found to peak on day 13, which is 21.6 % higher than CH_4:CO_2 ratio obtained from (C2) AD (1.67) of the same day. Reactor set-ups injected with H_2, namely (C1) 1:8 and (C2) 1:2 show consistently higher average CH_4:CO_2 ratio in biogas in comparison to both (C1) AD and (C2) AD. An exception was observed for (C2) 1:4 and the underlying cause could not be determined due to experimental replication. Table 1 shows the overview of process performances for H_2 injected according to variety H_2:CO_2 stoichiometric ratios. Despite the favourable findings which validated the occurrence and effectivity of in-situ biomethanation, H_2 that escaped the system unconverted was also found to be the highest in reactor set-up (C2) 1:2 (50.1 %). The highest H_2 concentration in biogas recorded in (C2) 1:2 was 15.1 vol.-%, followed by 11.8 vol.-% in (C2) 1:4 and 0.3 vol.-% in (C1) 1:8. These ultimately indicate that the optimum H_2 injection volume corresponds to a range between H_2:CO_2 stoichiometric ratios of 1:8 and 1:4, since the H_2 concentration in biogas exiting the digester has to adhere to the H_2 blending limit allowed for direct gas grid injection (< 10 vol.-%) (Bard et al., 2022). However, this threshold of <10 vol.-% is still considered relatively optimistic with existing gas infrastructure, as the blending limit of H_2 is restricted to the material used on industrial components (e.g. up to 1 vol.-% for gas turbines) (Bard et al., 2022).

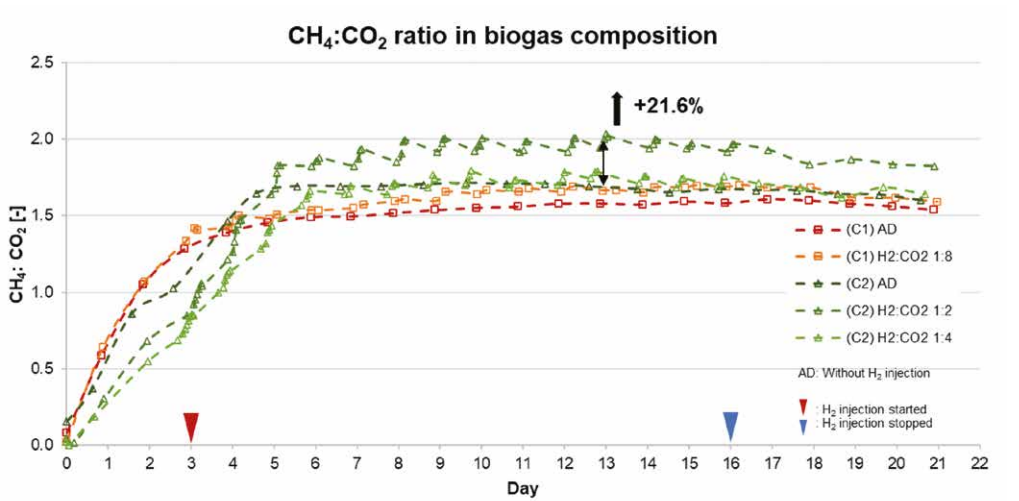


Figure 1: CH_4:CO_2 ratio of biogas composition during the processes of anaerobic digestion (C1-AD, C2-AD) and in-situ biomethanation.

Table 1: Comparison of process performances of H_2 injected according to variety H_2:CO_2 stoichiometric ratio.

H_2:CO_2 Stoichiometric Ratio	(C1) AD	(C1) 1:8	(C2) AD	(C2) 1:4	(C2) 1:2
Total injected H_2 volume [NmL]	0.0	1363.0	0.0	2598.8	5197.7
CH_4:CO_2 Max. [-]	1.61	1.70	1.71	1.79	2.03
CH_4:CO_2 Avg. $^{\text{day 3 onwards}}$ [-]	1.55	1.60	1.66	1.57	1.77
CH_4:CO_2 Avg. [-]	1.40	1.51	1.47	1.41	1.67
H_2-escaped unconverted [%]	-	0.00 %	-	37.75 %	50.10 %

3.2 Process stability affected by in-situ biomethanation

A comparison of process indicators between initial and the end of the experiments has been summarised under Table 2. H_2 injection is observed to possibly hinder the degradation of organic content in biowaste as reactor set-ups with H_2 injection shows lesser volatile solid (VS) content reduction compared to AD systems. Substrate used in (C2) 1:2 is found to be the least degraded, 25.7 % lower VS reduction compared to (C2) AD (refer to Table 2). However, this trend is contradicted with the degradation of VS content in percolate, as (C1) 1:8 achieved the best VS degradation in percolate, 218.7 % higher compared to (C1) AD. Moreover, there is <10 % fluctuation observed in pH for all reactor configurations. The trends observed in Table 2 demonstrate that reactor set-ups injected with H_2 have lesser pH reduction as compared to AD systems, whereby the end pH of effluent from system injected with H_2 stayed closer to the initial pH before starting the experiment. This observation is unable to be explained with the inconsistencies observed in process indicators such as HCO_3^-, NH_4-N, Total VFA and VFA/TIC. All the process indicators such as pH, HCO_3^-, NH_4-N, Total VFA and VFA/TIC in the end of the experiments are within the stability thresholds defined by Ajayi-Banji et al. (2022) for stable solid-state process configuration (Ajayi-Banji & Rahman, 2022). These findings show that in-situ biomethanation under discontinuous, solid-state and mesophilic conditions, appears to hinder

Table 2: Overview of process indicators analyzed between initial (1st day) and final (last day) stage of the experiments.

H_2:CO_2	(C1) AD	(C1) 1:8	(C2) AD	(C2) 1:4	(C2) 1:2
VS-Substrate*	↓-28.11%	↓-25.68%	↓-41.95%	↓-35.77%	↓-31.16
VS-Percolate	↓-4.43%	↓-14.12%	↓-35.68%	↓-42.52%	↓-39.26%
pH	↓-8.84%	↓-7.31%	↓-3.31%	↓-0.17%	↓-1.03%
HCO_3^-	↓-35.96%	↓-32.66%	↑+11.69%	↑+2.86%	↑+3.76%
NH_4-N	↑+1.82%	↑+28.50%	↑+30.87%	↓-1.35%	↓-8.57%
Total VFA	↑+26.32%	↑+47.24%	↑+20.80%	↓-35.00%	↑+43.30%
VFA/TIC	↑+73.54%	↑ +1.48%	↓-8.59%	↓-51.77%	↓-19.03%

*Comparing the end digestate with fresh input (biowaste)

VS: volatile solid (TS %*oTS %/100)

organic matter degradation in substrate, enhance organic matter degradation in percolate and do not seem to have any impact onto process stability.

4 Conclusion and future prospect

Integration of in-situ biomethanation into biowaste-based AD system operating under discontinuous, solid-state and mesophilic conditions with H_2 injected at the bottom of the reactor passing through the substrate pile, has been experimentally investigated, thereby confirming the technical feasibility of the concept. Experimental findings demonstrated that the average CH_4:CO_2 in biogas achieved by reactor configurations injected with H_2 are generally higher (3.2-13.6 %) compared to AD systems. In order to ensure the biogas produced during in-situ biomethanation is in accordance to the allowed H_2 blending limit for current practical utilisation, H_2:CO_2 stoichiometric ratio for H_2 injection has to be much lower than the commonly proposed 4:1 ratio, particularly within the ratio range of 1:8 and 1:4. The fluctuations caused by in-situ biomethanation under the designed conditions onto process indicators (pH, HCO_3^-, NH_4-N, Total VFA and VFA/TIC) were found to be negligible in this reactor configuration and operation design. Although organic matter degradation in biomass substrate appeared to be relatively hindered in systems injected with H_2 compared to AD systems, in-situ biomethanation shows relative improvement in organic matter degradation in percolate for H_2-injected systems compared to AD systems.

As this is a pioneering study in investigating the integration of in-situ biomethanation into biowaste-based AD system operating under discontinuous, solid-state and mesophilic conditions, further research is required to confirm and expand upon the present findings. For instance, in the aspect of strategising the enhancement of H_2 gas-liquid transfer coefficient under this reactor configuration, investigation of different feedstock type and exploration of in-situ biomethanation integration in different reactor configurations such as solid- state continuously stirred tank reactor (CSTR) or solid-state plug flow reactor (PFR). Furthermore, with organic matter degradation of biomass substrate was found relatively hindered during in-situ biomethanation, higher organic content in digestate resulted would affect the subsequent downstream processing procedure such as composting (e.g. longer composting duration, larger composting unit). This is important as compost quality is strictly regulated by Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK) in Germany, in this case RAL-GZ 251. Thus, further investigations would be required to counteract the hindrance effect, improve organic digestion, optimising in-situ biomethanation while maintaining overall process stability.

Acknowledgement

This research is conducted within the framework of NordDeutches RealLabor (NDRL) TV 6.2 “Synergy between Power-to-Gas (PtG) and Biowaste Treatment” financed by Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), which aims to evaluate the technical feasibility and optimization of in-situ biomethanation in solid-state anaerobic digestion of biowaste at industrial-scale biowaste-based biogas plant.

The authors declare to have no conflict of interests and confirm contribution to the paper as follows: study conceptualization (M.Sc. She Ming Ng, Prof. Dr.-Ing. Kerstin Kuchta); methodology design (M.Sc. She Ming Ng); observation acquisition (M.Sc. She Ming Ng, Sathwik Kurapati); data acquisition and collection (M.Sc. She Ming Ng, Sathwik Kurapati); data visualization and statistical analysis (M.Sc. She Ming Ng); results interpretation (M.Sc. She Ming Ng); writing-original draft and editing (M.Sc. She Ming Ng); writing-review and editing (Prof. Dr.-Ing. Kerstin Kuchta); supervision (Prof. Dr.-Ing. Kerstin Kuchta).

References

Agneessens, L. M., Ottosen, L. D. M., Voigt, N. V., Nielsen, J. L., Jonge, N. de, Fischer, C. H., & Kofoed, M. V. W. (2017). In-situ biogas upgrading with pulse H_2 additions: The relevance of methanogen adaption and inorganic carbon level. *Bioresource technology, 233*, 256–263.

Ajayi-Banji, A., & Rahman, S. (2022). A review of process parameters influence in solid-state anaerobic digestion: Focus on performance stability thresholds. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 167*, 112756.

Bard, J., Gerhardt, N., Selzam, P., Beil, M., Wiemer, M., Dr., & Buddensiek, M. (2022). *The Limitation of Hydrogen Blending in the European Gas Grid: A study on the use, limitations and cost of hydrogen blending in the European gas grid at the transport and distribution level,* from Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology (IEE): .

Corbellini, V., Feng, C., Bellucci, M., Catenacci, A., Stella, T., Espinoza-Tofalos, A., & Malpei, F. (2021). Performance Analysis and Microbial Community Evolution of In Situ Biological Biogas Upgrading with Increasing H_2/CO_2 Ratio. *Archaea (Vancouver, B.C.), 2021*, 8894455.

Daniel-Gromke, J., Rensberg, N., Denysenko, V., Stinner, W., Schmalfuß, T., Scheftelowitz, M., et al. (2018). Current Developments in Production and Utilization of Biogas and Biomethane in Germany. *Chemie Ingenieur Technik, 90*(1-2), 17–35.

Jensen, M. B., Jensen, B., Ottosen, L. D. M., & Kofoed, M. V. W. (2021). Integrating H_2 injection and reactor mixing for low-cost H_2 gas-liquid mass transfer in full-scale in situ biomethanation. *Biochemical Engineering Journal, 166*, 107869.

Voelklein, M. A., Rusmanis, D., & Murphy, J. D. (2019). Biological methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upgrading in anaerobic digestion. *Applied Energy, 235*, 1061–1071.

Wahid, R., & Horn, S. J. (2021). The effect of mixing rate and gas recirculation on biological CO_2 methanation in two-stage CSTR systems. *Biomass and Bioenergy, 144*, 105918.

Wahid, R., Mulat, D. G., Gaby, J. C., & Horn, S. J. (2019). Effects of H_2:CO_2 ratio and H_2 supply fluctuation on methane content and microbial community composition during in-situ biological biogas upgrading. *Biotechnology for biofuels, 12*, 104.

Contact

She Ming, Ng, M.Sc., Research associate
Institute of Circular Resource Engineering and Management
Phone: +49 40 30601-3577
E-Mail: she.ng@tuhh.de

Konstantin Bachmann, David Laner

Analyse der Bewirtschaftung urbaner Bioabfälle am Beispiel der Stadt Kassel: Status quo und Potenziale zur Integration der Erzeugung von Aktivkohlen für die Abwasserreinigung

***Abstract**: Als Verursacher von ca. 70 % der globalen Treibhausgasemissionen gelten urbane Räume zugleich als Problemfeld sowie als potenzieller Motor auf dem Weg der Transformation zu klimaverträglichen Gesellschaften (Lwasa et al., 2022; Wei et al., 2021). Die Schließung von Kohlenstoffkreisläufen unter Berücksichtigung von biogenem Kohlenstoff aus nachwachsenden Rohstoffen wird in Zukunft eine zentrale Rolle bei der Defossilisierung einnehmen, wobei die effiziente Verwertung von Bioabfällen eine Hauptkomponente der urbanen Bioökonomie darstellt (vgl. Yang und Yang, 2022). Im Rahmen des SDG-Graduiertenprogramms CirCles („Circular Economy urbaner Kohlenstoffflüsse durch innovative Verwertungspfade von Bioabfällen") der Universität Kassel wird das Potenzial der Verwertung urbaner Bioabfälle zu regional produzierter biogener Aktivkohle untersucht, welche zur Elimination organischer Spurenstoffe in der weitergehenden Abwasserreinigung genutzt werden soll, um dort wiederum konventionelle, klimaschädliche Aktivkohle (bis zu 19 Tonnen CO_2-Äquivalente pro hergestellter Tonne Aktivkohle (Remy, 2024)) zu ersetzen. Das von vier Fachgebieten bearbeitete Projekt hat zum Ziel, urbane Kohlenstoffkreisläufe zu schließen, indem Bioabfälle möglichst fremdstofffrei bereitgestellt, zielgerichtet aufbereitet und ökologisch-ökonomisch optimiert verwertet werden. Die gegenständliche Studie beschäftigt sich dabei im Speziellen mit der Entwicklung von Konzepten zur Integration der Aktivkohleherstellung in bestehende Bewirtschaftungssysteme für urbane Bioabfälle.*

1 Einleitung

Die Nutzung urbaner Bioabfälle als Kohlenstoffquelle kann einen Beitrag zur Defossilisierung der Wirtschaft leisten. Am Beispiel der Stadt Kassel befasst sich die vorliegende Studie mit der Analyse von Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit etablierten Bewirtschaftungssystemen für urbane Bioabfälle sowie der Integration von Verwertungspfaden zur Erzeugung von Aktivkohle aus Bioabfall zur Nutzung in der weitergehenden Abwasserreinigung. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass niedrige Prozessemissionen und eine effiziente Nutzung erzeugter Produkte entscheidend für die ökologische Vorteilhaftigkeit biologischer Behandlungspfade gegenüber der thermischen Verwertung sind. Trotz der Umweltauswirkungen der Herstellung von Aktivkohlen aus urbanen Bioabfällen für die Abwasserreinigung führen vor allem die Umweltentlastungen durch die Substitution konventioneller Aktivkohle auf Steinkohle-Basis dazu, dass die Aktivkohleherstellung ökologisch vorteilhaft gegenüber der konventionellen Verwertung von urbanen Bioabfällen ist.

2 Methodik

Am Fallbeispiel der Stadt Kassel wurde im ersten Schritt der Status Quo konventioneller Bewirtschaftungssysteme für urbane Bioabfälle hinsichtlich Materialflüssen und Lebenszyklus-Umweltauswirkungen

untersucht. Im Rahmen einer Materialflussanalyse (vgl. Brunner und Rechberger, 2016) wurden spezifische Massenströme und Zusammensetzungen von Bioabfällen aus unterschiedlichen Bebauungs- und Sammelstrukturen sowie deren Verteilung auf vorhandene Behandlungspfade (offene Kompostierung, Boxenvergärung, Müllheizkraftwerk) erfasst. Basierend darauf wurden unter Einbeziehung weiterer etablierter Behandlungsoptionen für Bioabfälle (geschlossene Kompostierung, Pfropfenstromvergärung) alternative Bewirtschaftungsszenarien entwickelt und mittels Ökobilanzierung (vgl. EC-JRC, 2010) unter Verwendung der Bewertungsmethode „Environmental Footprint 3.1“ hinsichtlich kritischer Prozesse und Schlüsselfaktoren für das Umweltverhalten analysiert. Als funktionelle Einheit diente dabei die Behandlung der in Kassel im Jahr 2021 gesammelten Bioabfälle, als Referenzfluss auf Stadt-Ebene die gesamte Sammelmenge von ca. 36.600 Mg/a (vgl. Bachmann et al., 2025).
Im zweiten Schritt wurden Bioabfallbewirtschaftungskonzepte mit integrierter Aktivkohleherstellung zur Spurenstoffelimination in der weitergehenden Abwasserreinigung untersucht. Für unterschiedliche Bioabfallfraktionen als Ausgangsmaterialien (Heckenschnitt, gemischte Bioabfälle aus der Biotonne) wurden experimentelle Daten zur Abfallaufbereitung, zur Kohleherstellung und -aktivierung sowie zum Einsatz in der Abwasserreinigung in Form von Material- und Energiebilanzen ausgewertet. Basierend darauf erfolgte eine ökobilanzielle Bewertung für die Bereitstellung biogener Aktivkohlen für die Abwasserreinigung aus unterschiedlichen Bioabfallfraktionen. Als funktionelle Einheit wurde die Herstellung der für die Elimination organischer Spurenstoffe im Kasseler Abwasser benötigten Menge biogener Aktivkohle aus urbanen Bioabfällen festgelegt. Da das Adsorptionsvermögen der Aktivkohle u.a. vom Ausgangsmaterial, der Aufenthaltsdauer im Pyrolysereaktor und dem Aktivierungsgrad abhängt, werden zur Wahrung funktioneller Äquivalenz unterschiedliche Mengen biogener Aktivkohle und somit urbaner Bioabfälle benötigt (vgl. Siebert et al., 2025). Bei Integration der Aktivkohleherstellung in die konventionellen Bewirtschaftungsszenarien des ersten Schritts werden folglich unterschiedlich große Mengen Bioabfall der konventionellen Behandlung entzogen, was sowohl mit niedrigeren Emissionsfrachten als auch mit geringeren Nebenproduktmengen (Kompost, Biogas, Strom, Wärme) einhergeht. Gleichzeitig entstehen neben den Umweltbelastungen der Herstellung biogener Aktivkohle Umweltentlastungen durch die Substitution konventioneller Aktivkohle.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchungen zum Status Quo konventioneller Bewirtschaftungssysteme für urbane Bioabfälle brachten hervor, dass niedrige Prozessemissionen (v.a. CH_4, N_2O) biologischer Behandlungsanlagen sowie eine effiziente Nutzung der erzeugten Produkte (v.a. Kompost) eine entscheidende Rolle für die ökologische Vorteilhaftigkeit der spezifischen Behandlung gegenüber der thermischen Verwertung im Müllheizkraftwerk spielen. Unter der Annahme mittlerer Emissionswerte sowie einer durchschnittlichen Kompostvermarktung deutscher Anlagen schneiden biologische Behandlungspfade u.a. in den Wirkungskategorien Klimawandel und Eutrophierung (terrestrisch, marin) schlechter ab als die thermische Verwertung im Müllheizkraftwerk. Bei niedrigeren Anlagenemissionen durch eine verbesserte Betriebsführung sowie eine effizientere Kompostnutzung (v.a. als Mineraldüngersubstitut) stellen sich biologische Behandlungspfade jedoch in den Wirkungskategorien Klimawandel und Eutrophierung (terrestrisch) ökobilanziell vorteilhaft gegenüber der Verwertung im Müllheizkraftwerk dar (vgl. Bachmann et al., 2025).
Die Untersuchungen zur Verwertung urbaner Bioabfälle zu Aktivkohle zeigen, dass das Umweltverhalten in den Wirkungskategorien Versauerung, Eutrophierung (terrestrisch, marin), Feinstaub sowie photochemische Oxidantienbildung maßgeblich von den Emissionen der Pyrolyse (NO_x, SO_2, Staub) beeinflusst wird. Die Biomasseaufbereitung, die insbesondere für gemischte Bioabfälle aus der Biotonne nötig ist, wirkt sich

hauptsächlich auf die Wirkungskategorien Klimawandel und Ressourcennutzung (fossile Energieträger) aus. Verglichen mit der Herstellung konventioneller Aktivkohle auf Steinkohle-Basis ergeben sich für funktionell äquivalente Mengen biogener Aktivkohlen deutlich geringere Klimafußabdrücke (vgl. Abbildung 1). Erste Ökobilanz-Ergebnisse für die integrierte Aktivkohleherstellung auf Heckenschnitt-Basis zeigen, dass gegenüber bestehenden Bioabfallbewirtschaftungssystemen vor allem aufgrund der Substitution Steinkohle-basierter Aktivkohle Umweltentlastungen in 12 von 16 Wirkungskategorien erzielt werden. Einzig in der Wirkungskategorie Ökotoxizität (Süßwasser) kommt es durch die Integration der Aktivkohleherstellung zu relevanten Umweltbelastungen, die vor allem aus der ausbleibenden Kompostproduktion bzw. der dadurch ausbleibenden Substitutionswirkungen hervorgehen.

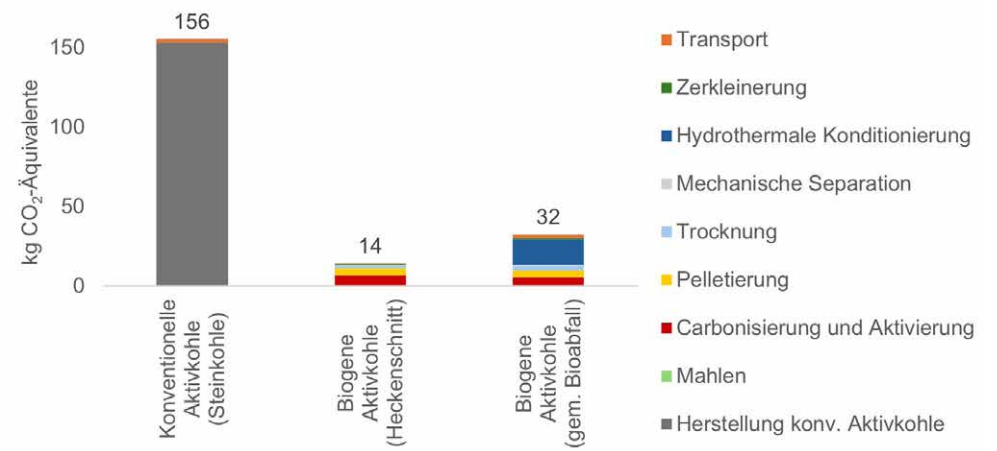


Abbildung 1: Treibhauspotenziale der Herstellung der für die Elimination organischer Spurenstoffe aus 1000 m³ Kasseler Abwasser benötigten Mengen Aktivkohle (Steinkohle-basiert: ca. 10 kg Aktivkohle aus 30 kg Steinkohle; Heckenschnitt-basiert: ca. 13 kg Aktivkohle aus 215 kg Biomasse; gemischter Bioabfall: ca. 28 kg Aktivkohle aus 1.155 kg Biomasse).

4 Fazit und Ausblick

Die Umweltauswirkungen biologischer Behandlungspfade für urbane Bioabfälle sind in hohem Maße abhängig von der Qualität der Anlagenführung (Prozessemissionen) und der effizienten Nutzung erzeugter Produkte (Substitutionswirkung). Unter Annahme mittlerer Emissionswerte und durchschnittlicher Kompostvermarktungswege deutscher Anlagen stellt die Integration der Herstellung biogener Aktivkohle in bestehende Bewirtschaftungssysteme für urbane Bioabfälle insbesondere aufgrund der mit der Substitution konventioneller Aktivkohle einhergehenden Umweltentlastungen eine ökologisch vorteilhafte Alternative gegenüber der konventionellen biologischen Behandlung dar. Durch eine Gegenüberstellung der ökobilanziellen Bewertung mit einer Lebenszykluskostenrechnung (vgl. Martinez-Sanchez et al., 2015) gilt es im Folgenden, die ökologisch-ökonomisch besten Varianten zur Integration der Erzeugung von biogenen Aktivkohlen für die Abwasserreinigung zu identifizieren und ein optimiertes Bewirtschaftungsszenario für urbane Bioabfälle in Kassel zu konzipieren.

Literatur/Quellen

Bachmann, K., Schmidt, S., Kaetzl, K., Morck, T., Laner, D., 2025. Environmental performance of management scenarios for urban bio-waste: A German case study on the role of sources and pathways. Waste Management (205) 114974, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114974.

Brunner, P.H., Rechberger, H., 2016. Handbook of Material Flow Analysis: For Environmental, Resource, and Waste Engineers (2. Auflage). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315313450.

EC-JRC, 2010. European Commission - Joint Research Centre: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance (1. Auflage). Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, https://data.europa.eu/doi/10.2788/38479.

Lwasa, S., Seto, K.C., Bai, X., Blanco, H., Gurney, K.R., Kılkış, Ş., Lucon, O., Murakami, J., Pan, J., Sharifi, A., Yamagata, Y., 2022. Urban Systems and Other Settlements. In: IPCC, 2022: Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK und New York, NY, USA, S. 861–952. https://doi.org/10.1017/9781009157926.010.

Martinez-Sanchez, V., Kromann, M.A., Astrup, T.F., 2015. Life cycle costing of waste management systems: Overview, calculation principles and case studies. Waste Management (36) S. 343-355, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.033.

Remy, C., 2024. Treibhausgasbilanz der Produktion und Regeneration von Aktivkohle. DWA Expertengespräch „Aktivkohle aus Biomasse für eine nachhaltige Abwasserreinigung“, 21.-22.03.2024, Kassel, Deutschland. Online verfügbar unter: https://www.kompetenz-wasser.de/de/forschung/publikationen/treibhausgasbilanz-der-produktion-und-regeneration-von-aktivkohle (Stand 30.07.25).

Siebert, N., Raza, H.A., Bachmann, K., Kaetzl, K., Laner, D., Wachendorf, M., Morck, T., 2025. Adsorption of organic micropollutants on biogenic activated carbon: Potential of kitchen waste and woody residues as feedstocks for advanced wastewater treatment. Journal of Environmental Management (394) 127476. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127476.

Wei, T., Wu, J., Chen, S., 2021. Keeping Track of Greenhouse Gas Emission Reduction Progress and Targets in 167 Cities Worldwide. Front. Sustain. Cities (3) 696381. https://doi.org/10.3389/frsc.2021.696381.

Yang, N.-H. N., Yang, A., 2022. Urban bioeconomy: Uncovering its components, impacts and the Urban Bio-Symbiosis. Cleaner Production Letters (3) 100015, https://doi.org/10.1016/j.clpl.2022.100015.

Kontakt

Konstantin Bachmann, *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

Roman Zurhold, Peter Vennemann, Sören Weinrich

Leitfaden zur Energiesystemoptimierung von Abfalldeponien: Anwendung am Beispiel der Deponie Altenberge

***Abstract**: Im vorliegenden Beitrag wird ein strukturierter Leitfaden für die standortspezifische Energiesystemoptimierung an Abfalldeponien entwickelt und am Beispiel der Deponie Altenberge evaluiert. Für eine realitätsnahe Modellierung und Optimierung individueller Energiesysteme auf Basis des Spreadsheet Energy System Model Generators (SESMG) wird ein zusätzliches Analysetool zur Technologieauswahl an Deponiestandorten entworfen und implementiert. Die Ergebnisse an der Deponie Altenberge zeigen, dass insbesondere Szenarien mit einer geplanten Gasaufbereitung und großem Eigenstromanteil wirtschaftlich attraktiv sind. Das optimierte Energiesystem setzt auf eine Kombination aus Photovoltaik, Windkraft, Wärmepumpe und Elektrolyse, um die Verbraucher am Standort effizient zu versorgen. Durch die systematische Vorgehensweise im Leitfaden wird die Erstellung individueller Energiesysteme an Deponien deutlich erleichtert. Trotz bestehender Herausforderungen, wie der begrenzten Abbildungstiefe im SESMG und vielen manuellen Arbeitsschritten, stellt der Leitfaden damit eine wertvolle Unterstützung dar, um Deponien als Standorte für eine zukunftsfähige Energieversorgung zu erschließen und damit einen Beitrag zur Energiewende zu leisten.*

1 Einleitung

Um die Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen, ist eine umfassende Energiewende erforderlich, die neben der Stromerzeugung alle Verbrauchssektoren und damit verbundene Energieträger dekarbonisiert [1]. Smarte Energiesysteme und Sektorenkopplung ermöglichen dies, indem sie erneuerbare Energieträger durch Umwandlungs- und Speichertechnologien effizienter nutzen und sektorenübergreifend bereitstellen [2].

Deponien bieten ideale Voraussetzungen für Energiesysteme und können aktiv zur Energiewende beitragen. Die Modellierung von Energiesystemen ist jedoch durch softwarespezifische Herausforderungen, mangelndes Wissen über Energiesysteme und die Berücksichtigung deponiespezifischer Gegebenheiten erschwert. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wurde ein strukturierter Leitfaden entwickelt, der diese Herausforderungen adressiert und aufzeigt, wie Energiesysteme für Deponien systematisch erstellt und optimiert werden können. Damit wird ein bislang unbeachtetes Forschungsfeld erschlossen, da spezifische Energiesysteme auf Deponien bisher kaum wissenschaftlich untersucht wurden.

Zur Optimierung von Energiesystemen wird der *Spreadsheet Energy System Model Generator* (SESMG) genutzt. Die an der FH Münster entwickelte Software basiert auf dem *Open Energy Modeling Framework* (OEMOF) und ist anwendungsfreundlich ausgelegt. OEMOF nutzt numerische Optimierungsalgorithmen, mit deren Hilfe die bestmögliche Technologiekonstellation eines Energiesystems ermittelt werden kann [3, 4].

2 Methodik

2.1 Vorgehensweise

Zur Erstellung des Leitfadens wurden die Eigenschaften von Energiesystemen mit den spezifischen Gegebenheiten von Abfalldeponien abgeglichen, um geeignete Technologien für den Einsatz auf Deponien zu identifizieren. Die erforderlichen Kenntnisse zur Energiesystemmodellierung sowie die Anwendung des Leitfadens wurden exemplarisch am Beispiel der Deponie Altenberge erarbeitet und validiert.

2.2 Energiesysteme auf Deponien

Moderne Energiesysteme umfassen eine große Vielfalt an Technologien. Dazu zählen Technologien zur Erzeugung und Speicherung von Strom und Wärme sowie zur Bereitstellung von Gasen und Kraftstoffen wie Wasserstoff, Methan, Methanol oder anderen synthetischen Energieträgern.

An Deponiestandorten ergeben sich vielfältige Potenziale, die durch die Integration eines Energiesystems genutzt werden können. Dazu zählen die Verwertung von Deponiegas, die Versorgung der Betriebsgebäude und der Sickerwasserbehandlung, die Nutzung bereits abgedeckter oder ungenutzter Deponieflächen sowie die standortspezifische Versorgung unterschiedlicher Verbraucher. Eine detaillierte Analyse zeigt, dass abhängig von den vor Ort vorhandenen Verbrauchern nahezu alle Technologien moderner Energiesysteme auf Deponien eingesetzt werden können und sich Synergien effizient nutzen lassen.

Neben den Vorteilen, die ein Energiesystem für einen Deponiestandort bietet, ergeben sich umgekehrt auch Potenziale, die für die Errichtung des Energiesystems vorteilhaft sind. Dazu zählt insbesondere die häufig große verfügbare Fläche, die die Integration unterschiedlicher Technologien ermöglicht. Darüber hinaus kann aufgrund der langen Betriebs- und Nachsorgezeiträume von Deponien dauerhaft vorhandenes Personal den Betrieb und die Überwachung der im Energiesystem eingesetzten Technologien sicherstellen. Nicht zuletzt können bestehende Infrastrukturen auf dem Deponiegelände mitgenutzt werden, wodurch zusätzliche Investitions- und Betriebskosten reduziert werden können.

2.3 Vorauswahl der Technologien durch ein tabellenbasiertes Analysetool

Aus der vorangegangenen Analyse wird deutlich, dass grundsätzlich eine Vielzahl von Technologien in Energiesystemen auf Deponien eingesetzt werden kann. Um zu bestimmen, welche dieser Technologien für eine spezifische Deponie tatsächlich relevant sind, wurde ein tabellen- bzw. Excel-basiertes Analysetool entwickelt, das einen zentralen Bestandteil des Leitfadens darstellt. Das Tool ermöglicht die automatische Identifikation geeigneter Technologien für ein standortspezifisches Energiesystem auf Deponien. Darüber hinaus werden Wechselwirkungen zwischen den Technologien abgebildet, auf deren Grundlage das Energiesystem konzipiert werden kann.

Das Tool basiert auf den spezifischen Voraussetzungen für die relevanten Technologien eines Energiesystems. Diese Voraussetzungen werden automatisch mit den spezifischen Gegebenheiten des jeweiligen Deponiestandorts sowie mit den Anforderungen der übrigen Technologien abgeglichen. Nur wenn die Voraussetzungen erfüllt sind, ist es sinnvoll, die betreffende Technologie in die Modellierung einzubeziehen. So benötigt ein Elektrolyseur beispielsweise sowohl eine Stromquelle als auch einen Abnehmer für den erzeugten Wasserstoff. Eine Windenergieanlage kann in diesem Zusammenhang den Elektrolyseur mit Strom versorgen und erfüllt dadurch gleichzeitig ihre eigene Voraussetzung eines Stromabnehmers. Durch diese Vorauswahl wird die Modellierung des Energiesystems deutlich vereinfacht.

2.4 Leitfaden

Der entwickelte Leitfaden folgt einem strukturierten Vorgehen, das sich am Beispiel der Deponie Altenberge anschaulich erläutern lässt. Zunächst werden dabei die Potenziale des Standorts sowie bestehende Technologien erfasst. Die Deponie Altenberge bietet dabei vielfältige Möglichkeiten: Auf dem Gelände befindet sich eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 3,5 MW, die um weitere 2 MW erweitert werden kann, sowie eine Biogasanlage mit zwei Blockheizkraftwerken mit insgesamt rund 850 kW installierter elektrischer Leistung, deren Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) bereits ausgelaufen ist. Zudem besteht die Möglichkeit, eine Windenergieanlage mit 6 MW Leistung zu errichten. Weitere Potenziale ergeben sich durch Verbraucher wie die Sickerwasserbehandlungsanlage, die Strom, Wärme und Sauerstoff benötigt, sowie mehrere Betriebsgebäude, die mit Wärme versorgt werden können. Darüber hinaus besteht ein Anschluss an das Stromnetz sowie unmittelbarer Zugang zum Erdgasnetz. Ein externer Betreiber plant zudem den Bau einer Gasaufbereitungsanlage, die sowohl Deponie- als auch Biogas aufbereiten und über das Energiesystem mit Strom versorgen kann.

Nach der Erfassung der Potenziale werden mit Hilfe des Analysetools geeignete Technologien für das Energiesystem identifiziert. Aufgrund der Rahmenbedingungen der Deponie Altenberge sind insbesondere Wärmepumpen, Elektrolyseure und Batteriespeicher als zusätzliche Komponenten in die Modellierung mit einzubeziehen. Aus den verschiedenen Technologien und Potenzialen ergeben sich unterschiedliche techno-ökonomische Fragestellungen, die im Rahmen der Energiesystemmodellierung beantwortet werden können, wobei für manche Fragestellungen die Modellierung mehrerer Energiesysteme erforderlich ist. Für die Deponie Altenberge steht vor allem die Identifikation der wirtschaftlichsten Technologiekombination im Vordergrund. Um belastbare Aussagen zu treffen, wird daher zusätzlich ein Referenzsystem modelliert, das Vergleiche mit dem bestehenden System ermöglicht. Darüber hinaus wird untersucht, ob die Versorgung der extern betriebenen Gasaufbereitungsanlage mit Strom aus dem eigenen Energiesystem wirtschaftlich sinnvoll ist. Dazu werden verschiedene Szenarien mit und ohne die Stromversorgung der Gasaufbereitung betrachtet. Zuletzt erfolgt die Modellierung und Optimierung des Energiesystems unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen des SESMG. Neben ökonomischen Kriterien können dabei auch emissionsorientierte Aspekte berücksichtigt werden.

3 Ergebnisse

3.1 Leitfaden

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde erstmals ein strukturierter Leitfaden zur Energiesystemmodellierung an Deponien entwickelt und am Beispiel der Deponie Altenberge validiert. Das systematische Vorgehen bietet erhebliche Vorteile gegenüber einer unstrukturierten Herangehensweise. Der Leitfaden schafft Klarheit, vermittelt Wissen zu relevanten Technologien und ermöglicht es mithilfe des Analysetools, selbst komplexe Energiesysteme abzubilden.

Durch die vereinfachte Abbildung der unterschiedlichen Technologien und eine geringe Selektionswirkung des Analysetools ist die Modellierung von Energiesystemen dennoch ein iterativer Prozess, der einen hohen manuellen Aufwand erfordert. Um die Unsicherheiten zu reduzieren, ist daher eine Weiterentwicklung sowohl des Leitfadens als auch des SESMG erforderlich. Zudem gilt es, den Leitfaden auch an weiteren Deponiestandorten in Deutschland anzuwenden, um seine Übertragbarkeit und Allgemeingültigkeit sicherzustellen.

3.2 Deponie Altenberge

Die Ergebnisse der ökonomischen Optimierung für die Deponie Altenberge zeigen, dass der Betrieb einer Gasaufbereitungsanlage wirtschaftlich vorteilhaft ist, da dies die Weiterführung der Biogasanlage ermöglicht und durch den zusätzlichen Strombedarf weitere Erlöse generiert. Ebenso erweist sich die vollständige Installation der möglichen Windenergie- und Photovoltaikanlagen als wirtschaftlich sinnvoll. Der Einsatz eines Elektrolyseurs ist empfehlenswert, da einerseits ein Anschluss an das Erdgasnetz besteht und andererseits der dabei entstehende Sauerstoff für die Sickerwasserbehandlung genutzt werden kann. Diese sollte vorrangig mit Strom und Wärme aus dem eigenen Energiesystem versorgt werden. Auch die Wärmeversorgung der Betriebsgebäude sollte bevorzugt intern erfolgen, wobei der Einsatz einer Wärmepumpe wirtschaftliche Vorteile bietet. Batteriespeicher werden in der Optimierung auf Grund von zu hohen Kosten ausgeschlossen. So ergibt sich selbst bei einem Mindestpreis von 12 ct/kWh für die Versorgung der Gasaufbereitung im Vergleich zum Referenzsystem (bestehendes System ohne Gasaufbereitungsanlage) eine Gewinnsteigerung von rund von 22 %.

Bemerkung

Die angewendeten Methoden lassen sich auch auf andere Deponiestandorte übertragen. Für die Modellierung weiterer Standorte kooperiert der Erstautor Roman Zurhold mit dem im Bereich der erneuerbaren Energien tätigen Planungsunternehmen Enwelo in Steinfurt. Weitere Informationen finden Sie unter www.enwelo.de.

Eine detaillierte Beschreibung des Leitfadens ist in einem ausführlichen Fachartikel in der Ausgabe 12/25 der Fachzeitschrift *Müll und Abfall* zu finden (https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2025.12.05).

Literatur/Quellen

[1] Umweltbundesamt, ed. Klima und Treibhauseffekt. 23.04.2021. https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/klima-treibhauseffekt#grundlagen.

[2] H. Lund, B. V. Mathiesen, D. Connolly, and P. A. Ostergaard. “Renewable Energy Systems - A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modelling of 100 % Renewable Solutions”. In: Chemical Engineering Transactions 39 (2014), pp. 1–6. doi: 10.3303/CET1439001.

[3] S. Hilpert, C. Kaldemeyer, U. Krien, S. Günther, C. Wingenbach, and G. Plessmann. “The Open Energy Modelling Framework (oemof) - A new approach to facilitate open science in energy system modelling”. In: Energy Strategy Reviews 22 (2018), pp. 16–25. issn: 2211467X. doi: 10.1016/j.esr.2018.07.001.

[4] J. Budde, C. Klemm, J. N. Tockloth, G. Becker, and P. Vennemann. “Automatisierte Modellierung und Optimierung urbaner Energiesysteme”. In: RET. Con 2023. Ed. by V. Wesselak. 2023. isbn:978-3-940820-21-1.

Kontakt

M. Eng Roman Zurhold
Mülldeponie Altenberge GmbH & Co. KG
Tel.-Nr. +49 15775313443
E-Mail: roman@zurhold.me

TEIL 6
Vermeidung

Leitung:

Prof. Dr.-Ing. Susanne Rotter

Gregor Biastoch, Senta Berner, Philipp Lorber

Marine plastic waste prevention through land-based interventions in Bangladesh

***Abstract**: Marine plastic pollution in Bangladesh is largely driven by land-based sources and is expected to intensify as population and waste generation continue to grow. This paper presents results from the SCIP-Plastics project, which examines plastic substitution measures in Khulna, with a focus on replacing single-use plastic bags with locally produced jute. A cradle-to-gate life cycle assessment shows that jute outperforms low-density polyethylene, while laboratory tests confirm the biodegradability of jute. Two pilot campaigns on university campuses distributed 1,290 jute bags, demonstrating high acceptance (93% of respondents) estimating that 5,000 to 22,000 plastic bags may have been avoided. The findings indicate that natural fibre substitution can contribute to integrated waste prevention strategies, while methodological limitations in quantification remain.*

1 Introduction

With around 170 million inhabitants, Bangladesh is the most densely populated mainland country in the world. In comparison, Germany hosts roughly half as many people on about twice the land area. At the same time, Bangladesh is frequently cited among the world's top ten contributors to marine plastic pollution (Jambeck et al. 2015).

Estimates of plastic inputs into the marine environment commonly focus on rivers and coastal areas as major pathways, while the ocean is treated as the final sink. Despite growing attention, significant knowledge gaps remain, particularly with regard to pollution hotspots, transport and retention processes in ecosystems, traceability, degradation pathways, and ecological impacts (Windsor et al. 2019). Despite these knowledge gaps it is widely acknowledged that the dominant share of marine plastic originates from land-based sources (Li et al. 2016), including shorelines, rivers, and wastewater systems. Addressing these inputs therefore depends largely on effective solid waste and wastewater management systems (UNEP 2016).

Against this background, the research project Sustainable Capacity Building to Reduce Irreversible Pollution by Plastics (SCIP-Plastics) focuses on pollution prevention at source in Khulna, Bangladesh's third-largest city with approximately 1.2 million inhabitants. The project examined the entire municipal waste management system, from waste generation and collection to temporary storage in secondary transfer stations, recycling activities, and final disposal. Both formal and informal actors were included in the project (Kraft et al. 2024).

One selected intervention presented in this paper addresses substitution and avoidance potentials. As part of the broader research, alternative materials for replacing plastic products were assessed. In line with the waste hierarchy, avoidance of plastic waste at source is considered the most effective strategy. The focus was placed on natural, plant-based materials, while plastic alternatives such as bioplastics or biodegradable plastics were excluded. Jute, a natural fibre with long historical and economic relevance in Bangladesh, emerged as a promising option due to its renewability and biodegradability.

The paper presents the results of accompanying studies on substituting plastics with jute, including a life cycle assessment (LCA), an acceptance study, the material selection and design process, and implementation through two pilot projects.

2 Preliminary studies

Over the past decade, jute production in Bangladesh has increased from 1.3 million tonnes in 2014 to around 1.9 million tonnes in 2023. Bangladesh is therefore the world's largest producer and exporter of jute, ahead of India with approximately 1.6 million tonnes. Jute is cultivated on about 7,300 km², making it an important economic sector (FAO 2025). In 2023, industry sources reported 227 operating spinning mills employing approximately 160,000 workers (BJS 2023).

Despite jute being widely perceived as an environmentally friendly material, a LCA was conducted to better understand its environmental impact. The analysis was divided into three stages: the agricultural phase, the pre-manufacturing phase, and the manufacturing phase. For the agricultural phase secondary data from literature, databases, and the Bangladesh Jute Research Institute were used. Primary data for the manufacturing phases were collected at two jute mills: Wave Jute Textile Mill in Khulna (300 employees, 10,000 t/a) and Akij Jute Mill in Jessore (6,600 employees, 120,000 t/a). In a cradle-to-gate comparison of 1 kg of jute versus 1 kg low-density polyethylene (LDPE) jute outperformed LDPE with a GWP100 of 2.09 kg CO_2-eq compared to 3.17 kg CO_2-eq, fossil resource depletion of 0.55 versus 2.13 kg oil-eq, and water depletion of 16.82 versus 51.29 l water-eq.

Material substitution alone, however, does not prevent environmental impacts if significant shares of products end up as mismanaged waste, for example through littering. While such pathways are not captured in LCA, biodegradability was therefore considered as an additional criterion. Biodegradability tests were conducted for three jute products (raw fibre, processed fibre, and fabric) under anaerobic conditions using a 34-day batch test. The accumulated biogas production was measured and compared to a defined cellulose reference standard. Based on biogas yield, biodegradability rates of 63%, 58%, and 56% were determined, while reductions in organic matter amounted to 87%, 48%, and 53%, respectively. Despite methodological limitations and the differences between laboratory and real-world environmental conditions, the results confirm that jute is generally biodegradable. At the same time, the degree of processing was found to negatively affect biodegradability (Biastoch et al. 2025).

3 Pilot campaign

A literature review was carried out to identify suitable single-use products in the end-consumer sector that could be substituted with jute-based alternatives. Four main categories of single-use plastic products are commonly distinguished: grocery bags; takeout and takeaway containers; plates, straws, and cutlery; and bottles and sachets for beverages (UNCTAD 2022). Based on this review, and complemented by findings from acceptance studies reported in the literature, low-density polyethylene (LDPE) single-use shopping bags were selected as the most suitable product for practical implementation.

Two pilot campaigns were conducted on university campuses in Khulna (KUET 8,000 students) and Chattogram (CUET 6,500 students). The campuses comprise academic buildings, student and staff housing, medical facilities, privately run shops, a mosque, and recreational areas, providing a diverse setting for the campaign. Both campaigns were accompanied by dissemination and awareness-raising activities.

The bag design was developed in workshops involving students and institutional representatives and produced in cooperation with local jute industry partners. Distribution took place through 29 privately operated shops on the campuses as well as during dedicated campaign events. Across both pilots, a total of 1,290 jute bags were sold or distributed. To assess acceptance and behavioural change, a total of 815 pre- and post-campaign questionnaires were completed.

In the pre-survey, 390 of 620 respondents (62.9%) reported that they mainly used single-use plastic bags, while 571 of 609 respondents (93.8%) expressed support for replacing them with jute-based alternatives. However, after the campaigns in the post-survey 27 of 197 participants (13.7%) raised concerns or rejected a permanent shift towards reusable bags. Reported concerns included the need for administrative enforcement, price sensitivity, the absence of discount or incentive schemes, as well as issues related to design, size, and material properties. Among the involved shopkeepers, 17 of 28 respondents (61%) assessed the price as acceptable, despite mixed views overall. However all participating shopkeepers indicated a willingness to continue selling jute bags if they were available on the market.

Quantifying the amount of waste avoided through such interventions remains challenging, as it requires measuring waste quantities that in fact did not occur. Based on the number of jute bags introduced into circulation and the average usage rates derived from survey responses, it can be estimated that approximately 5,000 to 22,000 single-use plastic bags may have been substituted. This wide range reflects the inconsistencies in questionnaire responses and highlights the considerable uncertainties associated with such estimations.

4 Discussion and Conclusion

When comparing World Bank data from 2018, Bangladesh's annual per capita plastic waste generation of 4.43 kg appears low in relation to Germany's 79.17 kg. This comparison, however, projects the scale of the future challenge. Based on data from 2012, the United Nations projects that Bangladesh's population will increase to approximately 201.9 million by 2050 (+30%). Over the same period, total waste generation is expected to grow much faster, reaching an estimated 31.16 Mt per year, an increase of about 111% (Kaza et al. 2018).

Beyond absolute necessary improvements along the waste collection, treatment, and disposal chain, patterns of use and consumption deserve greater attention. Waste avoidance can significantly reduce pressures, while substitution represents only one element among a broader set of measures for reduction. Therefore, a key challenge lies in the quantification of the avoidance impact.

The presented analysis does not provide a methodologically robust valuation approach neither. Further harmonisation and standardisation of methods are required to facilitate their integration into municipal waste management strategies.

The interpretation and transferability of the results are limited by the composition of the study sample. The majority of participants were students (90.3%), and most respondents were under the age of 30 (92.4%), which does not fully reflect the demographic structure of urban populations. Students may also be more receptive to sustainability initiatives due to their academic environment. In addition, both university campuses were affected by external constraints during the study period, including political unrest and closures related to Ramadan.

Bangladesh was among the first countries to ban the production, sale, and use of polythene bags in 2002. However, weak enforcement led to their continued widespread availability. Following extensions of the ban, a Supreme Court ruling in 2020, and political changes in 2024, the national restrictions on single-use plastic bags have been enforced more consistently. As a result, the availability of LDPE bags on the market has declined noticeably.

The implementation of prevention and substitution measures remains highly context-specific. Their effectiveness depends on local conditions and is strongly influenced by external factors. Lasting impacts can only be achieved when cultural, economic, and legal measures are addressed likewise. While consumer

markets, particularly packaging and everyday consumption, are strongly influenced by such factors, they are not the only sectors with potential for interventions. The literature also highlights fishing and agricultural activities as promising fields for action (UNCTAD 2025). These sectors operate largely outside municipal waste management systems and play a significant role in Bangladesh.

Acknowledgement

The SCIP Plastics project on which this publication is based was funded by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection under grant no. 67MM0004. The responsibility for the content of this publication lies with the author.

References

Biastoch, Gregor; Kraft, Eckhard; Khan, Farjana; Das, Niloy; Chowdhury, Abu Mahmud Iftekher; Zuthi, Farzana Rahman (2025): Testing the biodegradability of jute to improve end-of-life cycle assessment. Edited by WasteSafe conference 2025.

BJS (2023): Statistical Information. Edited by Bangladesh Jute Spinners Association. Available online at https://www.juteyarn-bjsa.org/statistical-information/, checked on 8/3/2023.

FAO (2025): Production / Crops and livestock products. Licence: CC-BY-4.0. Available online at https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL, checked on 4/1/2024.

Jambeck, J. R.; Geyer, R.; Wilcox, C.; Siegler, T. R.; Perryman, M.; Andrady, A. et al. (2015): Plastic waste inputs from land into the ocean. In Science (New York, N.Y.) 347 (6223), pp. 768–771. DOI: 10.1126/science.1260352.

Kaza, S; Yao, L; Bhada-Tata, P; Van Woerden, F. (2018): What a Waste 2.0: A global Snapshot of Solid Waste Managment to 2050: © World Bank License: CC BY 3.0 IGO. Available online at https://hdl.handle.net/10986/30317.

Kraft, E.; Kerber, H.; Islam, Md. R.; Zuthi, M. F. R.; Ul Jabbar, A. (2024): Guide to Municipal Plastic Waste Management in Bangladesh. Weimar, Germany.

Li, W. C.; Tse, H. F.; Fok, L. (2016): Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. In The Science of the total environment 566-567, pp. 333–349. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.084.

UNCTAD (2022): Substitutes for Single-Use Plastics in Sub-Saharan Africa and South Asia Case Studies from Bangladesh, Kenya and Nigeria. Available online at unctad.org/publication/substitutes-single-use-plastics-sub-saharan-africa-and-south-asia.

UNCTAD (2025): Plastic substitution in developing countries: Sectoral opportunities and challenges. Available online at https://unctad.org/publication/plastic-substitution-developing-countries-sectoral-opportunities-and-challenges.

UNEP (2016): Marine plastic debris and microplastics. – Global lessons and research to inspire action and guide policy change. United Nations Environment Programme. Nairobi. Available online at https://wedocs.unep.org/items/fc1258f9-4c83-4e85-90d8-bccf7fa097f1.

Windsor, Fredric M.; Durance, Isabelle; Horton, Alice A.; Thompson, Richard C.; Tyler, Charles R.; Ormerod, Steve J. (2019): A catchment-scale perspective of plastic pollution. In Global change biology 25 (4), pp. 1207–1221. DOI: 10.1111/gcb.14572.

Contact

M.Sc. Gregor Biastoch, Research fellow
Bauhaus-Universität Weimar / Chair of Resource management
Tel.-Nr. 03643 584867
E-Mail: gregor.biastoch@uni-weimar.de
Homepage: https://www.uni-weimar.de/en/civil-and-environmental-engineering/chairs/resource-management/

Alejandra María Torres Gómez, Vera Susanne Rotter

Methode zur Charakterisierung von Verpackungslitter als Grundlage für die Bewertung der Litteringwahrscheinlichkeit

***Abstract**: Littering ist ein bedeutendes Umweltproblem, das Ökosysteme und die menschliche Gesundheit beeinträchtigt. Der hohe Anteil von Verpackungen im Meeresmüll der EU unterstreicht die Notwendigkeit gezielter Reduktionsmaßnahmen. Ein Ansatz besteht in der Integration des Kriteriums „Litteringwahrscheinlichkeit" in die Zertifizierung der Kreislaufwirtschaftsfähigkeit. Dieses Kriterium bewertet, ob Verpackungen Merkmale aufweisen, die mit einer erhöhten Tendenz zu Littering verbunden sind. Grundlage für die Bewertung ist eine entsprechende Datenbasis, die jedoch derzeit begrenzt ist; zudem existiert bislang keine standardisierte Methode zu ihrer Erhebung. Ziel dieser Studie ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Charakterisierung von Verpackungslitter, das die Identifikation litteringanfälliger Verpackungsmerkmale ermöglicht. Das Verfahren basiert auf einem Citizen-Science-Ansatz und einer Sortieranalyse und wurde im Sommer 2025 getestet. Die Ergebnisse verdeutlichen sein Potenzial, häufig gelitterte Verpackungen sowie deren relevante Merkmale und Merkmalsausprägungen zu erfassen. Für belastbare, repräsentative Aussagen sollte die Datenerhebung in zukünftigen Arbeiten ausgeweitet werden.*

1 Einleitung

Littering bedeutet das absichtliche oder fahrlässige Wegwerfen von Abfällen im öffentlichen Raum (Belke et al., 2020) und führt zu erheblichen ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Schäden. Besonders problematisch ist gelitterter Kunststoff, weil es Böden und Gewässer verschmutzt, sich zu Mikroplastik zersetzt und so Tieren und letztlich auch Menschen schadet (Mehra et al., 2021; Yuan et al., 2022). Außerdem belastet Littering Branchen wie Fischerei und Tourismus, und wertvolle Materialien gehen dem Recycling verloren (Aretoulaki et al., 2021; VKU, 2020).

Trotz europäischer Maßnahmen wie der Einwegkunststoffrichtlinie bleibt die Menge an Litter – also gelitterte Abfälle – an europäischen Küsten hoch (MSFD Technical Group on Marine Litter, 2025). Rund die Hälfte des marinen Litters besteht aus Verpackungen (European Commission, 2025), deshalb sind gezielte Reduktionsmaßnahmen für Verpackungslitter relevant. Ein möglicher Ansatz ist, in der Zertifizierung der Kreislaufwirtschaftsfähigkeit von Verpackungen ein Kriterium zur „Litteringwahrscheinlichkeit" zu berücksichtigen, wie es im Projekt innoCErt (Horneber et al., 2025) gemacht wurde. Dieses Kriterium bewertet, ob ein Verpackungsdesign Merkmale bzw. Merkmalsausprägungen aufweist, die mit einer höheren Litteringwahrscheinlichkeit verbunden sind. Verpackungen mit solchen Merkmalen werdenn schlechter bewertet, wodurch Hersteller motiviert werden könnten, weniger litteringanfällige Lösungen zu entwickeln.

Für eine solche Bewertung wird eine vollständige und verlässliche Datenbasis zu solchen Verpackungsmerkmalen benötigt. Bisherige Studien liefern diese Daten jedoch nur unzureichend, weil sie selten speziell Verpackungen betrachten (Torres Gómez & Rotter, 2025). Zudem fehlt bislang eine standardisierte Methode zu deren Erhebung (Wilts et al., 2022). Ziel der vorliegenden Studie ist daher die Entwicklung einer Methode zur systematischen Charakterisierung von Verpackungslitter, die die Identifikation litteringanfälliger Verpackungsmerkmale ermöglicht.

2 Methodik

Die entwickelte Methode umfasst zwei Schritte: die Stichprobenahme und die Charakterisierung der Verpackungen aus den Litter-Stichproben (Sortieranalyse). Für die Stichprobenahme wurde eine vereinfachte Methode zur Erfassung von Litter auf vordefinierten Flächen entwickelt. Die Flächenauswahl selbst war nicht Teil des Untersuchungsumfangs. Grundlage bildete der Citizen-Science-Ansatz von Belke et al. (2020), der aufgrund der geringen Teilnehmendenzahl eine Reduktion des Aufwands bzw. der zu dokumentierenden Abfallobjekte empfahl. Diese Empfehlung wurde umgesetzt, indem Teilnehmende bei Müllsammelaktionen nur Verpackungen und Nicht-Verpackungen getrennt sammelten und die Gewichte digital dokumentierten. Die Beutel mit Verpackungen wurden anschließend an der TU Berlin sortiert und charakterisiert.

2.1 Stichprobenahme

Für die Müllsammelaktionen wurden die Teilnehmenden in Gruppen eingeteilt, denen jeweils eine vordefinierte Fläche zugewiesen wurde. Ein wichtiger Aspekt der Methodenentwicklung bestand darin, sowohl die optimale Gruppengröße pro Fläche als auch eine effiziente Rollenverteilung innerhalb der Gruppen zu bestimmen. Mindestens zwei Rollen wurden eingesetzt: eine Person zum Sammeln und eine zur Dokumentation per digitaler Umfrage. Die Umfrage orientierte die Teilnehmenden bei der Trennung in (leere) Verpackungen und Nicht-Verpackungen mit Hinweisen zur Kategorisierung (z. B. Definition von Verpackung, Entleerung der Verpackungen und Zuordnung der Inhalte zu den Nicht-Verpackungen) sowie Vorgaben zum Ausschluss bestimmter Abfälle (Glas, Sperr- und Bauabfälle, Laub, Hundekot, Zigarettenkippen, Lachgas-Kartuschen sowie gefährliche oder potenziell illegale Gegenstände wie Spritzen, Messer, Drogen).

Die Sammelaktionen dauerten maximal zwei Stunden. Anschließend wurden alle Beutel vor Ort mithilfe von Hängewagen gewogen und digital dokumentiert; das Eigengewicht war vorab bekannt. Auch die bearbeiteten Flächen wurden dokumentiert. Nicht-Verpackungen wurden zu den Berliner Stadtreinigungsbetrieben gebracht, Verpackungen hingegen zur TU Berlin für die Sortieranalyse.

2.2 Charakterisierung der Verpackungen aus den Litter-Stichproben (Sortieranalyse)

Die Sortieranalyse basiert auf einer erweiterten Methode nach Van Caneghem et al. (2024). Ziel war die detaillierte Charakterisierung gelitterter Verpackungen aller Materialgruppen auf Basis definierter Merkmale und Merkmalsausprägungen. Hierfür wurden die Proben zunächst mithilfe eines 40-mm-Siebs gesiebt. Verpackungen mit einer Größe von mehr als 40 mm wurden einzeln markiert und anhand definierter Merkmale charakterisiert. Bei Verpackungen kleiner als 40 mm wurden nur wenige, jedoch sehr homogene Fraktionen festgestellt. Aus diesem Grund erfolgte lediglich eine Kategorisierung mit anschließendem Zählen und Wiegen je Kategorie. Im Folgenden wird das Vorgehen für beide Fraktionen zusammenfassend beschrieben.

- **Große Verpackungen (> 40 mm):** Wiegen der ganzen Fraktion, Markierung der einzelnen Verpackungen, Entfernung von Lebensmittelresten sowie Wiegen und Charakterisierung der einzelnen Verpackungen nach Merkmalen (Material, Form, Produkt, Marke, deklarierter Inhalt).
- **Kleine Verpackungen (≤ 40 mm):** Wiegen der gesamten Fraktion, Zuordnung der Verpackungen zu vereinfachten Kategorien (Metall- und Kunststoffverschlüsse, kleine 2D-Verpackungen aus Kunststoff oder Verbundmaterial, sonstige kleine Verpackungen), Zählen und Wiegen jeder Kategorie.

Fehlwürfe (Nicht-Verpackungen) wurden aussortiert und entsorgt. Aus dem Vergleich von Gesamt- und Verpackungsgewichten ließ sich der Anteil an Nicht-Verpackungen je Fraktion berechnen. Zur Sicherstellung einer konsistenten Klassifizierung erhielten alle Sortierenden zwei Trainingssessions.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Ergebnisse der Methode zur Stichprobenahme

Im Sommer 2025 wurden zwei Müllsammelaktionen in drei Untersuchungsflächen von jeweils ca. 4.200 m² in Berlin-Neukölln (Nansenstraße, Böhmische Straße, Weigandufer) durchgeführt. Die Flächen wurden auf Grundlage vorheriger Beobachtungen (Kowalski et al., 2025) wegen der erwarteten hohen Litter-Belastung ausgewählt. Ziel war die Erprobung der in 2.1 beschriebenen Methode.

Die erste Aktion fand am 13. Juni 2025 statt, mit Gruppen von 3–4 Personen pro Fläche. Sie zeigte, dass das Einsammeln sehr kleiner Verpackungsteile wie Kronkorken äußerst zeitintensiv war. Aus diesem Grund wurden im Mittel lediglich 133 $m^2 \cdot (Person \cdot h)^{-1}$ bearbeitet und 112 g $Litter \cdot (Person \cdot h)^{-1}$ gesammelt; insgesamt konnten etwa 22 % der vorgesehenen Flächen abgedeckt werden. Es wurde außerdem beobachtet, dass Geschwindigkeit oft von den Teilnehmenden bevorzugt wird, was zu Fehlwürfen bei der Abfalltrennung führte.

Für die zweite Aktion am 7. Juli 2025 wurde der Arbeitsablauf verbessert: Eine Person war ausschließlich für das Einsammeln kleiner Verpackungen wie Flaschenverschlüsse, Bonbonverpackungen und sonstige kleine Verpackungsteile zuständig, ohne gleichzeitig für jeden Gegenstand die Umfrage auszufüllen. Zusätzlich übernahm eine weitere Person das Beutelmanagement sowie die Kontrolle der Trennung für die großen Verpackungen. Dadurch konnten im Mittel 338 $m^2 \cdot (Person \cdot h)^{-1}$ bearbeitet und 326 g $Litter \cdot (Person \cdot h)^{-1}$ gesammelt werden; alle Flächen wurden vollständig abgedeckt, da die Gruppen zwischen 6 und 8 Personen umfassten. Am Ende wurden beide Beutel mit kleinen und großen Verpackungen gewogen und an die TU Berlin übergeben, um dort weiter charakterisiert zu werden.

Aufgrund der deutlichen Effizienzsteigerung der zweiten Aktion wird empfohlen, in künftigen Aktionen vier Rollen einzuführen: (1) Sammeln großer Verpackungen, (2) Datenerhebung/Dokumentation, (3) Sammeln kleiner Verpackungen und (4) Beutelmanagement/Trennkontrolle, wobei die letzte optional ist. Außerdem ist es empfehlenswert, die Flächen bzw. den Aufwand für die Teilnehmende weiter zu reduzieren. Obwohl die Festlegung der Flächen nicht das Ziel dieser Studie war, spielt sie eine zentrale Rolle und wäre daher der nächste Schritt für die Weiterentwicklung der Methode.

3.2 Ergebnisse der Methode zur Charakterisierung der Verpackungen aus den Litter-Stichproben

In beiden Aktionen wurden 15,8 kg Litter erfasst, davon 10,6 kg (67 %) Verpackungen mit insgesamt 3.687 Einzelteilen. Etwa 91 % der Verpackungen wogen weniger als 5 g, was die hohe Tendenz zu Littering leichter Verpackungen hinweist. Bei flüssigen Produkten enthielten 98 % der großen Verpackungen (> 40 mm) mit lesbarem Inhalt (n = 124) weniger als 500 ml, 60 % weniger als 250 ml. Für feste Produkte lagen 73 % (n = 116) unter 100 g. Dies deutet darauf hin, dass Verpackungen in Einzelportionen besonders litteringanfällig sind, da sie in der Regel direkt verzehrt und entsorgt werden. Dies betrifft vor allem Produkte, die oft unterwegs konsumiert werden. Diese Interpretation wird durch die Analyse der zehn am häufigsten gefundenen Marken gestützt: Drei Marken gehörten zu vorverpackten Lebensmitteln (Eis und Schokolade), zwei zu nicht pfandpflichtigen vorverpackten Getränken, drei zu Tabakprodukten und zwei zu Take-away-Lebensmitteln – überwiegend typische Unterwegs- und Direktverzehrprodukte.

Tabelle 1. Häufigste Kombinationen aus Verpackungsmaterial und -form für die großen Verpackungen

Verpackungsmaterial	**Verpackungsform**	**Anzahl**
Kunststoff	2D-Verpackungen	455
Papier, Pappe, Kartonage	Boxen	70
Beschichtetes Papier	Becher	61
Kunststoff	Verschlüsse	55
Metall	2D-Verpackungen	42

Für große Verpackungen (> 40 mm) waren 2D-Verpackungen (Folien, Folienbeutel) aus Kunststoff nach Anzahl am häufigsten (vgl. Tabelle 1), was mit den Ergebnissen von Van Caneghem et al. (2024) übereinstimmt. Ein möglicher Grund ist ihr geringes Gewicht, das eine Verwehung begünstigt. Diese Kategorie umfasste Getränkestandbodenbeutel und Eisverpackungen, die vermutlich aufgrund der Jahreszeit und ihres Charakters als Produkte für den Direktverzehr besonders häufig vorkamen (Top 5 Marken). Papierboxen folgten an zweiter Stelle, überwiegend durch Zigarettenverpackungen (66 % der Kategorie). Becher aus beschichtetem Papier belegten den dritten Platz, vor allem infolge von Take-away-Getränkebechern (87 % der Kategorie), die seit der EU-Einwegkunststoffrichtlinie nicht mehr aus Polystyrol bestehen dürfen. Abbildung 1 zeigt außerdem die häufigsten Produktgruppen der großen Verpackungen: „Lebensmittel – vorverpackt“, „Sonstiges“ (z. B. nicht identifizierbare Kunststoffstücke), „Tabak“ und „Getränke – vorverpackt“. In allen Gruppen dominierten 2D-Verpackungen.

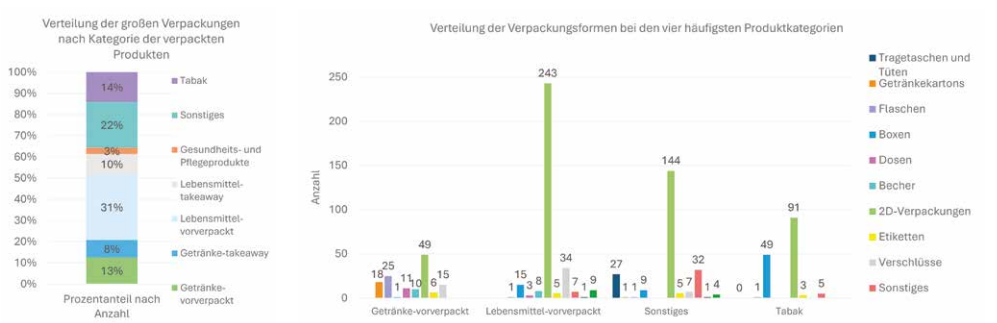


Abbildung 1. Verteilung der großen Verpackungen nach Kategorie der verpackten Produkte

Für kleine Verpackungen (≤ 40 mm) zeigen die Ergebnisse in Tabelle 2 eine deutlich höhere Menge an Metallverschlüssen im Vergleich zu Kunststoffverschlüssen. Dies könnte auf die Pflicht zu befestigten Kunststoffverschlüssen gemäß der EU-Einwegkunststoffrichtlinie zurückzuführen sein. Die hohe Menge an „Sonstiges“ ergab sich daraus, dass Eisstiele in diese Kategorie aufgenommen wurden – eine methodische Annahme. Zudem wurden einige kleine Papierfolien gefunden und ebenfalls als „Sonstiges“ klassifiziert. Für zukünftige Studien könnte es sich lohnen, hierfür eine eigene Kategorie einzuführen.

Tabelle 2. Anzahl und Masse pro Kategorie der kleinen Verpackungen

Verpackungsmaterial und -form	Anzahl	Masse (g)
Metallverschlüsse	1812	3550,1
Kunststoffverschlüsse	80	135,8
2D-Verpackungen aus Kunststoff/Verbunde	441	109,4
Sonstige	295	273,4

Auf Basis der Ergebnisse gelten insbesondere folgende Merkmalsausprägungen und -kombinationen als besonders litteringanfällig in der Region und im Zeitraum dieser Studie: verzehrfertige Lebensmittel und nicht pfandpflichtige Getränke in Einzelportionen, 2D-Verpackungen (Folien, Folienbeutel), Papierboxen für Tabakwaren und allgemein Tabakverpackungen, beschichtete Papierbecher für Take-away-Getränke sowie nicht befestigte Verschlüsse.

Diese Ergebnisse zeigen das Potenzial der Methode zur Identifikation häufig gelitterter Verpackungen sowie ihrer Merkmale und Merkmalsausprägungen. In zukünftigen Arbeiten sollte die Datenerhebung ausgeweitet werden, um repräsentative Ergebnisse für eine Stadt oder ein Land zu erzielen. Langfristiges Monitoring spielt dabei eine wichtige Rolle (Belke et al., 2020). Außerdem könnten in zukünftigen Studien weitere Verpackungselemente analysiert werden, zum Beispiel andere nicht befestigte Verpackungsbestandteile.

Literatur/Quellen

Aretoulaki, E., Ponis, S., National Technical University Athens, Plakas, G., National Technical University Athens, Agalianos, K., & National Technical University Athens. (2021). MARINE PLASTIC LITTERING: A REVIEW OF SOCIO ECONOMIC IMPACTS. *JOURNAL OF SUSTAINABILITY SCIENCE AND MANAGEMENT*, *16*(3), 276–300. https://doi.org/10.46754/jssm.2021.04.019

Belke, C., Kuhlmann, J., Schreckenberg, D., & Weishäuptl, J. (2020). *Status Quo, Handlungspotentiale, Instrumente und Maßnahmen zur Reduzierung des Litterings* (No. 69/2020; TEXTE). Umweltbundesamt.

European Commission. (2025). *Packaging waste: EU rules on packaging and packaging waste, including design and waste management*. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/packaging-waste_en

Horneber, D., Torres Gómez, A. M., Schneider, A.-L., Kowalski, L.-P., Wähning, I. M., & Rotter, V. S. (2025). Kreislaufwirtschaftsfähige Lebensmittelverpackungen – TEIL II: Leitfaden Einwegverpackungen. Zenodo. https://doi.org/10.5281/ZENODO.17600381

Kowalski, L.-P., Süßbauer, E., Almendrales, C., & Torres, A. (2025). *PublicSpaceLabs: Littering von Lebensmittelverpackungen in Berlin-Neukölln – Ergebnisbericht: Projekt: „Erweiterte Zertifizierung von Einweg- und Mehrweg-Verpackungen als Anreiz- und Steuerungsinstrument für die Schaffung von Innovationen zur Reduzierung von Kunststoffverpackungen entlang der Lebensmittelkette“*. Technische Universität Berlin. https://doi.org/10.14279/DEPOSITONCE-23502

Mehra, S., Sharma, K., Sharma, G., Singh, M., & Chadha, P. (2021). Sources, Fate, and Impact of Microplastics in Aquatic Environment. In A. Nuro (Hrsg.), *Emerging Contaminants*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.93805

MSFD Technical Group on Marine Litter (with Hanke, G., Walvoort, D., Ruiz-Orejón, L. F., Van Loon, W., Giorgetti, A., Molina-Jack, M. E., & Vinci, M.). (2025). *European coastline macro litter trends 2015 - 2021:*

Methodology development and trend results for the Marine Strategy Framework Directive (European Commission, Hrsg.). Publications Office. https://doi.org/10.2760/0752301

Torres Gómez, A. M., & Rotter, V. S. (2025). Litteringwahrscheinlichkeit als Kriterium zur Bewertung der Kreislaufwirtschaftsfähigkeit von Verpackungen. *MÜLL und ABFALL*, *11*, 4. https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2025.11.04

Van Caneghem, J., Vanstockem, J., & Verstegen, A. (2024). Functional classification and material characterization of plastic packaging in Flemish land litter to support effective reduction policies. *Environmental Advances*, *15*, 100505. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100505

VKU. (2020, März). *LITTERING: Kommunale Maßnahmen für Stadtsauberkeit*. Verband kommunaler Unternehmen e. V. (VKU). https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Verbandsseite/Publikationen/2020/VKU_Broschuere_Info-100_Einzel.pdf

Wilts, H., Reuter, R., Eckhardt, M., Kölmel, R., Birnstengel, B., Cayé, N., Schüler, K., Oexle, A., & Lammers, T. (2022). *Erarbeitung eines Kostenmodells für die Umsetzung von Artikel 8 Absatz 2 und 3 der EU Einwegkunststoffrichtlinie* (Texte | 132/2022, S. 222). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erarbeitung-eines-kostenmodells-fuer-die-umsetzung

Yuan, Z., Nag, R., & Cummins, E. (2022). Human health concerns regarding microplastics in the aquatic environment—From marine to food systems. *Science of The Total Environment*, *823*, 153730. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153730

Kontakt

Alejandra Torres, wissenschaftliche Mitarbeiterin
Technische Universität Berlin / Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie
Tel.-Nr. +49 (0) 30 314 77800
E-Mail: a.torres.gomez@tu-berlin.de
Homepage: https://www.tu.berlin/circulareconomy

KAPITEL II – POSTER

Elvira Akhmadieva, Kerstin Kuchta, Burak Büyükkaya

Unified Framework for Circular Economy in European Ports: Methodology and Application

***Abstract**: Ports play a central role in circular economy (CE) transitions by coordinating large material, energy and waste flows, yet harmonized and operational frameworks for assessing port circularity remain limited. This paper presents a unified CE assessment framework developed within the Interreg Circular Ports project, aligned with ISO 59020, UNECE guidelines and the Bellagio Principles, and adapted to the specific requirements of ports. The framework combines indicator-based assessment and a four-level maturity approach to enable consistent and transparent evaluation of circularity performance. Its applicability is demonstrated through an example assessment of ship- and port-generated waste management at the Port of Tallinn, illustrating how the framework can be implemented in practice.*

1 Introduction

Ports are one of the key actors in the transition toward a CE, handling large flows of materials and acting as interfaces between production, logistics and recycling systems, which positions them as strategic hubs for advancing CE practices (Langen & Sornn-Friese, 2019). However, the lack of unified assessment frameworks limits ports' ability to measure and systematically improve circularity, as existing approaches often focus on lower R-strategies, such as recycling, while overlooking higher-value actions, like refuse and rethink. These limitations are further increased by insufficient and inconsistent data across port operations, reducing the accuracy and usefulness of circularity assessments (Faut et al., 2023; Plekhanova et al., 2023).

To address these challenges, this work aims to provide a unified, step-by-step assessment framework that enables European ports to measure, compare and improve CE performance across the full range of R-strategies, while ensuring consistent and secure data collection and processing.

2 Methodology

The CE assessment framework has been developed based on three key normative documents and adapted to the goals of the project: ISO 59020 on Measuring and Assessing Circularity Performance (ISO, 2024), UNECE Guidelines for Measuring CE (UNECE, 2024) and Bellagio Declaration on CE Monitoring Principles (EEA, 2020).

Given the diversity of ports in terms of size, specialization and operational focus, direct comparisons between ports are limited. Therefore, the methodology emphasizes:

- Within-port analysis over time: tracking development and improvements, e.g., using two-year comparison intervals.
- Common and industry-specific indicators: applying shared circularity indicators across all ports while including additional metrics for specific industries.
- Identification of shared practices and potential synergies: revealing cross-country synergies by analyzing similarities and interactions between cases in different ports.

2.1 Boundary Settings

Boundary setting establishes what is assessed and under which conditions. This includes defining circular goals, identifying relevant port activities and determining spatial and temporal scopes. Resource inflows and outflows are mapped across material, energy and water systems, while socio-economic aspects are considered qualitatively. Although full life-cycle coverage is desirable, the framework allows for partial scopes where data limitations exist, provided that assumptions are documented transparently.

2.2 Indicator Selection and Data Acquisition

For assessing circularity performance, a unified set of indicators covering four dimensions has been developed, as shown in Table 1.

Table 1. CE indicators for port circularity assessment

Indicator Category	Sub-Indicator
1. CE as a Strategic Goal	1.1. Vision, Leadership & Funding 1.2. Circular Procurement 1.3. Stakeholder & Tenant Engagement
2. Circular Materials & Cargo Management	2.1. Circular Cargo Flows & Material Tracking 2.2. Industrial Symbiosis & Material Reuse
3. Circular Operations & Resource Management	3.1. Port-Generated Waste 3.2. Asset, Building & Land Management 3.3. Hazardous Materials & Waste Management 3.4. Logistics & Freight Systems
4. Energy, Water & Emissions	4.1. Energy & Emissions Management 4.2. Water Management

Table 2. Simplified excerpt example of CE maturity levels for sub-indicator 1.1

Indicator Category	Sub-Indicator	Level 0: Linear	Level 1: Aware	Level 2: Defined	Level 3: Integrated	Level 4: Systemic
1. CE as a Strategic Goal	1.1. Vision, Leadership & Funding	CE absent from strategy; no dedicated funding	CE mentioned but not strategic; only external-funded pilots	Formal CE strategy, CE manager/task force, internal funding	Measurable progress, CE-aligned CapEx ≥15%, growing investments	CE embedded in business model, CE-aligned CapEx ≥30%, third-party certification

Indicators should be selected in line with assessment goals and must satisfy RACER (Relevant, Accepted, Credible, Easy to monitor and Robust) criteria (EEA, 2020). Data acquisition follows a standardized pro-

cedure based on ISO 59020 with data protection and security principles based on GDPR and ISO 27001. In contrast to traditional scoring, this project also introduces four CE maturity levels (Table 2). Each indicator can be assessed against these levels, helping ports to determine their current position and identify the steps required to advance. The levels range from no CE integration to CE fully embedded in the port's business model.

2.3 Assessment and Reporting

Assessment and reporting translate circularity indicators into decision-relevant insights, while ensuring transparency, comparability and credibility of results. Circularity assessment follows a structured three-step approach adapted from ISO 59020:

- Review and interpretation of results: assessing whether circularity goals are met, how system boundaries and indicators perform and where data gaps or uncertainties affect interpretation;
- Evaluation of value creation and impacts: considering environmental, economic and social implications of circular actions and, if necessary, complementing circularity metrics with established tools such as life cycle assessment or cost–benefit analysis;
- Consultation of interested parties: ensuring that results support internal decision-making and are meaningful for external stakeholders, like service providers and authorities.

3 Results

The circularity assessment was applied to ship- and passenger-generated waste management at the Port of Tallinn for the year 2024, with the objective of evaluating current performance and identifying improvement potentials. The system boundary covered waste generation and treatment processes across all major harbours operated by the Port of Tallinn Group, using audited data from the 2024 Annual Report (Tallinna Sadam Group, 2025) and project-specific datasets.

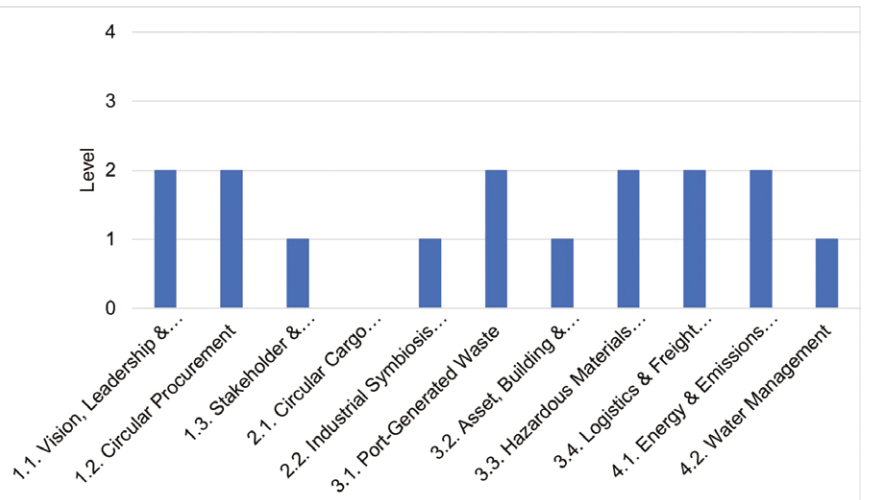


Figure 1. Circular economy maturity assessment of the Port of Tallinn for the year 2024

Results indicate a medium circularity maturity, with most indicators positioned at Level 1–2. Strongest performance is observed in port-generated waste management, hazardous waste handling, energy and emissions management, supported by detailed data and established operational practices. In contrast, systemic and governance-related indicators show lower maturity. Circular cargo flows are not yet distinguished from conventional cargo, resulting in a Level 0 score for material tracking. Water management remains at Level 1, with quantified baselines but limited improvement targets.

Overall, the Port of Tallinn demonstrates solid progress in operational circular economy practices, while further work on systemic integration and data availability will be addressed within the Circular Ports project.

Acknowledgement

This work is carried out and funded within the Interreg Baltic Sea Region project Circular Ports.

References

EEA. (2020). *Bellagio Declaration on Circular Economy Monitoring Principles.* https://epanet.eea.europa.eu/reports-letters/reports-and-letters/bellagio-declaration.pdf

Faut, L., Soyeur, F., Haezendonck, E., Dooms, M., & de Langen, P. W. (2023). Ensuring circular strategy implementation: The development of circular economy indicators for ports. *Maritime Transport Research, 4,* 100087. https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100087

ISO. (2024). *ISO 59020:2024 – Circular economy – Measuring and assessing circularity performance.* https://www.iso.org/standard/80650.html

Langen, P. & Sornn-Friese, H. (2019). Ports and the Circular Economy. *Green Ports. Inland and Seaside Sustainable Transportation Strategies,* 85–108. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814054-3.00005-0

Plekhanova, E., Reicher, C., Tawil, M., & Hein, C. (2023). Circular economy as an approach towards sustainable development of port cities. *PORTUSplus, 15.* https://portusplus.org/index.php/pp/article/view/285

Tallinna Sadam Group. (2025). *Group annual report 2024. Port of Tallinn.* https://www.ts.ee/wp-content/uploads/2025/04/Tallinna_Sadam_Group-_Annual_Report_2024.pdf

UNECE. (2024). *Guidelines for Measuring Circular Economy.* United Nations Economic Commission for Europe. https://unece.org/sites/default/files/2024-02/ECECESSTAT20235_WEB.pdf

Contakt
Elvira Akhmadieva, wissenschaftliche Mitarbeiterin
Universität / Institution: Institute für Circular Resources Engineering und Management (CREM),
Technische Universität Hamburg
Tel.-Nr.: 040306012865
E-Mail: elvira.akhmadieva@tuhh.de
Homepage: https://www.tuhh.de/crem/willkommen

Malika Arstan

Digitaler Produktpass: Evaluierung von Modellen zur Zugriffsverwaltung

***Abstract**: Der Digitale Produktpass (DPP) gilt als zentrales Instrument zur Förderung von Transparenz und Kreislaufwirtschaft im Rahmen der europäischen Nachhaltigkeitsregulierung. Gleichzeitig stellt die sichere und praktikable Zugriffsverwaltung auf sensible Produkt- und Unternehmensdaten eine wesentliche Herausforderung für die Umsetzung des DPP dar. Der vorliegende Beitrag untersucht, welche Modelle der Zugriffsverwaltung sich für den Einsatz im DPP besonders eignen.*

Methodisch basiert die Analyse auf einem Mixed-Methods-Ansatz, bestehend aus einer systematischen Literaturrecherche, der Untersuchung ausgewählter DPP-naher Fallstudien, einer Multi-Kriterien-Analyse sowie einer empirischen Validierung durch Experteninterviews und eine Nutzerumfrage. Die Ergebnisse zeigen, dass reine Zugriffskontrollmodelle den komplexen Anforderungen des DPP nicht gerecht werden. Besonders geeignet erweisen sich hybride Zugriffskonzepte, die rollenbasierte Strukturen mit attribut- oder policy-basierten Mechanismen kombinieren. Diese bieten eine ausgewogene Balance zwischen Sicherheit, Flexibilität, Benutzerfreundlichkeit und praktischer Umsetzbarkeit. Der Beitrag leitet daraus praxisorientierte Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Zugriffsverwaltung im Digitalen Produktpass ab.

1 Einleitung

Die zunehmende Bedeutung von Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft in Industrie und Gesellschaft spiegelt sich in einer Vielzahl regulatorischer Initiativen der Europäischen Union wider, insbesondere im Europäischen Green Deal und der darauf aufbauenden Ökodesign-Verordnung (ESPR, 2024/2024/1781), die die Produktlebenszyklen transparent machen und die Ressourceneffizienz steigern sollen, um die Kreisläufe zu schließen. Der Digitale Produktpass (DPP) spielt dabei eine wesentliche Rolle und stellt produktspezifische Informationen über den gesamten Lebenszyklus digital, standardisiert und maschinenlesbar zur Verfügung (Barwasser et al., 2024; Jensen-Abieva et al., 2025; A. Zhang & Seuring, 2024). Der DPP eröffnet erhebliche Potenziale durch verbesserte Sortie- und Recyclingprozesse sowie höhere Transparenz und Effizienz in den Lieferketten (Jensen et al., 2023; Trienens et al., 2024). Es bestehen zugleich Herausforderungen, da sensible Unternehmensdaten involviert sind, die unkontrolliert offen gelegt werden und zu Wettbewerbsnachteilen, Datenmissbrauch oder Rechtsunsicherheit führen können (D'Hauwers & Bourgeus, 2024; Ducuing & Reich, 2023). Die zentrale Schwierigkeit besteht daher in der Balance zwischen regulatorisch geforderter Transparenz und dem Schutz geschäftskritischer Informationen (Ruismäki et al., 2025). Die regulatorischen Texte legen keine detaillierten Lösungskomponenten für den Benutzerzugang und die Verifizierung fest, sondern fokussieren sich auf konzeptionelle Anforderungen (Fai Wan & Jiang, 2025). Trotz Initiativen im Bereich des DPP fehlen standardisierte und praxistaugliche Konzepte zur Zugriffsverwaltung. Insbesondere unklare oder unzureichende Regelungen zur Zugriffskontrolle werden als wesentliches Hemmnis für die Akzeptanz und Skalierung von DPP-Systemen identifiziert (Christensen et al., 2025; Lopes & Barata, 2024). Ohne eine verlässliche und durchsetzbare Zugriffsverwaltung besteht die Gefahr, dass Unternehmen relevante Daten nicht bereitstellen, wodurch die Umsetzung regulatorischer Nachhaltigkeitsziele beeinträchtigt wird. Die Arbeit untersucht und vergleicht vor diesem Hintergrund daher

die Zugriffsverwaltungsmodelle für den Digitalen Produktpass unter Berücksichtigung der ausgewählten technischen und nachhaltigkeitsbezogenen Bewertungskriterien. Die Masterarbeit ist das Ergebnis einer Kooperation zwischen dem Umwelt-Campus Birkenfeld der Hochschule Trier und dem Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik (ISST).

2 Methodik

Zur Evaluierung von Zugriffsverwaltungsmodellen für den DPP wird ein Mixed-Methods-Ansatz angewendet, der qualitative und quantitative Methoden kombiniert (Kuckartz, 2014). So werden Modelle sowohl systematisch vergleichbar als auch an der Realität angepasst. Zunächst werden relevante Publikationen, regulatorische Dokumente und technische Berichte der Jahre 2021-2025 zu DPPs und Zugriffskontrollmodellen ausgewertet. Die Einordnung des Forschungsstands dient der Auswahl geeigneter Modelle für die weitere Analyse. Ergänzend werden ausgewählte Fallstudien untersucht, darunter Catena-X (Catena-X, 2025), CIRPASS (CIRPASS, 2024), CIRPASS-2 (CIRPASS-2, 2025) und The Battery Pass (The Battery Pass consortium, 2025). Auf Basis der Analyse erfolgt die Entwicklung der Bewertungsgrundsätze für den Vergleich der Zugriffsmodelle. Die Kriterien, die bei der Evaluierung berücksichtigt werden, umfassen Sicherheit, Adaptierbarkeit, technologische Reife, Benutzerfreundlichkeit, Energieeffizienz und die TCO.

Die identifizierten Zugriffskontrollmodelle umfassen eigentümerbasierte Verfahren wie *Delegation-Based Access Control* (DAC) (Gupta et al., 2022; Hu et al., 2006), zentral gesteuerte Modelle mit festen oder kontextabhängigen Richtlinien wie *Mandatory Access Control* (MAC), *Role-Based Access Control* (RBAC), *Attribute-Based Access Control (*ABAC) und *Policy-Based Access Control* (PBAC) (Colombo & Ferrari, 2019; Golightly et al., 2023; Hu et al., 2006; Hu et al., 2013; Omolola et al., 2019; Yaqub et al., 2025), sowie dezentrale, nutzer- oder technologiegetriebene Ansätze wie *User-Managed Access (*UMA), Blockchain-basierte Zugriffskontrolle (Punia et al., 2024; Taherdoost, 2023), *Asset Administration Shell (*AAS) (Gleich et al., 2024; Kühn et al., 2025), und *Knowledge Graphs (European Council for Computing in Construction, 2023).* Diese Modelle werden mithilfe einer Multi-Kriterien-Analyse (Belton & Stewart, 2010) verglichen und bewertet. Zur Gewichtung der Bewertungskriterien werden leitfadengestützte qualitative Experteninterviews durchgeführt, wobei die Befragung der Fachpersonen aus den Bereichen IT-Sicherheit, Nachhaltigkeits- und Produktdatenmanagement mit praktischer Erfahrung mit datengetriebenen Systemen für DPP-nahen Anwendungen erfolgt. Die Interviews werden transkribiert und ausgewertet, um die relative Bedeutung der einzelnen Kriterien aus der anwendungsorientierten Sicht zu erfassen. Die Ergebnisse der qualitativen Auswertung werden anschließend in quantitative Gewichtungsfaktoren überführt.

Zur Validierung der Ergebnisse wird eine Online-Umfrage durchgeführt. Sie erfasst Aspekte der Benutzerfreundlichkeit, Verständlichkeit und Akzeptanz der untersuchten Zugriffsmodelle aus Anwendersicht. Die Umfrageergebnisse werden quantitativ erhoben, ausgewertet und mit den Ergebnissen einer Multi-Kriterien-Analyse abgeglichen. Die Kombination aus Literaturarbeit, Fallstudienanalyse, Expertenbewertung und Nutzerumfrage ermöglicht eine Bewertung der Zugriffsverwaltungsmodelle. Darauf basierend werden die Modelle analysiert und Empfehlungen abgeleitet.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Literatur- und Fallstudienanalyse

Die Analyse der bestehenden Literatur sowie einer Auswahl von Fallstudien ergibt, dass gegenwärtige Implementierungen des Digitalen Produktpasses zumeist hybride Zugriffe nutzen (Z. Zhang et al., 2026). Kombination mehrerer Zugriffskontrollmodelle scheint in der Praxis vorgezogen zu sein, um heterogenen Anforderungen entlang der Wertschöpfungskette gerecht zu werden (Catena-X, 2025; CIRPASS, 2024; Pellegrini et al., 2023; Wautelet & Ayed, 2024).

In den untersuchten Fallstudien strukturieren vordefinierte Rollen (z. B. Hersteller, Zulieferer, Recycler, Behörden) den Datenzugang, wobei Zugangsregeln für DPP-Systeme künftig noch ergänzt und festgelegt werden sollten (CIRPASS, 2024; CIRPASS-2, 2025), wie Attribute, Kontextinformationen und Regeln zur Datenverwendung. Föderierte Datenraumarchitekturen, die die Aspekte der Datensouveränität, Interoperabilität und regulatorischen Konformität fördern, finden in diesem Zusammenhang Relevanz (Jensen et al., 2023). Die identifizierten Herausforderungen umfassen insbesondere Skalierbarkeit, Benutzerfreundlichkeit sowie den organisatorischen und technischen Implementierungsaufwand (Christensen et al., 2025). Die Zugriffskontrolle im DPP ist folglich nicht als isolierte technische Funktion, sondern als Bestandteil einer übergeordneten Daten- und Governance-Architektur zu verstehen (D'Hauwers & Bourgeus, 2024; Trienens et al., 2024).

3.2 Ergebnisse der Multi-Kriterien-Analyse

Die Ergebnisse der Multi-Kriterien-Analyse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Zugriffskontrollmodellen. RBAC erreicht hohe Punktzahlen in Benutzerfreundlichkeit, technologischer Reife und geringer Implementierungskosten und gilt als etabliert. ABAC und PBAC erzielen hohe Punktwerte in den Kategorien Sicherheit und Flexibilität, eignen sich für dynamische DPP-Ökosysteme. Der erhöhte Implementierungs- und Verwaltungsaufwand wirkt sich jedoch negativ auf Benutzerfreundlichkeit und TCO aus. Blockchain-basierte Konzepte schneiden in Transparenz und Nachvollziehbarkeit gut ab. In der Gesamtbewertung erreichen hybride Konzepte die höchsten Werte. Die Kombination rollenbasierter Grundstrukturen mit attribut- oder policy-basierten Erweiterungen zeigt eine ausgewogene Performance und stellt einen praktikablen Kompromiss dar.

3.3 Ergebnisse der empirischen Validierung

Die Auswertung der Experteninterviews bestätigt die Ergebnisse der Bewertung. Die Fachleute weisen darauf hin, dass starre Zugriffskonzepte den Anforderungen des DPP nicht entsprechen. Stattdessen werden erweiterbare Zugriffskonzepte angewendet.

Besonders hervorgehoben wird die Bedeutung von Schnittstellen und Rollenmodellen sowie schrittweisen Einführungspfaden. Hybride Zugriffskonzepte gelten als realistischer, da sie bestehende Rollenlogiken nutzen und gleichzeitig eine Erweiterung um kontextbasierte Mechanismen erlauben. Kosten, Implementierungsaufwand und organisatorische Komplexität sind wesentliche Faktoren, die die Entscheidung beeinflussen.

Die Ergebnisse der Online-Umfrage zeigen, dass die Benutzerfreundlichkeit und Verständlichkeit von Zugriffskonzepten wesentlich zur Akzeptanz dieser Konzepte beitragen. Technisch leistungsfähige, aber komplexe Modelle sind schwer nachvollziehbar. Rollenbasierte und hybride Ansätze gelten als intuitiver und praxisnäher.

4 Diskussion

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Zugriffsverwaltung zentral für die Umsetzung des DPP ist und kein einzelnes Zugriffskontrollmodell alle Anforderungen des DPP vollständig erfüllt. Vielmehr erfordert der DPP einen Ausgleich zwischen Transparenz, Datensicherheit, Nachhaltigkeit und praktischer Umsetzbarkeit. Die Auswertung hat ergeben, dass hybride Zugriffskonzepte derzeit am besten auf die Zielkonflikte reagieren, da sie schrittweise von etablierten Strukturen um fein granulare, kontextabhängige Zugriffskontrollvorgaben erweiterbar sind. Insbesondere in föderierten Datenraumarchitekturen zeigen hybride Modelle ein hohes Maß an Anschlussfähigkeit an bestehende Industrie- und Standardisierungsinitiativen. Zugleich verdeutlichen die Ergebnisse, dass technische Leistungsfähigkeit des Zugriffsmodells allein nicht ausreicht, um Akzeptanz zu gewährleisten. Es sind auch die Benutzerfreundlichkeit und die organisatorische Umsetzbarkeit zu berücksichtigen. Modelle mit hoher Komplexität stoßen insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen auf Akzeptanzprobleme. Damit wird deutlich, dass nachhaltige DPP-Architekturen nicht nur sicher, sondern auch wirtschaftlich tragfähig und sozial anschlussfähig gestaltet sein sollten.

5 Fazit und Ausblick

Der Beitrag verdeutlicht, wie entscheidend die Ausgestaltung der Zugriffsverwaltung für die Akzeptanz und Wirksamkeit des DPP ist. Die Ergebnisse zeigen, dass hybride Zugriffskonzepte derzeit den besten Kompromiss zwischen Transparenz, Schutz und Umsetzbarkeit bieten.

DPP-Zugriffskonzepte sollten modular aufgebaut und Rollenmodelle schrittweise um attribut- oder policy-basierte Mechanismen erweitert werden. Standardisierte Schnittstellen, offene Architekturen und Zugriffsvorlagen können den Aufwand und die Kosten reduzieren, insbesondere für KMU.

Es ist zusätzliche Forschung zu Energieeffizienz, Skalierbarkeit sowie empirische Untersuchung realer DPP-Pilotanwendungen erforderlich. Darüber hinaus sind langfristig ausgelegte Governance, Weiterentwicklung interoperabler Standards und nachhaltige Zugriffsverwaltung von entscheidender Bedeutung für die Umsetzung des DPP und die Erreichung europäischer Kreislaufwirtschaftsziele.

Danksagung

Die zugrunde liegende Arbeit entstand im Rahmen der Masterthesis an der *Hochschule Trier* in Kooperation mit dem *FraunhoferInstitut für Software und Systemtechnik (ISST)*.

Literatur/Quellen

Barwasser, A., Schuseil, F., Werner, A., Jung, M., & Zimmermann, N. (2024). The Digital Product Passport: Scenario-based Recommendations for the Manufacturing Industry. *IFAC-PapersOnLine*, *58*(19), 1186–1191. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.097

The Battery Pass consortium. (2025). Battery Passport Technical Guidance: Executive Summary. The Battery Pass consortium. https://thebatterypass.eu/assets/images/technical-guidance/pdf/20240318_BatteryPassport_Tech_Guidance_executive_summary.pdf

Belton, V., & Stewart, T. (2010). Problem Structuring and Multiple Criteria Decision Analysis. In M. Ehrgott, J. R. Figueira, & S. Greco (Eds.), International Series in Operations Research & Management Science: Vol. 142. Trends in Multiple Criteria Decision Analysis (Vol. 142, pp. 209–239). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5904-1_8

Catena-X. (2025). Collaboration & roles in Catena-X: An Overview. Catena-X. https://catena-x.net/ecosystem/collaboration-roles/

Christensen, A., Stingl, V., Omair, M., & Wæhrens, B. V. (2025). Digital Product Passport in support of Data-Driven End-of-Use Strategies–a systems design perspective. Cleaner Environmental Systems, 1*9*, 100354. https://doi.org/10.1016/j.cesys.2025.100354

CIRPASS. (2024). Project Results. https://cirpassproject.eu/project-results/

CIRPASS-2. (2025). CIRPASS-2: Main Page. CIRPASS-2. https://cirpass2.eu/

Colombo, P., & Ferrari, E. (2019). Access control technologies for Big Data management systems: literature review and future trends. Cybersecurity, 2(1). https://doi.org/10.1186/s42400-018-0020-9

D'Hauwers, R., & Bourgeus, A. (2024). Empowering Data Sovereignty: Strategies of Data Intermediaries in Data Ecosystems. In A. Pucihar, M. K. Bortnar, & S. Blatnik (Eds.), Resilience Through Digital Innovation: Enabling the Twin Transition (pp. 243–258). University of Maribor Press. https://doi.org/10.18690/um.fov.4.2024.13

Ducuing, C., & Reich, R. H. (2023). Data governance: Digital product passports as a case study. Competition and Regulation in Network Industries, 24(1), 3–23. https://doi.org/10.1177/17835917231152799

European Council for Computing in Construction (Ed.) (2023). Circular Economy in The Built Environment: A Framework for Implementing Digital Product Passports With Knowledge Graphs. Proceedings of the 2023 European Conference on Computing in Construction and the 40th International CIB W78 Conference. Computing in Construction. European Council for Computing in Construction.

Fai Wan, P. K., & Jiang, S. (2025). Enabling a dynamic information flow in digital product passports during product use phase: A literature review and proposed framework. Sustainable Production and Consumption, 54, 362–374. https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.01.014

Gleich, K., Behrendt, S., Hörger, M., Benfer, M., & Lanza, G. (2024). An Asset Administration Shell-Based Digital Product Passport as a Gaia-X Service. Procedia CIRP, 127, 224–229. https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.07.039

Golightly, L., Modesti, P., Garcia, R., & Chang, V. (2023). Securing distributed systems: A survey on access control techniques for cloud, blockchain, IoT and SDN. *Cyber Security and Applications*, *1*, 100015. https://doi.org/10.1016/j.csa.2023.100015

Gupta, M., Bhatt, S., Alshehri, A. H., & Sandhu, R. (2022). Access Control Models and Architectures For IoT and Cyber Physical Systems (1st ed.). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81089-4

Hu, V. C., Ferraiolo, D. F., & Kuhn, D. R. (2006). Assessment of access control systems: Interagency Report 7316. National Institute of Standards and Technology. https://csrc.nist.rip/external/nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir7316.pdf

Hu, V. C., Ferraiolo, D., Kuhn, R., Friedman, A., Lang, A., Cogdell, M., Schnitzer, A., Sandlin, K., Miller, R., & Scarfone, K. (2013). Guide to Attribute Based Access Control (ABAC): Definition and Considerations [NIST Special Publication 800-162]. National Institute of Standards and Technology. https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=cab698a5b0949aa7acd0858b55352c5df0a2c2fb

Jensen, S. F., Kristensen, J. H., Adamsen, S., Christensen, A., & Waehrens, B. V. (2023). Digital product passports for a circular economy: Data needs for product life cycle decision-making. Sustainable Production and Consumption, 37, 242–255. https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.02.021

Jensen-Abieva, E., Roedding, T., Mühlenen, A., & Alcayaga, A. (2025). The Economics of Digital Product Passports — From Materials to Market. CircularTech. https://www.researchgate.net/publication/392364040_The_Economics_of_Digital_Product_Passports_-_From_Materials_to_Market

Kuckartz, U. (2014). Mixed Methods. Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-531-93267-5

Kühn, M., Baumann, M., Volz, F., & Stojanovic, L. (2025). Digital Product Passport Design Supporting the Circular Economy Based on the Asset Administration Shell. Sustainability, 17(3), 969. https://doi.org/10.3390/su17030969

Lopes, C., & Barata, J. (2024). Digital Product Passport: A Review and Research Agenda. Procedia Computer *Science*, *246*, 981–990. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.09.517

Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542, and repealing Directive 2009/125/EC (2024 & rev. 2024/1781). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1781

Omolola, O., More, S., Faslija, E., Wagner, G., & Alber, L. (2019). Policy-based Access Control for the IoT and Smart Cities. Open Identity Summit 2019. https://www.researchgate.net/publication/332442466_Policy-based_Access_Control_for_the_IoT_and_Smart_Cities

Pellegrini, T., Neumaier, S., Havur, G., Zahra, M., Wagner-Havlicek, C., Grossberger, H., Kaltenbrunner, L., & Schneidegruber, M. (2023). DPP4ALL: A Digital Product Passport for All. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. https://iktderzukunft.at/de/publikationen/dpp4all-a-digital-product-passport-for-all.php

Punia, A., Gulia, P., Gill, N. S., Ibeke, E., Iwendi, C., & Shukla, P. K. (2024). A systematic review on blockchain-based access control systems in cloud environment. Journal of Cloud Computing, 13(1), Article 146, 1–37. https://doi.org/10.1186/s13677-024-00697-7

Ruismäki, W., Castell-Rüdenhausen, M. zu, Pohjalainen, E., & Wahlström, M. (2025). Stakeholder perspectives on digital product passports for construction products. Cleaner Logistics and Supply Chain, 17, 100275. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100275

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process: What it is and how it is used. Mathematical Modelling, 9(3-5), 161–176. https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8

Taherdoost, H. (2023). Smart Contracts in Blockchain Technology: A Critical Review. Information, 14(2), 117. https://doi.org/10.3390/info14020117

Trienens, M., Hovemann, A., & Schreiner, N. (2024). Unveiling The Potential Of The Digital Product Passport For The Development Of Sustainable Products: A Systematic Literature Review. R&D Management Conference 2024 “Transforming industries through technology” 17-19 June 2024. https://www.researchgate.net/profile/Malte-Trienens/publication/383423319_Unveiling_The_Potential_Of_The_Digital_Product_Passport_For_The_Development_Of_Sustainable_Products_-A_Systematic_Literature_Review/links/66cc9e1575613475fe7d1c30/Unveiling-The-Potential-Of-The-Digital-Product-Passport-For-The-Development-Of-Sustainable-Products-A-Systematic-Literature-Review.pdf

Wautelet, T., & Ayed, A.-C. (2024). Exploring possible Digital Product Passport (DPP) use cases in battery, electronics and textile value chains. CIRPASS Consortium.

Yaqub, N., Zhang, J., Khalid, M. I., Wang, W., Helfert, M., Ahmed, M., & Kim, J. (2025). Blockchain enabled policy-based access control mechanism to restrict unauthorized access to electronic health records. PeerJ. Computer Science, 11, e2647. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2647

Zhang, A., & Seuring, S. (2024). Digital product passport for sustainable and circular supply chain management: a structured review of use cases. International Journal of Logistics Research and Applications, 27(12), 2513–2540. https://doi.org/10.1080/13675567.2024.2374256

Zhang, Z., Gu, J., Li, R., Lian, W., Ma, C., & Tian, J. (2026). Bridging digital and green transitions: A literature review of digital product passport systems. Renewable an*d Sustainable Energy Reviews*, *228*, 116600. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116600

Kontakt

Malika Arstan, M.A., wissenschaftliche Mitarbeiterin
Universität Kassel, Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik
Umwelt-Campus Birkenfeld, Hochschule Trier / Fraunhofer ISST (ehemalige Masterandin)
Tel.-Nr.: *+49 561 804-3984*
E-Mail: *malika.arstan@uni-kassel.de*
Homepage: www.uni-kassel.de/go/RMAT/

Simon Ballüer, Yuwei Chang, Robert-B. Wudtke

Optimierung der Sperrmüllverwertung zur Sicherung von sekundären Wertstoffen

***Abstract**: Im Jahr 2023 lag die bundesweite Verwertungsquote für Sperrmüll bei etwa 98 %, wobei der Anteil der stofflichen Verwertung rund 57 % betrug (Statistisches Bundesamt, 2023). Im Vergleich zu anderen Siedlungsabfällen bestehen beim Sperrmüll weiterhin Verbesserungspotenziale, insbesondere bei Materialien mit komplexem Aufbau. Im Fokus des vorgestellten Projekts steht die Optimierung der Sperrmüllverwertung in Thüringen. Hierzu pilotiert die Hochschule Nordhausen die Erfassungsstruktur für die getrennte Wertstoffsammlung in Zusammenarbeit mit dem zuständigen Landkreis Nordhausen und dem Sperrmüllentsorgungsbeauftragten, den Südharzwerken Nordhausen, um die Ergebnisse schließlich auf Landesebene zu übertragen. Ziel ist die effiziente Erfassung sowie die Aufbereitung und Trennung wichtiger Sperrmüllfraktionen, wie Holz, Metalle, Kunststoffe und Textilien, um die Recyclingquote zu erhöhen. Darüber hinaus werden unterschiedliche Aufbereitungsverfahren untersucht, um sie für die Verwendung beim Abfallstrom Sperrmüll zu testen und ggf. anzupassen und so zur verbesserten Verwertung beizutragen. Die Projektergebnisse tragen maßgeblich zur Schonung natürlicher Ressourcen, zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft und zur Dekarbonisierung bei. Zugleich unterstützt das Projekt eine nachhaltige regionale Entwicklung.*

1 Einleitung

Im Sperrmüll sind zahlreiche Sekundärrohstoffe, wie Holz, Kunststoffe, Metalle, Textilien und Glas enthalten. Die große Materialvielfalt und der hohe Anteil an Verbundstoffen erschweren eine effiziente Sortierung und damit ein hochwertiges Recycling von Sperrmüll. Daher wird Sperrmüll bislang nur in begrenztem Umfang im Sinne der Kreislaufwirtschaft einer gezielten Aufbereitung und Verwertung zugeführt. Im Jahr 2024 fielen in Thüringen rund 80.000 Tonnen Sperrmüll an, was einem Pro-Kopf-Aufkommen von etwa 38 kg/a entsprach. Davon wurden 15 % stofflich verwertet, während 65 % thermisch behandelt und 20 % beseitigt wurden (Abfallbilanz Thüringen, 2024).

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Einsatz innovativer Technologien zur Erschließung sekundärer Rohstoffquellen in Thüringen“ (SeRo.inTech) wird an der Hochschule Nordhausen das Optimierungspotenzial der Sperrmüllverwertung in Thüringen untersucht. Im Fokus der Analysen stehen eine Kaskade von Verfahrensschritten sowie die Erprobung einer modularen Sortieranlage. Ziel ist es, eine Erhöhung der Sortierquoten von Sperrmüll zu erreichen und spezifische Sammelstrategien zu entwickeln, um hochwertige Sekundärrohstoffe für eine nachhaltige stoffliche Nutzung bereitzustellen. Ein weiterer zentraler Schwerpunkt ist die Identifikation und Bewertung von Dekarbonisierungspotenzialen für einzelne Materialien aus dem Sperrmüll.

2 Methodik

Das Forschungsvorhaben gliedert sich in sechs Schwerpunktthemen: Erfassung, Mobilisierung, Aufbereitung, Verwertung, ökonomische und rechtliche Betrachtung sowie Dekarbonisierung. Zu Beginn wurden allgemeine Kennzahlen des Stoffstroms sowohl für den Freistaat Thüringen als auch im bundesweiten

Kontext untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse aus einer Umfrage zur Sperrmüllerfassung mit den 20 zuständigen öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern (örE) in Thüringen sowie weiteren Kennzahlen (Abfallzusammensetzung, Abfallaufkommen, etc.) bildeten die Grundlage für die anschließenden Arbeiten im Bereich der Mobilisierung. Da Altholz als die größte Fraktion im Sperrmüll festgestellt wurde, bestand das Ziel diesen Stoffstrom durch eine getrennte Sammlung zu separieren (Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2017). In Kooperation mit dem Landkreis Nordhausen und den Südharzwerken Nordhausen wurden Pilotversuche zur separaten Erfassung von Altholz aus dem Sperrmüll durchgeführt.

Im Bereich der anschließenden Aufbereitung wurden u. a. technische Großversuche mit Sperrmüll aus der kommunalen Sammlung sowie verfahrenstechnische Untersuchungen zur Sortierfähigkeit der feinkörnigen Mischfraktion (Korngröße < 15 mm) ausgeführt. Die Aufbereitungsergebnisse wurden hinsichtlich des Wertstoffpotentials, der Sortierreinheit und des Energieverbrauchs der Sperrmüllproben aus der herkömmlichen Erfassung und der separaten Wertstofferfassung mit reduziertem Holzanteil miteinander verglichen.

Die anschließende Verwertung des Altholzes konzentrierte sich auf die Pyrolyse, da für den Fall, dass ein stoffliches Recycling von Altholz aus dem Sperrmüll nicht möglich ist, das Verfahren im Sinne der Altholzverordnung (AltholzV) eine geeignete Option der stofflichen Verwertung darstellt (Altholzverordnung – AltholzV, 2002). Die Themen Aufbereitung und Verwertung wurden durch die Analyse ökonomischer und rechtlicher Rahmenbedingungen begleitet. Entscheidend für eine praxisnahe Forschung und die spätere Umsetzung der Projektergebnisse sind sowohl wirtschaftliche Vorteile als auch die Einhaltung relevanter gesetzlicher Vorgaben. Maßgeblich für die Betrachtungen innerhalb des Forschungsvorhabens waren das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), die AltholzV sowie das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG). Insbesondere das BEHG spielt im Kontext der Dekarbonisierung eine zentrale Rolle.

Abschließend wird im Projekt eine ökobilanzielle Betrachtung entlang der Wertschöpfungskette durchgeführt. Geplant sind vergleichende Analysen der herkömmlichen Sperrmüllsammlung kombiniert mit einer anschließenden thermischen Verwertung sowie der separaten Sperrmüllsammlung kombiniert mit einer stoffstromspezifischen Aufbereitung.

3 Ergebnis

Die Analyse der stofflichen Zusammensetzung des Sperrmülls im Landkreis Nordhausen weist auf ein erhebliches Wertstoffpotenzial hin, da allein die Altholzfraktion rund 50 M.-% umfasst. Eine separate Erfassung von Altholz über Bring- und Holsysteme findet in Thüringen derzeit lediglich in zwei Landkreisen statt. Fünf Landkreise erfassen das Altholz separat über Bring- oder Holsysteme für eine nachfolgende energetische oder stoffliche Verwertung. Die Auswirkungen der steigenden CO_2-Bepreisung auf die Entsorgungsgebühren betreffen alle örE, wobei die Erfassungs- und Entsorgungskosten künftig weiter steigen und auf die Grundgebühr umgelegt werden. Laut dem BEHG hängen die Preise vom Biomasseanteil sowie dem Emissionsfaktor der jeweiligen Abfallart ab (BEHG, 2021). Altholz gilt je nach Klasse mit verschiedenen Biomassenanteilen als klimaneutral und verursacht daher niedrigere CO_2-Kosten, während unsortierter Sperrmüll aufgrund seines höheren fossilen Anteils ca. sieben bis zehn Mal kostenintensiver ist. Um diesem Trend entgegenzuwirken, ist die separate Wertstofferfassung und verstärkte stoffliche Verwertung des Altholzes aus dem Sperrmüll eine Option. Dies entspricht auch den Anforderungen an die Sperrmüllsammlung nach dem novellierten Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger sind verpflichtet, Sperrmüll so zu sammeln, dass die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling der einzelnen Bestandteile ermöglicht werden (KrWG, 2012). Die Daten des Pilotversuchs zur separaten Sperrmüllholzabholung in Zusammenarbeit mit dem Landkreis Nordhausen und den Südharzwerken Nord-

hausen zeigen, dass die Kosten der Sperrmüllentsorgung durch ein angepasstes Logistikkonzept relativ stabil bleiben können.

Ein zentrales Ziel war es, für kommunal anfallenden Sperrmüll eine industrielle Sortierung im Forschungskontext zu realisieren, was durch den Einsatz einer modularen Sortieranlage am Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe (ThIWert) ermöglicht wurde. Der modulare Aufbau der Anlage erlaubt eine flexible Anpassung der Sortierung für unterschiedliche Wertstoffe. Untersucht wurden zwei Sperrmüllproben, eine gesamte Probe und eine holzreduzierte Probe. Die Aufbereitungsergebnisse des ersten Großversuchs mit einer ca. acht Tonnen umfassenden Sperrmüllprobe aus der kommunalen Sammlung (gesamte Sperrmüllprobe) verdeutlichen das große Wertstoffpotenzial. Es konnten ca. 7 M.-% Fe-Metalle und ca. 1 M.-% NE-Metalle mit einer Reinheit von etwa 99 % separiert werden. Die Holzfraktion im Korngrößenbereich von 15 bis 150 mm umfasste ca. 30 M.-% der aufbereiteten Sperrmüllfraktion. Die Holzreinheit lag nach einem ersten optischen Sortierschritt bei etwa 80 %. Die größten Herausforderungen bei einer weiteren Reinheitssteigerung ergeben sich aus der Agglomeration von Textilien mit dem Holz. Diese verhindert aktuell das Erreichen einer höheren Trennqualität und ist Gegenstand der Forschung. Die Reinheit der Restfraktion, die vor allem Kunststoffe, Textilien und Glas umfassen, liegt derzeit bei etwa 60 %, wobei 40 % der Verunreinigungen auf Holzanteile zurückzuführen sind. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die stoffliche Zusammensetzung der Sperrmüllprobe nach der Sortierung in der Multisortieranlage.

Weitere Arbeiten am ThIWert beschäftigen sich mit der Aufbereitung von feinkörnigen Sperrmüllfraktionen (< 15 mm), die nach der Zerkleinerung ca. 26 M.-% des Gesamtstroms umfassen. Untersucht werden hierbei insbesondere Verfahren der elektrostatischen Separation sowie der Dichtetrennung. Die Ergebnisse bestätigen sowohl das erhebliche Wertstoffpotenzial und die gute Sortierbarkeit der nach der Zerkleinerung anfallenden Feinfraktion. Durch die Negativsortierung der Störstoffe Kunststoff, Textilien und Glas konnte die Holzfraktion (ca. 60 M.-% der Feinfraktion) auf eine Reinheit von etwa 95 % konzentriert werden.

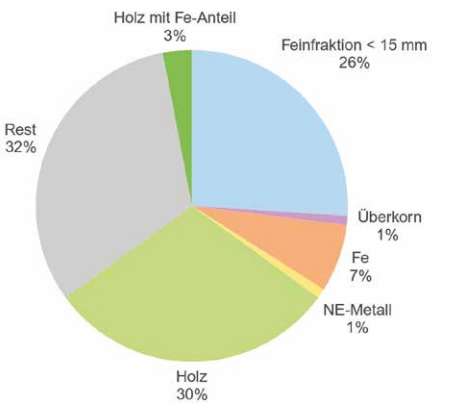


Abbildung 1: Stoffliche Zusammensetzung nach Sortierung mittels Multi-Sortieranlage

4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zur Sperrmüllverwertung in Thüringen zeigen ein hohes Wertstoffpotenzial im Stoffstrom, hier insbesondere durch den großen Anteil von Altholz. Pilotversuche zur getrennten Altholzerfassung und der Einsatz einer modularen Sortieranlage am ThIWert zeigen, dass sowohl grobe als auch feinkörnige Sperrmüllfraktionen effektiv sortiert werden können. Es konnten hierbei Metalle mit einer Reinheit von etwa 99 % im Grobgut sowie die Holzfraktionen mit bis zu 95 % Reinheit im Feingut zurückgewonnen werden. Herausforderungen bestehen aufgrund der Vermischung von Textilien und Holz nach der Zerkleinerung, welche die Trennqualität begrenzen. Durch eine optimierte Erfassung, Sortierung und Aufbereitung bestehen erhebliche Potenziale für eine stoffliche Verwertung von Sperrmüll und es können wichtige Potenziale für die Kreislaufwirtschaft und die Dekarbonisierung erschlossen werden.

Danksagung

Die Bearbeitung des Stoffstroms Sperrmüll wird im Rahmen des Forschungsvorhabens „SeRo.inTech – Einsatz innovativer Technologien zur Erschließung sekundärer Rohstoffquellen in Thüringen“ (01/2024–06/2026, Nr. 2023 FGR 0092) durchgeführt. Das Projekt wird durch den Freistaat Thüringen gefördert und durch Mittel des Europäischen Sozialfonds Plus kofinanziert.

Literatur/Quellen

Statistisches Bundesamt (2023): Aufkommen, Beseitigung und Verwertung von Abfällen im Jahr 2023. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertungsquoten-der-wichtigsten-abfallarten (Zugriff: 02.12.2025).

Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz: Abfallbilanz Thüringen 2024. Online verfügbar unter: https://tlubn.thueringen.de/fileadmin/000_TLUBN/Umweltschutz/Abfall/Landesabfallwirtschaftsplanung/Abfallbilanz_2024.pdf (Zugriff: 02.12.2025).

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (2017): Abschlussbericht AZ 31221. Online verfügbar unter: https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-31221.pdf (Zugriff: 24.09.2025).

Altholzverordnung (AltholzV) (2002): Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz. Online verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/altholzv/ (Zugriff: 05.12.2025).

Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) (2021): Gesetz zur Einführung eines nationalen Emissionshandels für Brennstoffe. Bundesgesetzblatt I Nr. 13, S. 46–72. Online verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/behg/ (Zugriff: 05.12.2025).

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Bundesgesetzblatt I Nr. 49, S. 2128–2173. Online verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/ (Zugriff: 05.12.2025).

Hamburg Institut Research gGmbH (2024): Das unterschätzte Klimaschutzpotenzial von Pflanzenkohle (Biochar). Online verfügbar unter: https://www.hamburg-institut.com/wp-content/uploads/2024/12/2024_Das_unterschaetzte_Klimaschutzpotenzial_von_Pflanzenkohle_Hamburg-Institut.pdf (Zugriff: 05.12.2025).

Kontakt
Simon Ballüer, B.Eng. wissenschaftlicher Mitarbeiter
Hochschule Nordhausen
Tel.-Nr. 03631 420-459
E-Mail: simon.ballueer@hs-nordhausen.de
Homepage: https://www.hs-nordhausen.de/kontaktverzeichnis/b/ballueer-simon/

Heike Baumgartner, Felix Scheidl, Bojan Lorber, Gerald Koinig, Alexia Tischberger-Aldrian

Zusammenhänge zwischen sichtbaren Eigenschaften und der chemischen Zusammensetzung von Shredderschrottpartikeln

***Abstract**: Metallische Fraktionen magnetischer Shredderschrottpartikel weisen ein hohes stoffliches Verwertungspotenzial auf. Ausgehend davon wurde im Rahmen einer Masterarbeit untersucht, inwieweit visuell erfassbare Merkmale Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung dieser Partikel ermöglichen. Dabei erfolgte eine Bewertung visueller Eigenschaften hinsichtlich ihrer Eignung zur quantitativen Trennung von Materialfraktionen sowie zur gezielten An- bzw. Abreicherung ausgewählter Legierungselemente mit dem übergeordneten Ziel, die Qualität sekundärer Rohstoffe zu verbessern. Die Analyse basierte auf einer umfangreichen Partikeldatenbank, die mithilfe von MATLAB ausgewertet wurde. Visuelle Merkmale wie Materialart, Form und Zustand wurden systematisch erfasst und mit chemischen Elementgehalten korreliert. Die Ergebnisse zeigten, dass insbesondere Kupfer, nichtmetallische sowie heterogene Verbundwerkstoffe – wie erwartbar – visuell gut erkennbar sind. Gleichzeitig werden die Grenzen rein visueller Klassifikationsansätze für diese Fragestellung aufgezeigt.*

1 Einleitung

Die zunehmende Digitalisierung industrieller Prozesse im Kontext von Industrie 4.0 und dem Internet of Things führt zu wachsenden Datenmengen, deren strukturierte Analyse und Visualisierung wesentlich zur Prozessoptimierung und Ressourceneffizienz beitragen können. Im metallischen Recycling stellen insbesondere heterogene Schrottfraktionen aufgrund stark variierender chemischer Zusammensetzung eine zentrale Herausforderung dar, da Begleit- und Legierungselemente die Qualität sekundärer Werkstoffe maßgeblich beeinflussen (Konnerth et al. 2015; Lassnig et al. 2016, S. 6).

Kupfer gilt dabei als besonders kritisches Begleitelement in Stahlschrott, da bereits geringe Gehalte die mechanisch-technologischen Eigenschaften von Sekundärstählen deutlich verschlechtern (Martens und Goldmann 2016, S. 107–141). Zur Detektion und Charakterisierung kommen zunehmend sensorbasierte Analyseverfahren in Kombination mit physikalischen Trennmethoden zum Einsatz, die eine schnelle und zerstörungsfreie Elementanalyse auf Partikelebene ermöglichen (Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT 2021).

Ziel einer Masterarbeit am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft war die systematische Identifikation und Bewertung visuell erfassbarer Merkmale zur Abschätzung der chemischen Zusammensetzung von Shredderschrottpartikeln basierend auf einer Datenbank mit über 5.000 Partikeln, die sowohl optische als auch chemische Informationen enthielt. Von besonderem Interesse war dabei die qualitätsorientierte Trennung von Materialfraktionen sowie die gezielte Ab- und Abreicherung spezifischer Legierungselemente im Rahmen automatischer Sortierprozesse. Die zugrunde liegende Problematik ergab sich aus der hohen Heterogenität metallischer Abfallströme und dem Bedarf an präzisen datenbasierten Entscheidungsgrundlagen für eine werkstofflich hochwertige Verwertung.

2 Methodik

2.1 Datenaufbereitung

Die Datengrundlage der Untersuchung umfasste über 5.000 Shredderschrottpartikel (Beispiele siehe Abbildung 1), wobei sämtliche erfassten Daten (z.B. Materialart, Zustand, Hohlkörper, Farbe, Form, Verbundteil, chemische Zusammensetzung) in einer Excel-Datei dokumentiert wurden. Die chemische Zusammensetzung der Partikel wurde mittels eines Röntgenfluoreszenz-Handheld-Gerätes (XRF; Bruker S1TITAN) erfasst. Die Auswertung der gesammelten Daten erfolgte mit Hilfe von MATLAB. Zur initialen Beschreibung des Datensatzes wurden die visuell erfassbaren Merkmale mithilfe von Balkendiagrammen dargestellt. Die chemische Zusammensetzung wurde anhand von Boxplot-Darstellungen analysiert, welche die Verteilungen der Elementgehalte einschließlich möglicher Ausreißer abbildeten. Betrachtet wurden ausgewählte, für die Bewertung relevante Elemente, darunter Kupfer (Cu), Chrom (Cr), Phosphor (P), Schwefel (S), Zinn (Sn) und Zink (Zn) sowie weitere Begleitelemente.

Kupfer zählt zu den kritischsten Begleitelementen im werkstofflichen Recycling von Eisen- und Stahlschrotten. Kupfer wird als Hauptursache für Heiß- und Warmrisse beim Warmwalzen, Schmieden oder Gießen betrachtet, wodurch es als schädliches Begleitelement im Stahl gilt. Die effektivste Methode zur Reduzierung von Kupfer in Eisen-Schrott ist die sorgfältige Sortierung des Schrottes (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) 2023, S. 33; Daehn et al. 2017, S. 39–40; Dworak et al.).

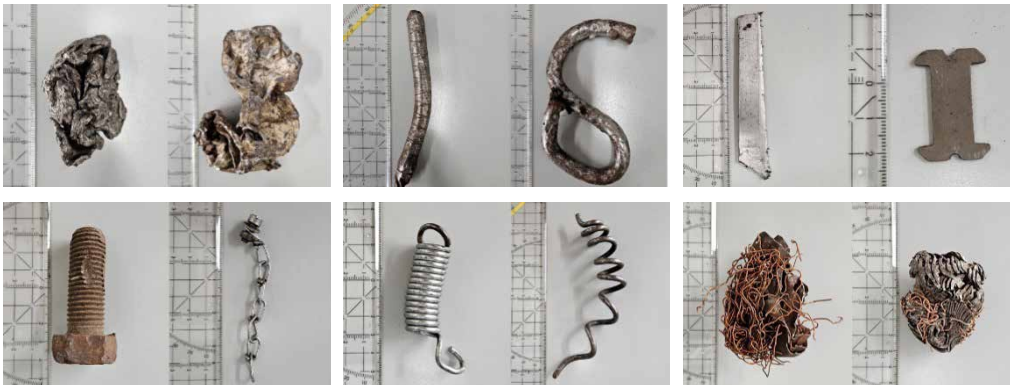


Abbildung 1: Beispiele für unterschiedliche Shredderschrottpartikel

2.2 Datenanalyse

Die Datenanalyse erfolgte in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten. Zunächst wurden systematische Filterszenarien definiert, aus denen prüfbare Hypothesen abgeleitet werden. Deren Überprüfung erfolgte anhand von Boxplot-Visualisierungen der chemischen Zusammensetzung. Zur Analyse von Wechselwirkungen zwischen visuellen und chemischen Eigenschaften wurden Heatmaps eingesetzt, um potenzielle Korrelationen zwischen den betrachteten Merkmalen zu identifizieren.

2.2.1 Entwicklung systematischer Filterszenarien und Hypothesenbildung

An die Datenaufbereitung wurde ein iteratives Verfahren zur Definition und Anwendung gezielter Filterkriterien angeschlossen. Diese Filterszenarien bezogen sich auf die Merkmale Materialart, Zustand und Form

und dienen der strukturierten Eingrenzung des Datensatzes sowie der Durchführung fokussierter Analysen innerhalb klar definierter Teilmengen.

Im Merkmal Materialart lag der Fokus auf einer hochwertigen metallischen Fraktion. Beim Merkmal Zustand wurden heterogene, nichtmetallische Partikel, darunter Glas, Holz, Kunststoffe, Mineralien, Textilien und Verbundwerkstoffe, der Ausschuss-Fraktion zugeordnet. Für das Merkmal Form wurde ‚kugeliger Verbund' ebenfalls als Ausschuss definiert. Auf Grundlage dieser vordefinierten Kriterien wurden prüfbare Hypothesen formuliert und über die Korrelation mit der chemischen Zusammensetzung überprüft.

2.2.2 Wechselwirkungen zwischen visuellen Merkmalen und der chemischen Zusammensetzung

Zur systematischen Untersuchung potenzieller Wechselwirkungen wurden Heatmaps verwendet (siehe Abbildung 2), die sowohl die absolute als auch die relative Häufigkeit der Partikelverteilung abbilden. Zusätzlich wurden die chemische Zusammensetzung sowie die massenbezogene Analyse der Elemente berücksichtigt. Im Zentrum der Analyse stand die kritische Prüfung der Aussagekraft visueller Klassifikationskriterien in Bezug auf qualitätsrelevante Differenzierungen innerhalb des Partikelkollektivs.

Zur Quantifizierung der Reinheit und Qualität der Fraktionen wurden Gehaltsklassen definiert: reich (> 85%), haltig (50-85%), arm (10-50%) und fremd (< 10%) für die Elemente Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Zink (Zn). Diese Klassifizierung ermöglichte eine systematische Bewertung der Partikelqualität und unterstützte die Ableitung aussagekräftiger Schlussfolgerungen aus den visuellen und chemischen Daten.

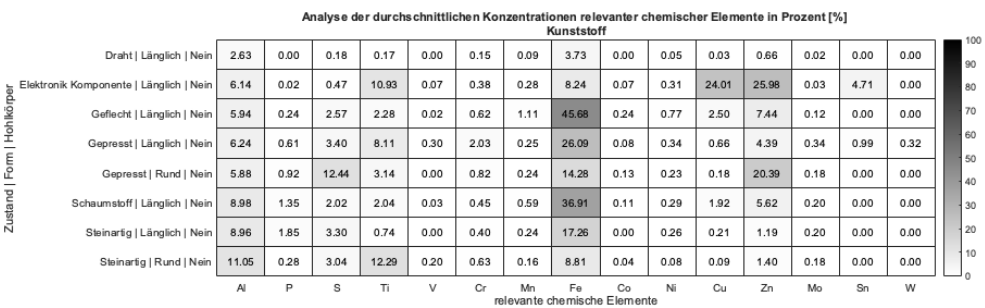


Abbildung 2: Beispiel für die Auswertungen – Wechselwirkungen zwischen den visuellen Merkmalen und den durchschnittlichen Konzentrationen (in Prozent) der relevanten chemischen Elemente für die Materialart Kunststoff

Die vorliegenden Daten können eine wichtige Basis für die Weiterentwicklung KI-basierter Sortierverfahren darstellen. Es kann daraus abgeschätzt werden, wie hoch das Potential ist, Partikel bestimmter chemischer Zusammensetzung nur aufgrund ihrer visuellen Merkmale zu erkennen und damit ein Aussortieren aus dem Strom zu ermöglichen. Während für einige Elemente wie z.B. Kupfer eine Abtrennung als vielversprechend erscheint, wird gleichzeitig deutlich, dass eine rein merkmalsbasierte Klassifizierung auch ihre Grenzen aufweist: Identische optische Eigenschaften können mit hoher chemischer Variabilität einhergehen, und selbst innerhalb vermeintlich homogener Fraktionen schwanken die Anteile der Begleitelemente. Eine vollständige Trennsicherheit lässt sich daher ausschließlich auf Basis visueller Merkmale mit Sicherheit nicht gewährleisten.

Die Formulierung prüfbarer Hypothesen ermöglicht die Festlegung klarer Bewertungskriterien, die systematisch überprüft werden und ein strukturiertes, wissenschaftlich nachvollziehbares Vorgehen sicherstellen. Die Analyse zeigt, dass nichtmetallische Partikel als qualitätsmindernd gelten und aus Eisen-

Fraktionen entfernt werden müssen. Kupfer erweist sich ebenfalls als störender Bestandteil in Stahl bzw. in Sekundärrohstoffen für Eisen. Innerhalb der Metallfraktion kann zwischen einer qualitativ hochwertigen Fraktion mit über 80% Eisen und einer minderwertigen Fraktion mit niedrigeren Eisenanteilen und höheren Konzentrationen von Legierungselementen unterschieden werden.

Zusammenfassend verdeutlichen die Ergebnisse das Potenzial einer Verknüpfung visueller Merkmale mit chemischen Daten, unterstützt durch kombinierte visuelle, chemische und sensorgestützte Verfahren. Optisch gestützte Klassifikationsprozesse können dadurch erheblich verbessert werden, stoßen jedoch ohne ergänzende Analytik schnell an ihre Grenzen. Eine gezielte Trennung kupferhaltiger und heterogener Fraktionen erweist sich als zielführender Ansatz zur Steigerung der Qualität sekundärer Rohstoffe.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „KIRAMET“ (https://www.unileoben.ac.at/kiramet/), gefördert durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft (FO 999899661) gestaltet.

Literatur/Quellen

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) (Hg.) (2023): IRONER – Potenziale für innovatives und nachhaltiges Recycling von Stahl. Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Unter Mitarbeit von Gerhard Hackl, Martin Beermann, Johannes Rieger, Monika Häuselman, Johannes Schenk, Susanne Michelic et al. Online verfügbar unter https://fti-ressourcenwende.at/resources/pdf/schriftenreihe_2023-01-ironer.pdf, zuletzt aktualisiert am 2023-01, zuletzt geprüft am 26.05.2025.

Daehn, Katrin E.; Cabrera Serrenho, André; Allwood, Julian M. (2017): How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? In: *Environmental science & technology* 51 (11), S. 6599–6606. DOI: 10.1021/acs.est.7b00997.

Dworak, Sabine; Fellner, Johann; Beermann, Martin; Häuselmann, Monika; Schenk, Johannes; Michelic, Susanne et al. (2023): Stahlrecycling – Potenziale und Herausforderungen für innovatives und nachhaltiges Recycling. In: Österreichische *Wasser- und Abfallwirtschaft* 75 (1-2), S. 97–107. DOI: 10.1007/s00506-022-00903-3.

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT (2021): LIBS-Sensorik zur Analyse und Steuerung von Schrottströmen für das Metall-Recycling. Unter Mitarbeit von Volker Sturm. Online verfügbar unter https://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/de/documents/Jahresberichte/jb21/tf4/jb21-s80-libs-sensorik-analyse-und-steuerung-schrottstroeme.pdf, zuletzt aktualisiert am 2023-03, zuletzt geprüft am 26.05.2025.

Konnerth, Harald; Wagner, Gerold; Wetzlinger, Werner (2015): Big Data Datenvisualisierung zur Optimierung der Unternehmensprozesse. Online verfügbar unter http://ffhoarep.fh-ooe.at/handle/123456789/363, zuletzt geprüft am 27.05.2025.

Lassnig, Markus; Stabauer, Petra; Güntner, Georg; Breitfuß, Gert; Mauthner, Katrin; Stummer, Michael et al. (2016): Industrie 4.0 in Österreich. Kenntnisstand und Einstellung zur digitalen Transformation durch Industrie 4.0 und neue Geschäftsmodelle in österreichischen Unternehmen. Bundesministerium für Ver-

kehr, Innovation und Technologie (BMVIT); Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG). Online verfügbar unter https://www.salzburgresearch.at/wp-content/uploads/2016/11/I40-Transform_D2_Industrie40-in-Oesterreich.pdf, zuletzt geprüft am 22.05.2025.

Martens, Hans; Goldmann, Daniel (2016): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, zuletzt geprüft am 26.05.2025.

Kontakt

Dipl.-Ing. Heike Baumgartner / Ass.Prof. DI Dr.mont. Alexia Tischberger-Aldrian
Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
E-Mail: alexia.tischberger-aldrian@unileoben.ac.at
Homepage: https://www.avaw-unileoben.at/de/

Lara Clemens, Isabel Kaphahn, Peter Quicker

Chemisches Recycling von abfallstämmigem Matratzenschaum durch Pyrolyse

***Abstract**: Jährlich fallen etwa 5 Millionen m³ Matratzen in Deutschland zur Entsorgung an, die überwiegend durch Verbrennung energetisch verwertet werden [1]. Angesichts erheblicher Verluste wertvoller Rohstoffe verfolgt das Projekt REFOAM („Recycling of Waste-Derived Mattresses Foam through Sensor-based Characterization and Pyrolysis") das Ziel, das Potenzial der Ressourcenrückgewinnung aus latexhaltigen Matratzenschaumabfällen zu erschließen. Zunächst wurden die Schaummaterialien mittels sensorbasierter Charakterisierung erfasst und anschließend sortiert. Es wurden Pelletierungs- und Agglomerationsversuche durchgeführt, dabei wurde ein Agglomerat mit 60 M.-% Latexmatratzenschaum, 20 M.-% expandiertem Polystyrol sowie 20 M.-% einer Sortierfraktion aus Polystyrol erzeugt. Die Agglomeration soll die Förderfähigkeit für den kontinuierlichen Betrieb verbessern und die Effizienz der nachgeschalteten Pyrolyse erhöhen. Erste Pyrolyseversuche im Batch-Reaktor (Stickstoffatmosphäre, Einwaage 200 g, 450 °C, Haltezeit 60 min) ergaben im Mittel 27,3 % Kondensat, 6,7 % Karbonisat und 66,0 % Permanentgas. Die Gasphase wurde über Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie erfasst, die Kondensate wurden mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie analysiert. Im Kondensat wurden unter anderem Styrol, Limonen und Ethylbenzol nachgewiesen. Im Karbonisat wurde ein erhöhter Zinkgehalt festgestellt, als vorläufiger Wert wurden 25,25 % angegeben. Im weiteren Projektverlauf sollen die Versuchsparameter optimiert, Agglomerate im Batch-Reaktor vergleichend zum reinen Latexmatratzenschaum pyrolysiert sowie die Pyrolyse skaliert und in einen kontinuierlichen Pilotbetrieb überführt werden.*

1 Einleitung

In Deutschland fallen jährlich rund 8,27 Millionen Altmatratzen an. Unter der Annahme von 20 kg pro Matratze ergibt sich ein Aufkommen von etwa 165.400 Tonnen Matratzenabfällen, darunter rund 16.540 Tonnen Latexmatratzenschaum [1]. Von besonderem Interesse ist der Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR), ein schwefelvulkanisiertes Copolymer [3]. Das Recycling von Latexmatratzenschäumen ist derzeit nicht im industriellen Maßstab etabliert. Die steigenden Recyclingquoten für Siedlungsabfälle in der EU machen jedoch ein Umdenken erforderlich, weg von der rein energetischen Verwertung und hin zu einer stofflichen Nutzung im Sinne einer verbesserten Ressourcennutzung [2]. Ob ein werkstoffliches Recycling dieses Materials möglich ist, muss aufgrund mehrerer Aspekte, etwa der chemischen Struktur, Verunreinigungen und des Einsatzes von Verbundwerkstoffen noch untersucht werden [4]. Eine Alternative zur thermischen Behandlung ist die rohstoffliche Nutzung mit dem Ziel, Primärrohstoffe im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zu ersetzen.

Perspektivisch kann die pyrolytische Behandlung eine Möglichkeit sein, SBR-haltige Abfälle zu recyceln. Dabei wird das Material in inertisierter Atmosphäre so stark erhitzt, dass die Polymerketten thermisch fragmentieren. Flüchtige Bestandteile gehen in die Gasphase über und umfassen neben Permanentgasen auch bei Raumtemperatur kondensierbare Kohlenwasserstoffe mit öliger bis wachsartiger Konsistenz. Durch eine optimierte Prozessführung und zusätzliche Aufbereitungsschritte können diese Kondensate wie-

der in die Wertstoffkette eingebunden werden. Dadurch ließen sich Matratzenschäume verwerten, fossile Rohstoffe substituieren und eine zirkuläre Wertschöpfung unterstützen.

2 Methodik

2.1 Kompaktierung von Latexmatratzenschäumen

Die Kompaktierung des abfallstämmigen Latexmatratzenschaums verfolgt das Ziel, stabile und gut förderfähige Agglomerate zu erzeugen. Dadurch soll die Schüttdichte erhöht werden, um einen effizienteren Transport sowie die Förderung in die anschließende Pyrolyseanlage zu unterstützen und gleichzeitig den Feinanteil zu minimieren. Hierzu wurden Pelletierungs- und Agglomerationsverfahren erprobt und die erzeugten Pellets und Agglomerate hinsichtlich Förderfähigkeit und Abriebfestigkeit bewertet. Ohne zusätzliche Additive waren weder Agglomeration noch Pelletierung möglich. Als abfallstämmige Additive wurden für die Pelletierung Polystyrol-Joghurtbecher und Polyethylenfolien aus der Leichtverpackungssortierung (LVP) verwendet. Für die Agglomeration wurden zusätzlich eine Sortierfraktion aus der LVP aus expandiertem Polystyrol (EPS) und Polystyrol (PS) sowie reines EPS aus Gewerbeabfällen eingesetzt. Ein Schwerpunkt lag darauf, den Anteil an Latexmatratzenschaum in den Agglomeraten zu maximieren. Anschließend wurde der Einfluss der Additive auf die chemische Zusammensetzung mithilfe von Immediat- und Elementaranalyse untersucht.

2.2 Pyrolyse von Latexmatratzenschäumen

Das thermochemische Zersetzungsverhalten wurde zunächst mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA) untersucht. Auf dieser Grundlage wurden erste Versuchsbedingungen für das Scale-Up im Batch-Reaktor abgeleitet. Die Batch-Versuche wurden in einer Doppelbestimmung durchgeführt. Pro Versuch wurden unter Stickstoffatmosphäre 200 g Latexmatratzenschäume eingewogen und mit einer Aufheizrate von 5 K/min auf 450 °C aufgeheizt. Diese Temperatur wurde für 60 min gehalten. Die entstehenden Pyrolysegase wurden anschließend durch eine Kühlfalle geleitet, um kondensierbare Bestandteile abzutrennen. Das Produktspektrum der Gasphase wurde über eine Kopplung mit Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR) erfasst. Zusätzlich wurden Kondensate und Karbonisat beprobt und für die weitere Auswertung bereitgestellt. Die Zusammensetzung der Pyrolysekondensate wurde mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) analysiert. Das Karbonisat wurde mittels Immediat-, Elementar- und einer Röntgenfluoreszenzanalyse charakterisiert, um Wertstoffe mit Rückgewinnungspotenzial zu identifizieren.

3 Ergebnisse & Diskussion

3.1 Kompaktierung von Latexmatratzenschäumen

Bei der Kompaktierung von Latexmatratzenschäumen zeigte die Agglomeration im Vergleich zur Pelletierung einen stabileren Prozessablauf und führte zu besser förderfähigen Agglomeraten. Aus diesem Grund wird im Folgenden ausschließlich auf die Agglomerate eingegangen. Es wurden 18 Agglomerate mit verschiedenen Mischungsverhältnissen zwischen Additiv und Latexmatratzenschaum hergestellt. Agglomerat 17 wies den höchsten Anteil an Latexmatratzenschaum auf und bestand aus 60 M.-% Latexmatratzenschaum, 20 M.-% EPS aus Gewerbeabfällen sowie 20 M.-% einer Sortierfraktion aus EPS/PS aus der LVP. Abbildung 1 zeigt den Vergleich der Elementar- und Immediatanalyse von Latexmatratzenschaum, Additiv und Agglomerat 17.

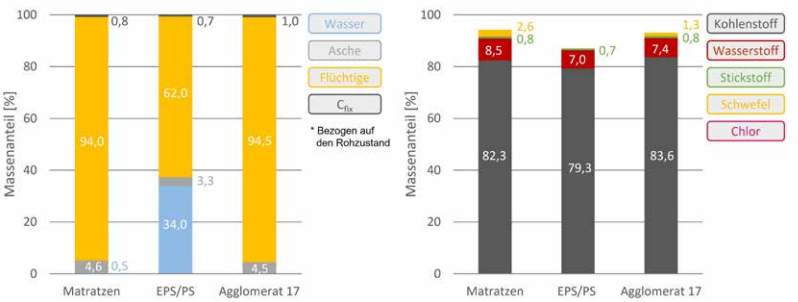


Abbildung 1: Vergleich der Elementar- und Immediatanalyse zwischen Latexmatratzenschaum, Additiv EPS/PS und Agglomerat 17

Die chemische Zusammensetzung von Latexmatratzenschaum und Agglomerat 17 verändert sich durch Agglomeration und Additivzugabe nur geringfügig.

Eine Kompaktierung des Latexmatratzenschaums konnte nur unter Zugabe von Additiven erreicht werden, da Latexmatratzenschäume Elastomere sind, die bei erhöhten Temperaturen degradieren, anstatt zu erweichen. Durch die Agglomeration änderte sich die chemische Zusammensetzung von Latexmatratzenschaum im Vergleich zu Agglomerat 17 nur geringfügig. Im weiteren Projektverlauf werden Pyrolyseversuche mit Agglomerat 17 durchgeführt. Für den kontinuierlichen Betrieb wird durch die Agglomeration die Förderfähigkeit gewährleistet.

3.2 Pyrolyse von Latexmatratzenschäumen

Nach den Pyrolyseversuchen wurde Massenbilanzen aufgestellt, die in Abbildung 2 dargestellt sind.

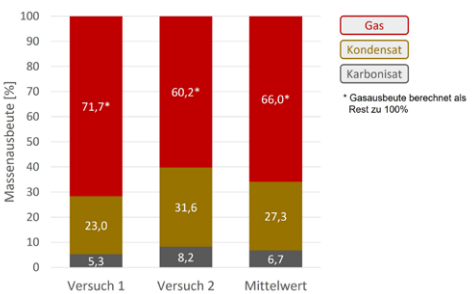


Abbildung 2: Massenbilanz aus Versuch 1 und 2 sowie den Mittelwerten bei den Versuchsbedingungen: 200 g Einwaage, Zieltemperatur 450 °C, Haltezeit 60 min

Es wurden die Mittelwerte 6,7 M.-% Karbonisat, 27,3 M.-% Kondensat und 66,0 M.-% Permanentgas ermittelt. Der Anteil an Permanentgas wurde als Rechenwert aus der Differenz zu 100 % bestimmt. Aufgrund der Schwankungen zwischen den Versuchen sollen weitere Versuche mit unterschiedlichen Temperaturen und Haltezeiten durchgeführt werden, um die Versuchsparameter weiter zu optimieren. Bei der Untersuchung des Kondensats wurden unter anderem Styrol, Limonen und Ethylbenzol nachgewiesen. Im Karbonisat wurde ein Zinkgehalt von 25,25 M.-% festgestellt.

Die ersten Pyrolyseversuche im Batch-Reaktor waren erfolgreich. Die Analysen des Output-Materials müssen weiter verifiziert werden. Mögliche Verwertungswege des Kondensats könnten der Einsatz als Feedstock im Steamcracker, die Nutzung im Flugstromvergaser oder die Rückgewinnung einzelner Stoffe sein. Perspektivisch sollen aus dem Karbonisat durch gezielte Aufbereitung definierte Stoffe (z. B. Zink) extrahiert sowie deren Verwertungswege identifiziert und bewertet werden.

5 Fazit & Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass eine Kompaktierung von Latexmatratzenschäumen durch den Einsatz von Additiven möglich ist und damit eine verbesserte Handhabung für Transport und Prozessbeschickung erreicht werden kann. Zudem wurden erste Pyrolyseversuche im Batch-Reaktor erfolgreich durchgeführt. Dabei lag die Kondensatausbeute im Bereich von 20-30 %. Die erzeugten Produktfraktionen wurden chemisch charakterisiert, sodass erste Aussagen zum Produktspektrum und zu möglichen Verwertungsoptionen abgeleitet werden konnten.

Im nächsten Schritt steht das Scale-Up der Pyrolyse im Mittelpunkt. Dazu sollen die Betriebsparameter weiter optimiert werden, um höhere Kondensatausbeuten zu erzielen und das Agglomerat im Vergleich zu dem Latexmatratzenschaum im Batch-Reaktor pyrolysiert werden. Anschließend soll die Prozesskette in einen kontinuierlichen Pilotbetrieb überführt werden, um die Ergebnisse unter praxisnäheren Bedingungen zu validieren und die Grundlage für eine spätere Umsetzung in größerem Maßstab zu schaffen.

Danksagung

Das Projekt *REFOAM* wird durch die Volkswagenstiftung gefördert.

Literatur/Quellen

[1] Dornbusch, H.-J.; Hannes, L.; Santjer, M.; Böhm, C.; Wüst, S.; Zwisele, B.; Kern, M.; Siepenkothen, H.-J.: Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien; 2020.

[2] Europäisches Parlament: Richtlinie (EU) 2018/ des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle.

[3] Garrido, M.A.; Font, R.; Conesa, J.A.: Thermochemical study of the briquetting process of mattress foams. Fuel Processing Technology 2017; 159:88–95.

[4] Zanchet, A., Sousa F.D.B.: Elastomeric Composites Containing SBR Industrial Scraps Devulcanized by Microwaves: Raw Material, Not a Trash. Recycling 2020; 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

Leon Deterding, Maximilian Auer, Lars Dubb, Simon Eberle, Raphael Schill, Claus Lang-Koetz, Jörg Woidasky

Ökobilanz und Kreislaufführung im Kunststoffrecycling von Leichtverpackungen: Vergleich innovativer Sortier- und Verwertungstechnologien

***Abstract**: Die vorliegende Studie vergleicht und bewertet innovative Technologien zur Kreislaufführung und Verbesserung der Umweltbilanz im Kunststoffrecycling von Leichtverpackungen (LVP). Mithilfe einer Ökobilanz nach ISO 14040/44 werden verschiedene Szenarien analysiert: der Status quo, der Einsatz eines innovativen Einschritt-Sortierverfahrens „Sort4Circle" (S4C), die zusätzliche Integration der Pyrolyse als chemisches Verfahren sowie die Kombination beider Ansätze. Die Ergebnisse zeigen, dass durch verbesserte Sortiertechnologien und ergänzende chemische Verfahren die Treibhausgasemissionen deutlich gesenkt und der Rezyklat-Output erheblich gesteigert werden können. Die Kombination beider Technologien erzielt mit ca. -854 kg CO_2-Äquivalent und 480 kg Rezyklat pro Mg LVP die besten Resultate. Künftig kommt der Weiterentwicklung und Integration innovativer Sortier- und Verwertungstechnologien eine zentrale Rolle zu, um die Kreislaufführung und Umweltbilanz von Kunststoffverpackungen nachhaltig zu verbessern.*

1 Einleitung

Die Herstellung, Verarbeitung und das Abfallmanagement von Kunststoffen verursachen etwa 3,4 % der globalen Treibhausgasemissionen, wovon etwa 90 % auf die Herstellungs- und Verarbeitungsphase der Kunststoffe entfallen (OECD, 2022). Im Jahr 2024 wurden in Europa etwa 54,6 Millionen Tonnen Kunststoff produziert, von denen lediglich 15,4 % zirkulärer und 79,3 % fossiler Kunststoff waren (Plastics Europe, 2025). Deutschland ist der größte Kunststoffproduzent in Europa und recycelt derzeit nur etwa 35 % mechanisch und 0,4 % chemisch (Conversio Market & Strategy GmbH, 2024). Moderne Sortiertechnologien sind entscheidend, um sowohl die Recyclingquote als auch die Qualität der Rezyklate zu steigern und damit die Primärproduktion und die damit verbundenen Umweltwirkungen zu minimieren (Kehl & Riousset, 2024). Im Forschungsprojekt „präziSort" wird das Sortierverfahren Sort4Circle (S4C) der Polysecure GmbH in einer Pilotanlage implementiert (Moesslein et al., 2023), dessen Kennzeichen eine Multisensor-Produkterkennung in Verbindung mit einer einstufigen Produktabtrennung aus dem Materialstrom ist. Ziel der hier vorliegenden Studie ist es, die Auswirkungen des S4C-Ansatzes auf die Recyclingquote sowie die Umweltwirkungen von Kunststoffabfällen zu evaluieren.

2 Methodik

Gegenstand der Untersuchungen ist die umfassende ökologische und kreislaufwirtschaftliche Bewertung unterschiedlicher Sortier- und Verwertungstechnologien für Leichtverpackungsabfälle (LVP) mit Schwerpunkt auf Kunststoffen. Die hierfür verwendete Methodik basiert auf einer Ökobilanz nach ISO 14040/44 unter Anwendung der Methode Environmental Footprint 3.1. Der Status quo des Kunststoffrecyclings wird

mit Szenarien verglichen, in denen sowohl das Sort4Circle-Verfahren als auch die Pyrolyse als innovative Technologien eingesetzt werden. Untersucht wurde ein Megagramm (Mg) LVP aus dem Post-Consumer-Bereich, charakterisiert[1] anhand von über 275 bundesweit erhobenen Stichproben (Auer et al., 2025). Die Prozessschritte umfassen Sortierung, mechanisches und chemisches Recycling sowie thermische Verwertung (Aufbereitung zu Ersatzbrennstoff und Müllverbrennungsanlage), bis zur Erstellung eines substituierbaren Sekundärmaterials. Die Gutschrift für Sekundärmaterialien wird mithilfe eines Substitutionsfaktors (SF) berechnet, der in zwei Varianten (Low-SF und High-SF) berücksichtigt wird. Zur Ergebnisdarstellung wird der Mittelwert beider Szenarien herangezogen; die Abweichungen zwischen diesen dienen als Unsicherheitsbereich (vgl. Deterding et al., 2025). Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der verwendeten Substitutionsfaktoren.

Tabelle 1: Übersicht verwendeter Substitutionsfaktoren (SF); Konv. = konventionelle Sortiertechnologie, Innov. = innovative Sortiertechnologie nach dem S4C-Ansatz

Kunststoff	**Low-SF**		**High-SF**	
	Konv.	Innov.	Konv.	Innov.
LDPE	0,66	0,83	0,95	0,95
HDPE	0,66	0,86	0,95	0,99
PP	0,48	0,91	0,95	0,99
MPO	0,40	0,47	0,95	0,95
PS	0,67	0,67	0,95	0,99
PET-Flaschen	0,9	0,95	1,0	1,0
MKS	0,40	0,47	0,95	0,95

Es wurden vier Szenarien des LVP-Recyclings betrachtet:
– S1: Es werden sowohl Sortierung als auch Recycling nach dem Status quo durchgeführt
– S2: Das S4C-Verfahren wird als innovative Technologie in die bestehende LVP-Sortierung integriert
– S3: Die Pyrolyse wird als ergänzender Recyclingpfad in das Status quo eingesetzt
– S4: Es werden sowohl das S4C-Verfahren in der Sortierung als auch die Pyrolyse als zusätzlicher Recyclingpfad genutzt

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz innovativer Technologien einen konstanten und robusten Trend zu einer verbesserten Umweltleistung[2] bewirkt (mit Ausnahme der Süßwasser-Eutrophierung). Im Folgenden werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Umweltwirkungskategorie Klimawandel dargestellt (siehe Abbildung 1). Die ökologischen und kreislaufwirtschaftlichen Vorteile der präziseren Sortierung mittels S4C werden in S2 deutlich: Gegenüber dem Referenzszenario verbessert sich die Netto-Treibhaus-

1 PP 16,1%; MKS 15,5%; Flüssigkartons 14,9%; FE / WB 8,3%; MPO 7%; MKS / PET 6,4%; Aluminium 5,6%; PET-Flasche 5,2%; Papier, Pappe, Kartonage 4,3%; HDPE 3,7%; LDPE 3%; PS 2,7%; aluhaltige VP 1,9%; Sonstiges 5,6%.

2 Folgende Umweltwirkungskategorien wurden betrachtet: Klimawandel, Wasserknappheit, Auswirkungen auf die Atemwege (anorganische Stoffe), Landnutzung, Ressourcennutzung (fossile Brennstoffe & Mineralien und Metalle), krebserregende Wirkungen, Abbau der Ozonschicht, photochemische Ozonbildung und Eutrophierung von Süßwasser.

gasbilanz von ca. -439 kg CO_2-Äq auf ca. -684 kg CO_2-Äq pro Mg LVP und der Rezyklat-Output steigt von ca. 276 kg auf ca. 367 kg. Dies entspricht einer Steigerung der Recyclingquote von 46,3 % auf 61,6 %. Haupttreiber ist die höhere Sortierqualität, die zu deutlich größeren Gutschriften im mechanischen Recycling führt. Die Implementierung einer ergänzenden chemischen Verwertung durch Pyrolyse (S3) verursacht zwar einen Anstieg der Prozessemissionen um etwa 28 %, dieser Effekt wird durch nachgelagerte Substitutionseffekte weitgehend kompensiert. Mit Netto-Emissionen von ca. -565 kg CO_2-Äq und einem Rezyklat-Output von ca. 378 kg ergibt sich eine Recyclingquote von 63,4 %. Die Pyrolyse kann insbesondere für gemischte oder schlecht sortierbare Polyolefinfraktionen als ergänzender Recyclingpfad genutzt werden. Die besten Ergebnisse erzielt die Kombination beider Ansätze (S4): Mit ca. -854 kg CO_2-Äq werden die höchsten Treibhausgaseinsparungen erreicht. Gleichzeitig steigt der Rezyklat-Output auf ca. 480 kg, was einer Recyclingquote von 80,5 % entspricht. Ein zentrales Element der Studie ist die transparente Darstellung der Unsicherheiten, insbesondere im Zusammenhang mit dem Substitutionsfaktor (SF). Die Fehlerbalken in Abbildung 1 verdeutlichen, dass die ökologische Gutschrift der Sekundärmaterialien wesentlich von den getroffenen Annahmen und der Qualität der Prozessdaten abhängt.

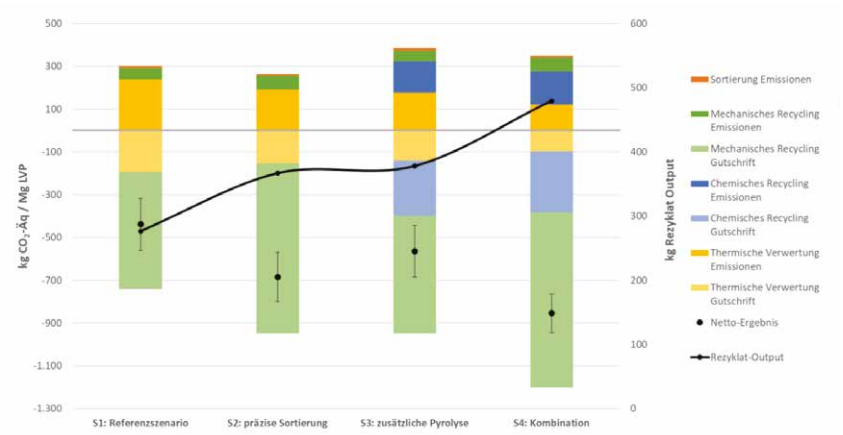


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen und -gutschriften in kg CO_2-Äquivalent pro Mg LVP

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Untersuchung verdeutlicht, dass hochwertige Sortiertechnologien wie S4C einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Klimaeffizienz und der Kreislaufführung von Kunststoffabfällen leisten können. Die Pyrolyse ist dabei nicht als Ersatz, sondern als gezielte Ergänzung zum mechanischen Recycling zu betrachten, insbesondere für Fraktionen, die stofflich nicht hochwertig verwertbar sind. Durch die Kombination beider Technologien kann die Substitution fossiler Rohstoffe deutlich gesteigert und die Rezyklatproduktion von ca. 276 kg im Referenzfall auf bis zu ca. 480 kg erhöht werden. Die Recyclingquote steigt damit von 46,3 % auf 80,5 %. Für künftige Bewertungen sind präzisere Daten aus industriellen S4C-Anlagen und zu Pyrolyseprozessen notwendig. Die Kombination mechanischer und chemischer Recyclingverfahren sowie die Weiterentwicklung der Sortiertechnologien sind entscheidend, um die Kreislaufführung und die ökologische Bilanz von Kunststoffen weiter zu verbessern.

Danksagung

Die Analyse war Teil des Forschungsprojekts „präziSort“ und wurde vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg im Rahmen des Programmes Invest BW zur Förderung von Innovations- und Technologievorhaben finanziell gefördert (Förderkennzeichen: BW1_2087/02). Die Autoren danken sowohl dem Fördermittelgeber als auch dem Projektpartner Polysecure herzlich.

Literatur/Quellen

Auer, M., Eberle, S., Deterding, L., Schill, R., Karatopi, K., & Woidaski, J. (2025). Verpackungsstudie 2024: Detail-Charakterisierung des deutschen Leichtverpackungsabfalls. In 14. Wissenschaftskongress: Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft (S. 159–163). Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V.

Conversio Market & Strategy GmbH. (2024). Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 – Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. GKV Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V. https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/kurzfassung-stoffstrombild-2023.pdf.

Deterding, L., Viere, T., Woidasky, J., Lang-Koetz, C. (2025). Life Cycle Assessment of a Hybrid Sorting Approach for Post-Consumer Lightweight Packaging Waste. Materials Circular Economy. [Im Druck]

Kehl, C., & Riousset, P. (2024). Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes: Mit Fallstudien zu Kunststoffverpackungen, Elektrogeräten sowie Baustoffen. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT). https://doi.org/10.5445/IR/1000168838.

Moesslein, J., Treick, A., & Watschke, L. (2023). Präzise und effizient sortieren mit SORT4CIRCLE®. Der Schlüssel für die Kreislaufwirtschaft. Müll und Abfall, 55(3), 144–147. https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2023.03.05.

OECD (2022), Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/de747aef-en.

Plastics Europe (2025), Plastics the Fast Facts 2025. Global and European plastics production and economic indicators, Plastics Europe AISB, Brussels, https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2025/09/PE_TheFacts_25_digital-1pager-scrollable.pdf.

Kontakt
Leon Deterding, wissenschaftlicher Mitarbeiter
Hochschule Pforzheim / Institut für Industrial Ecology
Tel.-Nr. +49 7231 28 6488
E-Mail: leon.deterding@hs-pforzheim.de
Homepage: https://www.hs-pforzheim.de/forschung/institute/inec

Mahsa Doostdar, Kerstin Kuchta

A Review on the environmental performance studies on reusable plastic packaging across industries

***Abstract**: This review examines the current state of Life Cycle Assessment (LCA) research on reusable plastic packaging across industrial sectors and highlights significant methodological and sectoral gaps. While reusable systems often demonstrate environmental advantages, particularly when sufficient reuse cycles are achieved, the comparison of results across studies is hindered by inconsistent system boundaries, heterogeneous impact category selection, and limited compliance with ISO 14040/44 requirements. Climate change is predominantly assessed, whereas categories related to marine and aquatic pollution remain underrepresented despite their growing relevance. Critical processes such as return logistics, secondary and tertiary packaging, and reconditioning activities are frequently omitted, reducing the completeness of many assessments. The analysis identifies the number of reuse cycles and the design of reconditioning processes as the most influential parameters driving environmental outcomes. Overall, the findings emphasize the potential of reusable plastic packaging to reduce environmental burdens, while underscoring the need for harmonized methodological choices and more transparent reporting to enable robust cross-sector comparisons.*

1 Introduction & objective

Plastic packaging constitutes nearly 40 % of total plastic production (Thomasson et al., 2024) and remains one of the main contributors to plastic waste generation and environmental pollution. For example, in Europe, 60% of the total waste plastic is generated from food packaging(Yadav et al., 2024). While global initiatives increasingly aim to reduce single-use plastics, the environmental performance of reusable plastic packaging systems is still poorly understood. Life Cycle Assessment (LCA) is a well-established method to assess the environmental performance of reusable plastic packaging. This tool analyzes the environmental impacts of a product or process in a systematic way by providing a wholistic framework (Miller, 2022). However, methodological inconsistencies and sectoral data gaps hinder comparability and the reliability of conclusions. This study addresses the following research questions:

1. What is the current state of environmental assessment in reusable plastic packaging?
2. Which industrial sectors or applications are underrepresented in LCA studies?
3. How comprehensive, reliable, and comparable are the existing studies?
4. How does reusable plastic packaging perform environmentally compared to single-use systems?

The main objective is to conduct a systematic literature review to map the current scientific landscape of reusable plastic packaging LCAs across industries and identify methodological and sectoral research gaps.

2 Methodology

A systematic literature search was conducted using Web of Science and Scopus databases, covering publications from 2000 to August 2025. Search terms combined methodological and thematic keywords, such as “LCA”, “environmental assessment”, and “reusable plastic packaging”. Out of 245 initial publications, 55 met the inclusion criteria focusing explicitly on reusable plastic packaging. Papers were excluded if they focused on recycling, non-plastic materials, e-commerce packaging, or consumer behavior. Each study was assessed against key methodological elements following ISO 14040/44 standards: goal and scope definition, functional unit, system boundaries, data sources, impact assessment methods, treatment of multifunctionality, sensitivity and uncertainty analysis, and interpretation of results.

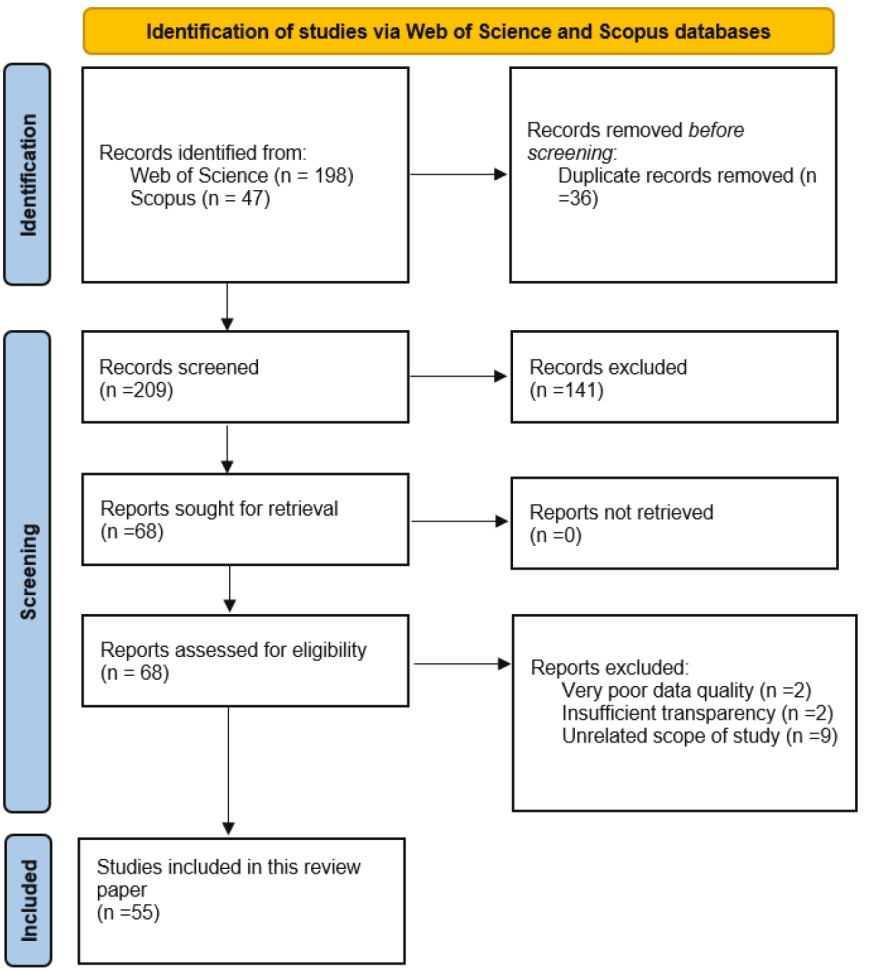


Figure 1 PRISMA flow diagram of literature selection process (Page et al., 2021)

3 Results & Discussion

The review reveals a clear gap in how reusable plastic packaging is assessed across sectors, with food packaging receiving more consistent attention than cosmetics, delivery services, or beverages.

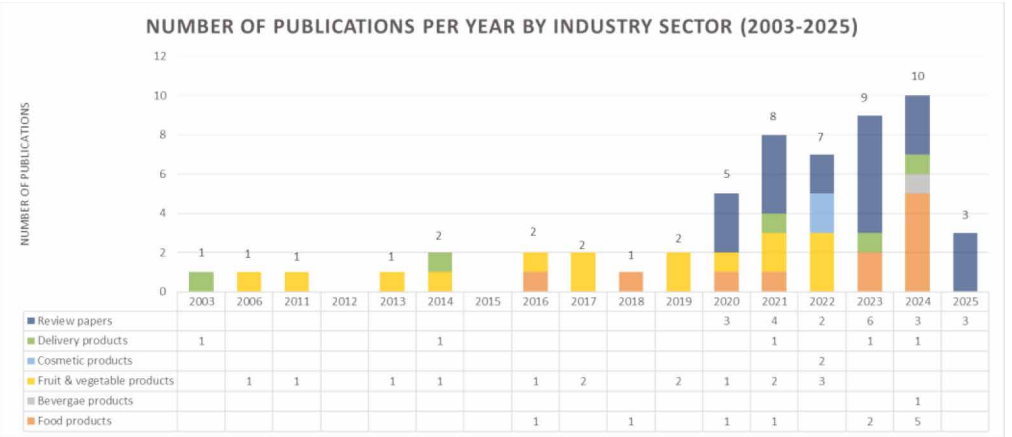


Figure 2 current state of environmental assessment studies for reusable plastic packaging across sectors

Although many studies report environmental benefits for reusable options—primarily when sufficient reuse cycles are achieved—the comparability of findings is limited by methodological inconsistencies, including divergent system boundaries, incomplete application of ISO 14040/44 requirements, and selective use of impact categories. Climate change remains the dominant category, while marine- and aquatic-related impacts are rarely addressed despite their relevance. Major inconsistencies arise in end-of-life modeling, where most studies neither justify their chosen allocation approach nor perform the sensitivity analyses required by ISO 14044, leaving results highly method-dependent. The frequent omission of secondary/tertiary packaging and return logistics further weakens the completeness of many assessments, even though prior research shows these factors can reverse comparative outcomes. Across the literature, the two most influential parameters are the number of reuse cycles and the design of reconditioning processes—yet reported reuse cycles vary from 1 to over 1,200, revealing the absence of realistic benchmarks. Overall, the findings emphasize that while reusable systems can deliver substantial environmental improvements, more harmonized methodological choices and transparent reporting are needed to support reliable comparisons and sector-wide conclusions.

Literatur/Quellen

Miller, S. A. (2022). The capabilities and deficiencies of life cycle assessment to address the plastic problem. *Frontiers in Sustainability*, *3*. https://doi.org/10.3389/frsus.2022.1007060

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Thomassen, G., Peeters, E., Van Hee, N., Noëth, E., Du Bois, E., Boone, L., & Compernolle, T. (2024). The environmental impacts of reusable rice packaging: An extended comparative life cycle assessment. *Sustainable Production and Consumption*, *45*, 333–347. https://doi.org/10.1016/J.SPC.2024.01.014

Yadav, P., Silvenius, F., Katajajuuri, J. M., & Leinonen, I. (2024). Life cycle assessment of reusable plastic food packaging. *Journal of Cleaner Production*, *448*, 141529. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.141529

Contact
Mahsa Doostdar, Research Associate
Hamburg university of Technology
CREM Institute
Tel.-Nr. +49 40 42878 4499
E-Mail: mahsa.doostdar@tuhh.de

Florian Dopplinger, Gerald Koinig, Alexia Tischberger-Aldrian

Auswirkungen von zukünftigen Alt-Fahrzeugen auf die Shredderschrotte

***Abstract**: Dieser Beitrag wurde im Rahmen des Projekts KIRAMET erstellt und betrachtet die zukünftigen Entwicklungen im Automobilbau und welche Auswirkungen diese auf die Shredderbetriebe und die Schrottqualitäten mit sich bringen. Zu diesem Zweck wurden potenzielle Szenarien anhand von vorhandenen Informationen und Daten erstellt. Die umfassende Aufarbeitung der Literatur ergab ableitbaren Tendenzen, welche im vorliegenden Beitrag aufgezeigt werden. Prognosen zufolge steigt die Bevölkerungszahl weiter an. Dem Trend der vergangenen Jahre folgend nimmt auch die Anzahl an Altfahrzeugen voraussichtlich weiterhin zu, was grundsätzlich zu einem Anstieg der Menge an Altfahrzeugen führen würde. Von den jährlich ausgeschiedenen Fahrzeugen wird jedoch nur ein Viertel bis Fünftel in Österreich verwertet. Viele Fahrzeuge werden dabei als Gebrauchtwagen ins Ausland verkauft oder illegal verwertet und exportiert. Es wäre essenziell, den unkontrollierten Rohstoffabfluss vor dem Hintergrund des steigenden Sekundärrohstoffbedarfs zu verhindern. Die mengenmäßige Entwicklung der Elektrifizierung der Automobile ist eine weitere einflussreiche Komponente für die Menge und Qualität der Shredderschrotte. Durch das geplante Verbrennerverbot der EU würde der Automobilmarkt einen starken Wandel erfahren, wodurch sich folglich die Zusammensetzung der zukünftigen Shredderschrotte verändern wird. Aber auch bei Verbrennern beeinflusst die Leichtbauweise die Mengen und Qualitäten der Shredderschrotte. Wenngleich eisenbasierte Materialien als Hauptbestandteil in der Automobilindustrie erhalten bleiben, werden die Anteile an Advanced High-Strength Stählen, faserverstärkten Kunststoffen, Aluminium und Magnesium zunehmen. Dies bedeutet für die Shredderbetriebe eine mengenmäßige Verschiebung der Eisenfraktion zur Nichteisenfraktion, die damit an Bedeutung gewinnen wird. Die steigende Diversität der Fahrzeuge und deren kompakte Bauweisen erschwert rasche Demontage und die individuelle Entfernung von potenziell wertvollen oder aber auch unerwünschten Komponenten durch beschränkte Zugänglichkeit. Hinzu kommt, dass das Vorhandensein bestimmter Stoffe oder Komponenten bei den Shredderbetrieben vor Ort nicht ersichtlich ist und von den Automobilherstellern keine Informationen weitergegeben werden. Eine (Teil-)Automatisierung von Demontageprozessen wird für die Shredderbetriebe damit de facto unmöglich.*

1 Einleitung

Die Automobilindustrie ist eine sich stetig weiterentwickelnde Branche, die nach Optimierung strebt. Dabei sind innovative Entwicklungen entlang des gesamten Produktkreislaufes gefordert. Wie bei allen Produkten handelt es sich auch bei Fahrzeugen um Erzeugnisse, welche eines Tages unweigerlich ihr Lebensende erreichen. Diese sogenannten End-of-life Vehicles (ELVs) werden dann, um ein Schließen des Stoffkreislaufes zu ermöglichen, einem Recyclingprozess zugeführt. Auf der anderen Seite benötigt die metallverarbeitende Industrie Schrotte von hoher Qualität und Reinheit, um nachhaltig hochwertige Produkte fertigen zu können. Das Forschungsprojekt KIRAMET thematisiert die Erhöhung der Schrottqualitäten durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz. Das Forschungsprojekt ist in mehrere Use Cases unterteilt. Einer dieser Use Cases handelt von den Fahrzeugen der Zukunft und dem digitalen Produktpass sowie dem Einfluss der

Demontage auf die Shredder-Outputfraktionen. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde letztere Fragestellung bearbeitet und wird im vorliegenden Tagungsbeitrag zusammengefasst.

Veränderungen in der Materialzusammensetzung durch technische Fortschritte oder Trends wie Leichtbauweise verlangen eine Weiterentwicklung der Altautoaufbereitung. Gesetzliche Anpassungen wie etwa Recyclingquoten und das geplante Verbot von Neufahrzeugen mit Verbrennungsmotor ab 2035 (Europäisches Parlament 2023) fördern somit zusätzlich einen Fortschritt, sowohl in der Fahrzeugproduktion als auch in der ELV-Behandlung. Unter Berücksichtigung der eben genannten Einflussfaktoren wurden in der Masterarbeit Trends analysiert, um eine aussagekräftige Prognose für die Altfahrzeugverwertung der Zukunft zu stellen.

Durch das dynamische Umfeld der Automobilindustrie, in Kombination mit technischem Fortschritt sowohl in der Materialwissenschaft als auch in der Fertigungstechnik, entwickeln sich PKWs konstant weiter. Die Auswirkungen dieser Entwicklungen sind zeitversetzt in der Abfallwirtschaft zu spüren. Zusätzlich dienen sekundär gewonnene Rohstoffe als Einsatzstoffe in der Metallindustrie. Um den nachhaltigen Einsatz von Schrotten in der Metallurgie zu gewährleisten, ist es notwendig, Recyclingrouten zu optimieren, um Outputfraktionen hoher Qualität zu erhalten. Im Jahr 2022 gab es in Österreich ein Aufkommen von 38 275 Altfahrzeugen, was einer Masse von 39 645 t entspricht. Diese wurden mittels der sechs in Österreich vorhandenen Großshredderanlagen zerkleinert (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie 2024). Um das zukünftige Ausmaß an Altfahrzeugaufkommen und die Veränderungen der Outputfraktionen abschätzen zu können, müssen Trends im Fahrzeugbau sowie der aktuelle Automobilmarkt genauer verstanden werden. Veränderungen wie Leichtbauweise, alternative Antriebe, gesetzliche Regulationen und sonstiger technischer Fortschritt bilden Ungewissheiten für die Materialzusammensetzung der zukünftigen Altfahrzeuge.

2 Methodik

Im Rahmen der Masterarbeiten sollten die Auswirkungen der Fahrzeugentwicklung auf Shredderoutputfraktionen für den Zeitraum 2030 bis 2050 qualitativ bis semi-quantitativ abgeschätzt werden. Es wurden potenzielle Szenarien erstellt und anschließend analysiert. Dabei wurden unterschiedliche Faktoren, wie zum Beispiel Antriebsart, Materialauswahl und Gewicht, sowie die Menge an umlaufenden Fahrzeugen, miteinbezogen. Die dafür notwendigen Daten wurden durch Literaturrecherche gesammelt. Als Datenbasis wurden Mengenerhebungen der neuzugelassenen Fahrzeuge, Import- und Exportmengen von Gebrauchtwagen, Abschätzung der Zusammensetzungen sowie die Entwicklungen im Bereich Legierungen und Komponenten im Fahrzeugbau herangezogen. Auf Basis der Daten wurden Prognosen und Tendenzen für die Menge und Qualität der Outputfraktionen der Großshredderanlagen in Österreich qualitativ bis semi-quantitativ abgeleitet. Zusätzlich wurden mögliche, sich daraus ergebende Herausforderungen einer Großshredderanlage zusammengefasst.

3 Ergebnisse

Folgende Szenarien wurden betrachtet (vgl. Abbildung 1):

- Szenario 1 beschreibt mögliche Veränderungen in der Anzahl an Fahrzeugen, die einem Shredderprozess zugeführt werden. Dabei werden verschiedene Fälle errechnet in Abhängigkeit von Lebensdauer, Neuzulassungen und sonstigen Einflussfaktoren.

- Szenario 2 betrachtet potenzielle Varianten an Antriebsarten und deren zukünftige Entwicklung. Dabei werden verschiedene Verhältnisse der Anteile von ICE, BEV und Hybrid erstellt.
- Szenario 3 gibt verschiedene Trends im Verbraucherverhalten wieder und bezieht sich dabei auf Fahrzeugarten wie SUVs oder Kleinwägen.
- Szenario 4 betrachtet die Entwicklung der im Fahrzeugbau eingesetzten Materialien.

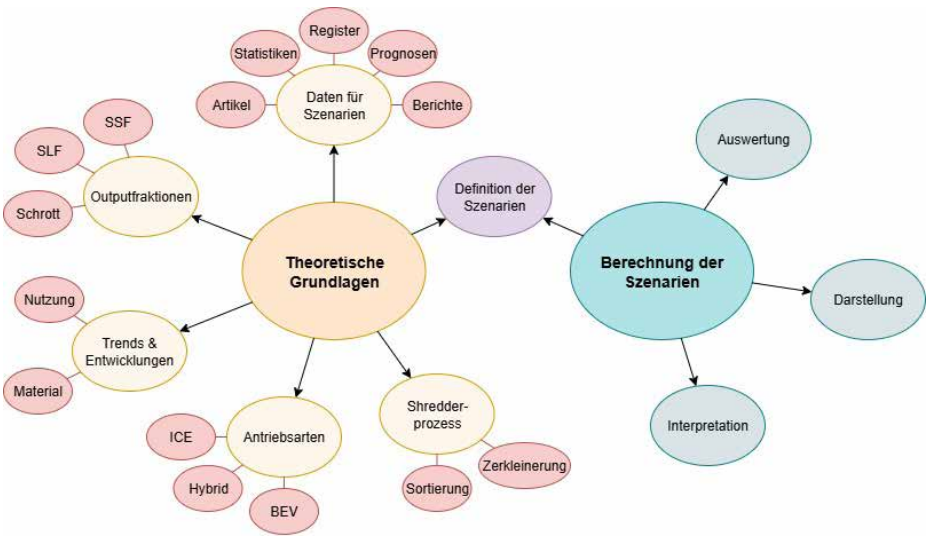


Abbildung 1: Gedankengerüst für den Aufbau der Masterarbeit

Der KFZ-Bestand in Österreich steigt seit 1981 durchgehend an (Statistik Austria 2024), demzufolge nimmt auch die Anzahl an Altfahrzeugen stetig zu. Die Prognose für den Bevölkerungszuwachs steigt ebenfalls weiter an. Daraus lässt sich schließen, dass ohne eine große Umstellung der Fortbewegungsmittel die Anzahl an Fahrzeugen weiter ansteigen wird. Zusätzlich bekommen moderne Fahrzeuge immer mehr elektronische Einbauten, wodurch sowohl das Gewicht als auch die Materialvielfalt steigen. Einhergehend nimmt auch die Anzahl an verbauten Batterien zu. Bei der Materialauswahl moderner Fahrzeuge ist in den vergangenen Jahren ein Rückgang an herkömmlichem Stahl zu beobachten. In den kommenden Jahren ist mit einer Zunahme von Advanced High-Strength Stählen, faserverstärkten Kunststoffen und Leichtmetallen wie Aluminium und Magnesium zu rechnen (Zimmermann et al. 2022, Statista 2019), wobei diese aufgrund ihrer Preise vermehrt bei hochwertigen Fahrzeugen zum Einsatz kommen (Taub und Lou 2015). Demzufolge ist davon auszugehen, dass eisenbasierte Materialien weiterhin der Hauptbestandteil der Automobilindustrie bleiben. Für Recyclingprozesse wird es daher steigend relevant, Ausbauprozesse für bestimmte Baugruppen sowie Strukturelemente zu implementieren und zu ergänzen. Die Problemstellung dabei liegt in der Diversität des Automobilmarktes, wodurch einheitliche Zerlegungsprozesse erschwert werden.

Unter Betrachtung der Anzahl an jährlich verwerteten Altfahrzeugen laut dem österreichischen Bundesabfallwirtschaftsplan und der Entwicklungen des österreichischen Fahrzeugbestandes konnte festgestellt werden, dass von den jährlich ausgeschiedenen Fahrzeugen nur ein Viertel bis Fünftel in Österreich verwertet wird. Viele Fahrzeuge werden dabei als Gebrauchtwagen ins Ausland verkauft oder illegal verwertet und exportiert.

Die Elektrifizierung des Verkehrs ist eine weitere einflussreiche Komponente. Durch das geplante Verbrennerverbot für 2035, bei dem Neuwagen keine Verbrennungsmotoren mehr besitzen dürfen, wird der Automobilmarkt einen starken Wandel erfahren, wodurch sich folgend die Zusammensetzung der Shredderschrotte verändern wird. Die in Fahrzeugen verwendeten Materialien sind großteils nicht zugänglich und die Unterschiede der Werkstoffauswahl sehr groß. Somit muss stets ein „Durchschnittsfahrzeug" angenommen werden. Für ein verbessertes Recycling müssen vorgeschaltete Ausbauprozesse und nachgeschaltete Sortierungsprozesse optimiert werden. Dazu ist es relevant, die zu erwartenden Mengen und Zusammensetzungen sinnvoll bestimmen zu können.

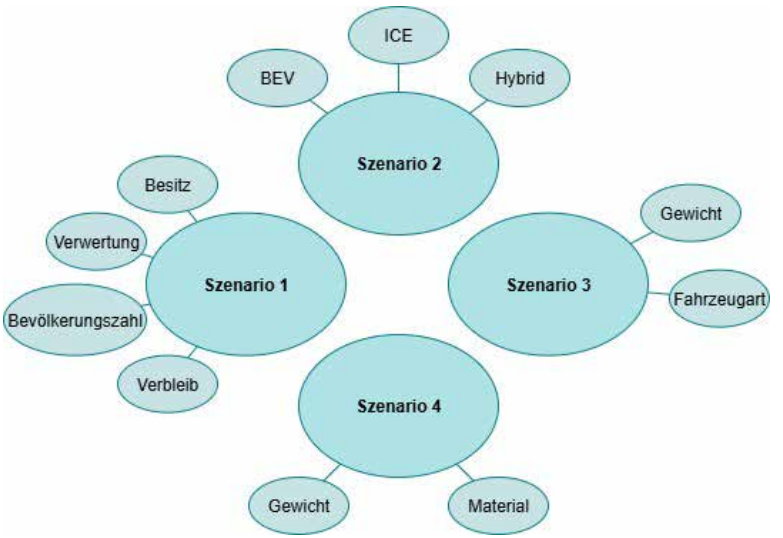


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Szenarien

Danksagung

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „KIRAMET", gefördert durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft (FO 999899661) gestaltet.

Literatur/Quellen

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2024): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2024. Referenzjahr 2022.

Europäisches Parlament (2023): EU-Verkaufsverbot für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge ab 2035 – Was bedeutet das? Unter Mitarbeit von Jaume Duch Guillot.

Statista (2019): Lightweight automotive materials (did-31903-1)

Statistik Austria (2024): Kfz-Bestand.

Taub, A. I.; Luo, A. A. (2015): Advanced lightweight materials and manufacturing processes for automotive applications. Hg. v. Cambridge University Press. Material Research Society. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1557/mrs.2015.268.

Zimmermann, T.; Sander, K.; Memelink, R.; Knode, M.; Freier, M.; Porsch, L. et al. (2022): Illegal treatment of end-of-life vehicles. Assessment of the environmental, micro- and macroeconomic effects. Hg. v. Ökopol Institute for Strategies GmbH. Dessau-Roßlau.

Kontakt

Dipl.-Ing. Florian Dopplinger / Ass.Prof. DI Dr.mont. Alexia Tischberger-Aldrian
Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
E-Mail: alexia.tischberger-aldrian@unileoben.ac.at
Homepage: https://www.avaw-unileoben.at/de/

Simon Eberle, Maximilian Auer, Lars Dubb, Leon Deterding, Raphael Schill, Jörg Woidasky

Verpackungsstudie: Analyse des Leichtverpackungs-Abfallaufkommens deutscher Haushalte 2019 vs. 2024

***Abstract**: Leichtverpackungen (LVP) aus der Haushaltssammlung stellen nach wie vor eine Herausforderung beim Schließen des Materialkreislaufes dar. Zur Untersuchung des LVP-Abfallaufkommens wurde von der Hochschule Pforzheim im Jahr 2024 die zweite deutschlandweite LVP-Feldstudie durchgeführt. Dabei wurden LVP-Abfälle aus 277 deutschen Haushalten während eines Zeitraums von zwei Wochen gesammelt, analysiert sowie mit soziodemografischen Daten verknüpft. Die LVP wurden mit über 30 charakteristischen Parametern wie Verpackungsart und -material, Farbe und Transparenz, Verschlüsse und Etiketten charakterisiert. Für einen detaillierten Vergleich wurden die Ergebnisse der ersten LVP-Charakterisierungsstudie von 2019 herangezogen. Im Vergleich zu 2019 löste die Fraktion der Beutel die Fraktion der Getränkekartons als größte Fraktion bei einer massenabhängigen Betrachtung ab. Der Massenanteil von Mehrschichtkunststoffen ging leicht zurück und es wurden deutlich weniger Papier-Kunststoff-Verbundverpackungen gefunden, während der Anteil von Aluminiumverpackungen deutlich zunahm. Dies deutet auf eine allmähliche Verschiebung zu besser recycelbaren Verpackungen und auf eine recyclinggerechtere Verpackungsgestaltung hin.*

1 Einleitung

Das Aufkommen von Kunststoff-Verpackungsabfällen deutscher Haushalte ist seit 1994 von ca. 2,80 Millionen Mg bis 2021 auf 3,51 Millionen Mg angestiegen [1]. Obwohl die Gesamtrecyclingquote aller Leichtverpackungen (aus Metall, Glas, Papier oder Kunststoff) im Jahr 2022 bei 68,5 % liegt [2], werden nur rund 51 % der Kunststoffverpackungen recycelt [2], während zeitgleich das Verpackungsgesetz seit 2022 eine mechanische Recyclingquote von 70 % vorschreibt [3]. LVP u.a. aus mehrschichtigen Kunststoffverpackungen und Verbunde stellen Hemmnisse für die Recyclingfähigkeit von Verpackungen aus Haushalten dar [4].

Für die Entwicklung und Bewertung von Sortier- und Recyclingverfahren fehlt eine publizierte Datenbasis. Von der Zentralen Stelle Verpackungsregister erfasste Daten zu in Verkehr gebrachten Kunststoffverpackungen oder der Entsorgungs- und Recyclingbetriebe werden nicht veröffentlicht. Auch haben Studien [1,5-9] nur einen geringen Detaillierungsgrad bezüglich des erfassten Post-Consumer-Abfallstroms und sie ermöglichen keine haushaltsspezifischen Auswertungen z. B. von sozioökonomischen Einflüssen auf die generierten LVP-Abfälle. Die 2024 von der Hochschule Pforzheim im Rahmen des durch das Land Baden-Württemberg (Förderlinie BW Invest) geförderten Forschungsprojekts „präziSort“ durchgeführte Feldstudie hat daher das Ziel, die Zusammensetzung des deutschen Leichtverpackungsabfalls als Planungsgrundlage für kreislaufwirtschaftliche Verbesserungen detailliert zu analysieren.

Ziel des hier vorliegenden Beitrages ist es, ausgewählte Ergebnisse der Feldstudie vorzustellen und dabei die Veränderungen der Ergebnisse aus den Jahren 2019 und 2024 zu diskutieren. Dabei werden u.a. Werkstoff- und Verpackungstypen nach deren Masseanteilen zwischen 2019 und 2024 verglichen. Die vorgestellten Ergebnisse sind der Veröffentlichung von Dubb et al., 2026 [10] entnommen.

2 Methodik

Im Rahmen des durch das Land Baden-Württemberg geförderten Forschungsprojekts „präziSort“ wurde eine umfassende Primärdatenerhebung zur haushaltsnahen Sammlung von Leichtverpackungen (LVP) konzipiert und durchgeführt. Aus einer deutschlandweit u. a. über Social Media und E-Mailings beworbenen Onlineumfrage im Jahr 2024, bei der rund 700 Interessenten aus ganz Deutschland teilnahmen, erfolgte die Auswahl von 350 Haushalten für die konkrete Umsetzung der Studie durch die Sammlung der in diesen Haushalten anfallenden LVP. Die Auswahlkriterien der Haushalte umfasste die lokale Ausgestaltung des Sammelsystems, die Haushaltsgröße sowie die Gemeindegröße, mit dem Ziel, eine möglichst repräsentative Abbildung der Struktur deutscher Haushalte und Sammelsysteme zu gewährleisten.

Im September 2024 erhielten die ausgewählten Haushalte einen sogenannten „Wissenschaftssack“ und wurden gebeten, sämtliche anfallenden LVP für einen flexiblen, zweiwöchigen Zeitraum entsprechend der lokal vorgeschriebenen Nutzung ihres Sammelsystems in diesem Sack zu sammeln und anschließend an die Hochschule Pforzheim zurückzusenden. Dabei war es ausdrücklich gewünscht, den Wissenschaftssack analog zum regulären Sammelsystem zu nutzen, was auch die Entsorgung stoffgleicher Nichtverpackungen einschließen kann.

Insgesamt wurden so 277 Wissenschaftssäcke mit über 30.000 Einzelteilen und einer Gesamtmasse von 302,3 kg erfasst. Die an der Hochschule durchgeführte Tiefencharakterisierung jedes einzelnen Packmittels umfasste die Erfassung von rund 30 Verpackungsmerkmalen wie bspw. Gewicht, Werkstoff (mittels Recyclingcode und NIR-Spektroskopie), Packstoff-Farbe, Füllgütern, Etiketten und Verschlüssen. Von jedem Packmittel wurden Bilder aus drei Perspektiven aufgenommen. Die Methodik basiert auf der im Jahr 2019 durchgeführten Vorgängerstudie [11].

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Verpackungsstudie 2024 zeigen, dass insgesamt 60,5 Masse-% der LVP zur Verpackung von Lebensmittel eingesetzt werden. Dies sind konkret vor allem Milch- und Milchprodukte (20,7%), Süßwaren (17,8%), Obst und Gemüse (10,0%), Getränke (6,6%) und Trockenprodukte (6,1%). Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Packmittel nach Masse konnte festgestellt werden, dass Beutel (16,9%) die am häufigsten verwendete Verpackungsgeometrie sind (vgl. Abbildung 1), gefolgt von Getränkekartons (14,9%), Schalen (14,0%) und Flaschen (12,5%). Dabei zeigte sich beispielsweise bei der Packmittelfraktion Beutel, dass deren Masseanteil um 11,1% gegenüber dem Vergleichsjahr 2019 angestiegen ist, der Masseanteil von Getränkekartons ist im Gegensatz dazu um 16,2% gesunken. Der Massenanteil von Flaschen ist ebenfalls angestiegen (7,0%). Betrachtet man jedoch lediglich Flaschen für Getränke, so ist deren Anteil um 58,7% abgesunken, was auf das Inkrafttreten der erweiterten Pfandpflicht im Jahr 2024 [12] zurückzuführen ist [10].

Beutel und Getränkekartons bestehen oft aus mehren Materialschichten. Für Beutel werden oft Multilayer-Kunststoffe (25,4 Masse-% aller Beutel) und für Getränkekartons Verbunde aus Papier und Kunststoff, z. T. mit Aluminium (83,2 Masse-% aller Getränkekartons) verwendet. Insgesamt ist der Anteil von Mulitlayer-LVP in der Studie 2024 um 12,7% angestiegen (vgl. Abbildung 2 mit 2V = Verbundmaterial aus zwei Werkstoffen, 3V = Verbundmaterial aus drei Werkstoffen). Weitere relevante Verschiebungen der Massenanteile wurden bei Weißblech (-7,5%) und Aluminium (+64,7%) beobachtet. Analog zum Rückgang der Getränkeverpackungen sind auch die Verbundmaterialien Papier/Kunststoff (-60,4%) und Papier/Kunststoff/

Aluminium (-12,4%) in der Gesamtzusammensetzung rückläufig. Auch nimmt der Einsatz von Kunststoff-Monomaterialien (PS, PET, PP, MPO) im Vergleich zur Verpackungsstudie 2019 um 7,4 % ab [10].

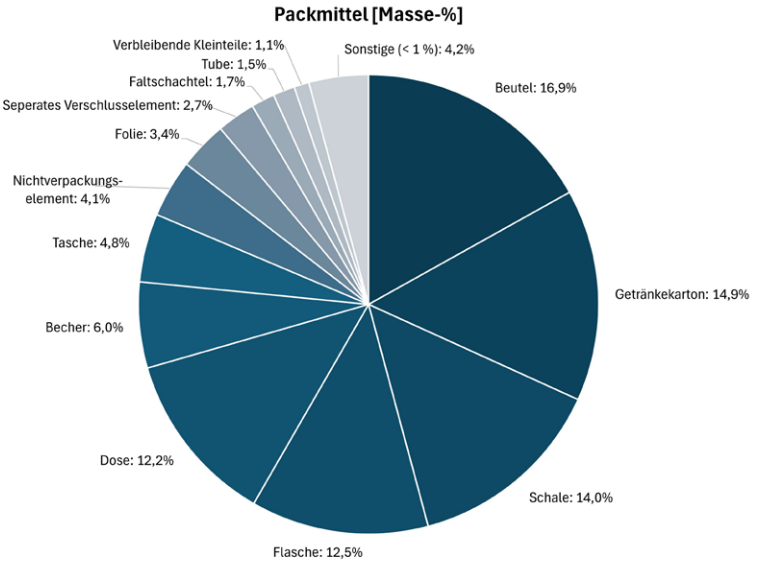


Abbildung 1: Packmittel nach Art des Packstoffes (Verpackungsstudie 2024) (Angaben in Masse-%)

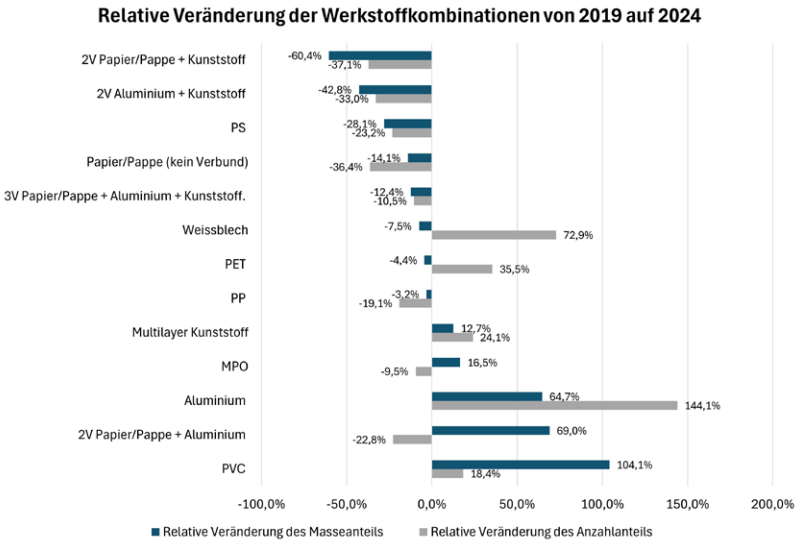


Abbildung 2: Relative Veränderung der Werkstoffkombinationen 2019 vs. 2024

4 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft sind detaillierte Informationen zu den Eigenschaften von Leichtverpackungsabfällen erforderlich. Da öffentlich verfügbare Daten bislang nur begrenzt vorliegen, führte die Hochschule Pforzheim 2024 bereits zum zweiten Mal eine bundesweite Untersuchung zu Post-Consumer-LVP-Eigenschaften durch. Sie wurden auf Basis von direkt in 277 deutschen Haushalten erfassten LVP erhoben und gemeinsam mit sozioökonomischen Informationen ausgewertet. Daneben erfolgte ein Vergleich der Verpackungsstudien aus 2019 und 2024: Im Vergleich zu 2019 zeigt sich eine Verschiebung zu besser rezyklierbaren Verpackungen wie Aluminium, während Verbundverpackungen zurückgehen. Hier zeigt der Mindeststandard zur Verpackungsgestaltung [9] bereits Wirkungen, aber auch Haushaltsmerkmale und Verhaltensmuster beeinflussen das Abfallaufkommen. Dennoch bleiben flexible und mehrschichtige Verpackungen kreislaufwirtschaftliche Herausforderungen. Insgesamt gibt es noch deutliches Potenzial für die kreislaufgerechte Verpackungsgestaltung, die Standardisierung von Verpackungen und gezielt auf Haushaltsstrukturen und Konsummuster abgestimmte Kommunikations- und Designstrategien.

Danksagung

Große Teile dieser Publikation basieren auf dem Forschungsvorhaben „präziSort – Entwicklung und Errichtung einer Pilotanlage mit integraler Detektion zur präzisen Einzelstreckensortierung von Kunststoffabfall und anderen Materialien“, gefördert durch das Land Baden-Württemberg (BW Invest, Fkz. BW1_2087/02). Ein herzlicher Dank gilt allen Studienteilnehmern und allen am Projekt beteiligten studentischen Hilfskräften.

Literatur/Quellen

[1] Conversio Market & Strategy GmbH (2024): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2023 - Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen, Mainaschaff, Germany.

[2] Umweltbundesamt (2025): Verpackungsabfälle. https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/verpackungsabfaelle#verpackungen-uberall Abgerufen am 18.12.2025.

[3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2017): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (VerpackG).

[4] Bauer, A.-S., Tacker, M., Uysal-Unalan, I., Cruz, R. M. S., Varzakas, T., & Krauter, V. (2021): Recyclability and Redesign Challenges in Multilayer Flexible Food Packaging—A Review. Foods, 10(11), Article 11. https://doi.org/10.3390/foods10112702

[5] Destatis (2024): Aufkommen an Haushaltsabfällen: Deutschland, Jahre, Abfallarten. https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/table/32121-0001. Abgerufen am 18.12.2025.

[6] Umweltbundesamt. (2022): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2022. Aufgerufen über https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/156_2024_texte_verpackungsabfaelle_2022.pdf

[7] Christiani, J. (2017): Recycling und Recyclingfähigkeit bei Verpackungen. Aufgerufen über https://www.bvse.de/images/pdf/Themen__Ereignisse/2017/1-Christiani_Stand_der_Technik_.pdf

[8] Christiani, J., & Beckamp, S. (2020): Was können die mechanische Aufbereitung von Kunststoffen und das werkstoffliche Recycling leisten? https://books.vivis.de/wp-content/uploads/2023/06/2020_EaA_139-152_Christiani.pdf
[9] ZSVR. (2025): Mindeststandard VerpackG. Verpackungsregister. Aufgerufen über https://www.verpackungsregister.org/stiftung-und-behoerde/mindeststandard
[10] Dubb, L, Auer, M, Galler, V, Woidasky, J (2026): Post-Consumer – Lightweight Packaging properties analysis in Germany 2019 vs 2024, Paper in preparation.
[11] 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.
[12] 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 18.12.2025.

Kontakt

M.Sc., Simon Eberle, wissenschaftlicher Mitarbeiter
Hochschule Pforzheim, Fakultät für Technik, Arbeitsgruppe Nachhaltige Produktentwicklung
Tel.-Nr. +49-7231-28-6433
E-Mail: simon.eberle@hs-pforzheim.de

Tommy Ender, Ralf Schefler, Elisa Uta Deiß, Cinthya Lara, Vicky Shettigondahalli Ekanthalu, Michael Nelles

Hydrothermale Karbonisierung (HTC) von Klärschlamm und nachfolgende aerobe mesophile Behandlung von HTC-Prozesswässern

***Abstract**: Die Hydrothermale Karbonisierung (HTC) ermöglicht die Verwertung wasserreicher Biomassen wie Klärschlamm ohne vorherige Trocknung. Dabei entstehen zum einem HTC-Kohle und zum anderen ein stark belastetes Prozesswasser (HTC-PW), das vor der Einleitung behandelt werden muss. Zur Bewertung der aeroben Biofilmbehandlung wurde HTC-PW aus Klärschlamm, das bei 180–220 °C erzeugt wurde, in einem mesophilen Biofilmreaktor untersucht. Analysiert wurden der Einfluss steigender organischer Beladungsraten (OLR) sowie das erreichbare biologische Abbaupotenzial. Im Langzeitbetrieb konnten bis zu 78 % des CSB bei einer maximalen OLR von 43 kg CSB m^{-3} d^{-1} entfernt werden. Optimal waren eine OLR von etwa 30–33 kg CSB m^{-3} d^{-1}. Die Ergebnisse zeigen, dass aerobe Biofilmverfahren gut zur Behandlung von verdünntem HTC-PW geeignet sind.*

1 Einleitung

Klärschlämme fallen als Abfälle aus der abgeschlossenen Abwasserbehandlung an. Im Jahr 2024 wurden in Deutschland rund 1,67 Mio. t TM (Trockenmasse) Klärschlamm erzeugt, wovon etwa 82 % thermisch verwertet wurden (DESTATIS, 2026). Seit der Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) im Jahr 2017 verschiebt sich die Verwertung zunehmend weg von der bodenbezogenen Nutzung hin zur thermischen Verwertung (DESTATIS, 2026).

Die Hydrothermale Karbonisierung (HTC) stellt eine alternative Verwertungsoption für wasserreiche Biomassen wie Klärschlamm dar. Sie ermöglicht eine direkte Verarbeitung ohne Vortrocknung. Bei 180–250 °C und 15–60 bar entsteht eine Suspension aus HTC-Kohle und HTC-Prozesswasser (HTC-PW) (Nicolae et al., 2020; Ender et al., 2023). Während die HTC-Kohle vielseitig nutzbar ist, weist das HTC-PW hohe organische Belastungen (CSB bis 72.300 mg l^{-1}, TOC bis 27.900 mg l^{-1}) sowie potenziell toxische und persistent organische Verbindungen auf (Aragón-Briceño et al., 2020; Usman, et al., 2019). Aufgrund der großen Mengen und strengen gesetzlichen Anforderungen ist eine effiziente und kostengünstige Aufbereitung des HTC-PW entscheidend für eine großtechnische Umsetzung der HTC-Technologie (Usman, et al., 2019; Reißmann et al., 2020).

Die aerobe biologische Behandlung von HTC-PW gewinnt zunehmend an Bedeutung (Blach und Engelhart, 2025), wurde jedoch bislang weniger untersucht als anaerobe biologische oder physikalisch-chemische Verfahren. Insbesondere aerobe Biofilmreaktoren wie MBBR, MABR oder BAR bieten robuste Alternativen zum klassischen Belebtschlammverfahren, SBR oder MBR ermöglichen hohe CSB-Reduktionen sowie simultane Nitrifikation/Denitrifikation (Chaali et al., 2018). Studien zeigen, dass insbesondere HTC-PW aus Klärschlamm hohe Stickstoffkonzentrationen aufweist (Aragón-Briceño et al., 2020; Usman, et al., 2019), was die biologische Behandlung zusätzlich herausfordert. Ziel der beschriebenen Untersuchungen war die Bewertung der grundsätzlichen Eignung eines aeroben Biofilmverfahrens zur Behandlung verdünnten HTC-

PW. Dabei wurde der Einfluss steigender organischer Beladungsraten (OLR) bei konstanter hydraulischer Verweilzeit (HRT), das erreichbare biologische Abbaupotenzial sowie mögliche Limitierungen analysiert.

2 Methodik

2.1 HTC-Versuche von Klärschlamm

Kommunaler Klärschlamm wurde aus einer Kläranlage in Mecklenburg-Vorpommern entnommen. Die Abwasserbehandlung bestand aus einem Sieb, einem Sand-/Fettabscheider, einer biologischen Phosphorentfernung, einem Belebtschlammverfahren zur biologischen Reinigung des Abwassers sowie einem nachgeschalteten Nachklärbecken. In der Schlammbehandlungslinie befanden sich statische Voreindicker, gefolgt von einer Schlammlagerung und einer Bandpresse, in der der Schlamm mit Eisenchloridsulfat/Aluminiumsulfat entwässert wurde. Die Kapazität der Kläranlage war für 14.000 EW ausgelegt, technologisch und genehmigt für 29.000 EW. Für die HTC-Versuche wurde Klärschlamm mit 16,80 % Trockensubstanz (TS) erzeugt. Dieser wurde dann in einem 42-Liter-Batch-Reaktor hydrothermal verarbeitet. Insgesamt wurden 10 kg Klärschlamm mit 6 kg Wasser gemischt und bei drei unterschiedlichen Temperaturen (180 °C, 200 °C und 220 °C) für jeweils 60 Minuten lang karbonisiert. Nach Abschluss der Reaktion und Abkühlung der Mischung wurde die resultierende HTC-Kohle-Suspension mit einem Büchnerfilter mechanisch entwässert, wobei pro Charge etwa 11–12 kg HTC-Prozesswasser gewonnen wurden. Dieses HTC-PW wurde dann in das Technikum für Abfallwirtschaft und Bioenergie der Universität Rostock transportiert, wo es in 10-Liter-Kanistern in einer Kühlzelle bei ca. 5 °C gelagert wurde.

2.2 Versuche zur aeroben biologischen Behandlung

Zur Untersuchung eines aeroben Biofilmverfahrens wurde im Technikum der Universität Rostock ein selbst gebauter Festbettreaktor (5,34 l) im Maßstab 1:20 nach DWA-A 281 betrieben. Der isolierte Reaktor stand in einem Klimaschrank, dessen Temperatur schrittweise von 20 °C auf 40 °C erhöht wurde. Ein Sieb auf dem Reaktor diente der gleichmäßigen Verteilung des verdünnten HTC-PW und dem Rückhalt überschüssiger Biomasse. Die Zufuhr und Rezirkulation erfolgten über zwei Peristaltikpumpen. Das System entsprach dem Funktionsprinzip eines Tropfkörpers: Das HTC-PW wurde über das Sieb verteilt, durchströmte die Füll- und Stützschicht und gelangte anschließend in die Auffangkammer und Zwischenklärstufe. Aufgrund des verkürzten Strömungswegs im Labormaßstab wurde die Rezirkulation auf 80 Zyklen pro Tag angepasst.

Als Füllmaterial diente gewaschene und gesiebte Lavaschlacke (8/16 mm bzw. 16/20 mm), um trotz des verkleinerten Maßstabs realistische Tropfen- und Strömungsverhältnisse zu gewährleisten. Der Reaktor wurde mit einem entsprechenden Inokulum aus einem kommunalen Tropfkörper beimpft und anschließend mit stark verdünntem HTC-PW betrieben. Die Startkonzentration lag bei 300 mg CSB l^{-1}.

Der Betrieb erfolgte quasi-kontinuierlich über mehr als 11 Wochen bei einer konstanten hydraulischen Verweilzeit von 1,07 h. Die organische Beladungsrate (OLR) wurde schrittweise erhöht, um eine sukzessive Anpassung der Mikroorganismen zu ermöglichen. Insgesamt wurden sechs Belastungsstufen mit unterschiedlichen OLR getestet. Es wurden weder zusätzliche Kohlenstoffquellen noch Nährstoffe dosiert. Die Verdünnung des HTC-PW erfolgte ausschließlich mit Trinkwasser. Der CSB und pH-Wert wurden alle zwei bis drei Tage, weitere Parameter wöchentlich analysiert. Temperatur und Pumpenbetrieb wurden kontinuierlich überwacht.

3 Ergebnisse

Diverse Vorversuche zeigten, dass der Biofilm mindestens vier Wochen benötigt, um sich an verdünntes HTC-PW zu adaptieren. Daher wurde die organische Beladungsrate (OLR) zunächst nur langsam erhöht. Bei einer OLR von 11,79 kg CSB m^{-3} d^{-1} erreichte der Reaktor in den ersten drei Wochen eine CSB-Reduktion von 70 %. Eine Temperaturerhöhung von 20 °C auf 30 °C verbesserte die Leistung, während eine weitere Steigerung auf 40 °C zu einem Rückgang der Abbauleistung führte. Nach Reduktion der Temperatur auf 30 °C und einer reduzierten OLR stabilisierte sich das System wieder. Mit steigender OLR bis 16,29 kg CSB m^{-3} d^{-1} wurden CSB-Abbauraten von knapp 80 % erzielt. Auch bei sehr hohen OLR bis 44,11 kg CSB m^{-3} d^{-1} blieb der CSB-Abbau mit durchschnittlich 77 % weitgehend konstant. Der verbleibende Anteil ist biologisch refraktär. Der TOC-Abbau lag im Mittel bei rund 78 % und entsprach damit den CSB-Ergebnissen. Flüchtige organische Säuren (VFA) wurden in allen Stufen bevorzugt und schnell eliminiert. Der Abbau der Säuren nahm jedoch mit steigender OLR ab, was auf einen zunehmenden Anteil schwer abbaubarer Kohlenstoffverbindungen hinweist. Besonders hervorzuheben ist die Stickstoffentfernung: NH_4-N wurde in den ersten fünf Belastungsstufen zu über 99 % nitrifiziert. Der Gesamtstickstoff (TN) wurde im Mittel um etwa 80 % reduziert, mit einem Maximum von 84 % bei einer OLR von 33,2 kg CSB m^{-3} d^{-1}. Dies bestätigt eine ausgeprägte simultane Nitrifikation/Denitrifikation (SND). Erst bei der höchsten OLR (43,63 kg CSB m^{-3} d^{-1}) sank die NH_4-N-Entfernung auf 89 % und die TN-Reduktion auf 79 %. Dieses Verhalten wird aufgrund limitierender Kohlenstoffverfügbarkeit für die Denitrifikation vermutet. Die nachfolgend Abbildung 1 stellt die Abbauraten von CSB, TOC, TC, TN, NH_4-N und VFA bei den verschiedenen OLR dar.

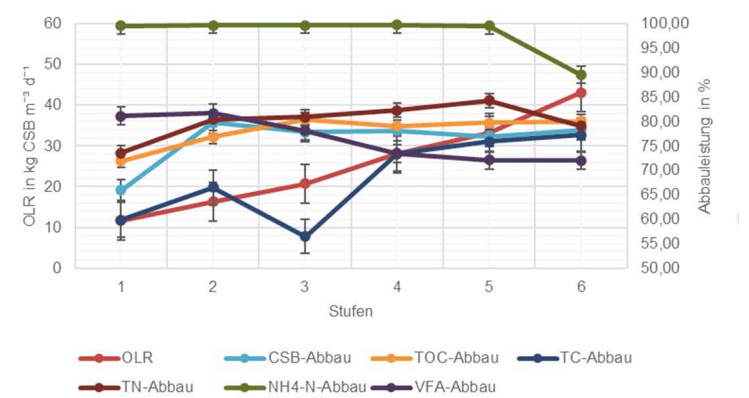


Abbildung 1: Abbauraten von CSB, TOC, TC, TN, NH_4-N und VFA bei verschiedenen OLR

4 Fazit

Die Technikumsversuche ergaben, dass sich das HTC-Prozesswasser aus der HTC von Klärschlamm gut aerob biologisch behandeln lässt. Das als Tropfkörper ausgeführte aerobe Biofilmverfahren eignete sehr gut zur Behandlung von verdünntem HTC-PW aus der HTC von Klärschlamm und bot eine effiziente Alternative zu herkömmlichen biologischen aeroben Verfahren (z.B. Belebtschlammverfahren, SBR oder MBR). Der biologisch abbaubare Anteil des organischen Kohlenstoffs wurde nahezu vollständig (TOC ~ 80 %) entfernt,

während der verbleibende Rest als refraktär einzustufen war. Die Analysen ließen weiterhin auf eine simultane Nitrifikation und Denitrifikation (SND) hindeuten, wobei der Gesamtstickstoff bis zu 84 % und NH_4-N bis zu 99 % reduziert wurden. Die Stickstoffumsetzung stellte bei steigender Belastung den limitierenden Prozessschritt dar, wobei ein optimaler Betriebsbereich bei etwa 30–33 kg CSB m^{-3} d^{-1} (ca. 1.475 mg l^{-1}) identifiziert wurde. Das in den Versuchen erprobte Biofilmverfahren könnte eine vielversprechende Rolle zur Vorbehandlung des HTC-PW spielen, wobei eine Hochskalierung des aeroben Biofilmverfahrens zur biologischen Behandlung von verdünntem HTC-PW den nächsten logischen Schritt darstellt.

Literatur/Quellen

Aragón-Briceño, C., Grasham, O., Ross, A., Dupont, V., & Camargo-Valero, M. (2020). Hydrothermal carbonization of sewage digestate at wastewater treatment works: Influence of solid loading on characteristics of hydrochar, process water and plant energetics. Renewable Energy(157), S. 959-973. doi:10.1016/j.renene.2020.05.021

Blach, T., & Engelhart, M. (2025). Limitations of treating hydrothermal carbonization process water in a membrane bioreactor and a sequencing batch reactor on pilot scale. . Journal of Environmental Chemical Engineering, 115304

Chaali, M., & Naghdi, M. B.-R. (2018). A review on the advances of nitrifying biofilm reactors and their removal rates in wastewater treatment. J Chem Technol Biotechnol, S. 3113–3124.

DESTATIS (2026). Entsorgungswege des Klärschlamms nach Bundesländern 2010, 2015 bis 2024

Ender, T., Shettigondahalli Ekanthalu, V., & Nelles, M. (2023). Hydrothermal carbonization of sewage sludge – an effective approach to treat and manage sewage sludge in rural areas of Germany. Detritus, 70–77.

Ender, T., Shettigondahalli Ekanthalu, V., Jalalipour, H., Sprafke, J., & Nelles, M. (2024). Process Waters from Hydrothermal Carbonization of Waste Biomasses like Sewage Sludge: Challenges, Legal Aspects, and Opportunities in EU and Germany. Water, S. 16(7):1003. doi:10.3390/w16071003

Nicolae, S., Au, H., Modugno, P., Luo, H., Szego, A., Qiao, M., . . . al., e. (2020). Recent advances in hydrothermal carbonisation: from tailored carbon materials and biochemicals to applications and bioenergy. Green Chem., S. 4747–4800

Reißmann, D., Thrän, D., Blöhse, D., & Bezama, A. (2020). Hydrothermal carbonization for sludge disposal in Germany: A comparative. J. Ind. Ecol(25), S. 720–734. doi:10.1111/jiec.13073

Usman, M., Chen, H., Chen, K., Ren, S., Clark, J., Fan, J., . . . Zhang, S. (2019). Characterization and utilization of aqueous products from hydrothermal conversion of biomass for bio-oil and hydro-char production: A review. Green Chem, 1553–1572

Kontakt

Tommy Ender (wissenschaftlicher Mitarbeiter)
Universität Rostock, Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft
Tel.-Nr. 0381 498-3417
E-Mail: tommy.ender@uni-rostock.de
Homepage: https://www.auf.uni-rostock.de/aw

Maike Hentschel

Impacts of Waste Charging Systems on Separately Collected Bio-waste: Insights from European Cities

***Abstract**: Bio-waste represents a substantial share of municipal waste in Europe and offers significant potential for recycling into high-quality soil improvers. The EU Waste Framework Directive mandates separate bio-waste collection from 2024 onwards and recommends economic instruments such as waste charges based on a Pay-As-You-Throw (PAYT) approach. While PAYT-based waste charges are well documented for waste reduction, evidence regarding their impacts on bio-waste separation remains limited. This study evaluates bio-waste collection practices and waste charging systems in 27 European municipalities using questionnaire data and secondary sources. Results indicate that municipalities applying PAYT generally achieve higher bio-waste capture rates than those using flat-fee systems, although population density and collection infrastructure strongly moderate outcomes. The findings underline the importance of combining economic instruments with infrastructure design, legislative regulation, and communication measures to achieve high-quality separate bio-waste collection.*

1 Introduction

Bio-waste accounts for approximately 34% of municipal waste generated in the European Union (EEA, 2020). When collected separately and treated appropriately, it can be recycled into compost or soil improvers, contributing to soil health, nutrient retention, and climate change mitigation (Gerwin et al., 2018; Panagos et al., 2024). Recognising this potential, the amended EU Waste Framework Directive (Directive (EU) 2018/851) requires Member States to ensure separate bio-waste collection since 2024 and encourages the use of economic instruments, including PAYT-based waste charges, to promote waste separation.

Municipalities play a key role in translating these requirements into practice. Waste charging systems, embedded in local waste governance, can function both as financing mechanisms and as behavioural incentives aligned with the Polluter-Pays Principle (Reichenbach, 2008). While the effectiveness of PAYT systems in reducing residual waste is widely supported (Allers & Hoeben, 2010; Bilitewski, 2008; Dijkgraaf & Gradus, 2005), their specific influence on the quantity and quality of separately collected bio-waste has received limited attention. This study addresses this gap by analysing waste charging systems and bio-waste outcomes in European municipalities.

2 Methodology

The study draws on a structured questionnaire completed by waste management authorities from 27 European municipalities, with a response rate of 35.5%. Municipalities were selected through professional networks, including the EU-funded Bin2Bean project. An emphasis was placed on selecting capital cities and larger urban areas in order to capture a range of operational challenges. Following classifications proposed by Lüssenhop et al. (2024), waste charging systems were categorised into four groups: ‘Flat-fee’ systems; ‘PAYT’ variants based on frequency, pre-paid bags or weight; ‘Flexible+’ systems based on container volume and collection frequency; and ‘Flexible’ systems based on container volume only.

3 Results

3.1 Bio-waste Collection and Charging Systems

Out of the 27 municipalities that participated in the study, 23 reported having separate bio-waste collection systems in place. Door-to-door collection via bins was the dominant approach, while a smaller number relied on bag-based systems or communal drop-off points. Waste charging systems varied widely: Six cities applied flat-fee systems, while 17 municipalities applied differentiated charges for residual waste with varying design and measurement approaches. In several municipalities, bio-waste collection was offered free of charge and financed through cross-subsidisation from residual waste fees.

Cities that charged via flat fees relied often on publicly accessible drop-off points. These patterns suggest that differentiated charging systems are more feasible when widespread, exclusive door-to-door collection of bio-waste is in place because it allows traceability and accountability for waste generated.

3.2 Quantity of Separately Collected Bio-Waste

Analysis of annual waste data reveals a clear performance gradient across charging types. Municipalities utilizing PAYT systems collected the highest average amount of bio-waste (115 kg/capita), while those with flat-fee systems collected the least (25 kg/capita) (see figure 1). Five of the six top-performing cities (Albano Laziale, Parma, Argentona, Turnhout, and Liechtenstein) utilize PAYT, frequently exceeding their residual waste quantities.

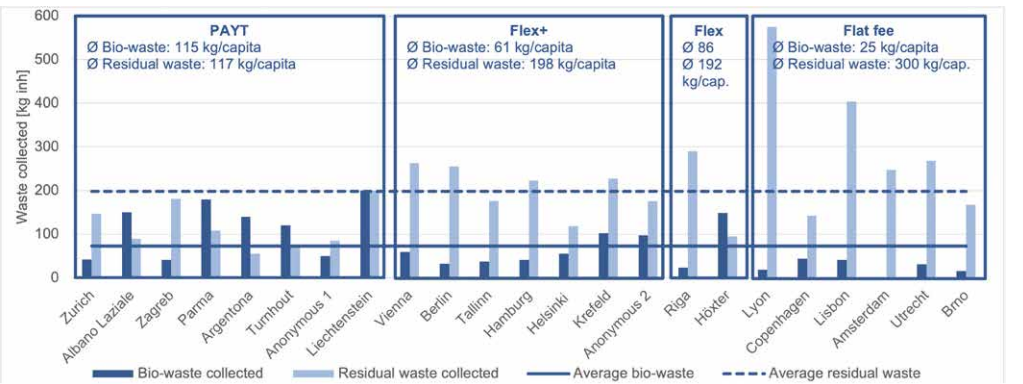


Figure 1: Charging system types and bio-waste quantities collected (compiled by the author)

However, the data highlights that infrastructure design can override financial incentives. For instance, Anonymous city 1 (PAYT) underperformed compared to its peers; this is attributed to its bag-based collection system, which is perceived as less convenient and more restrictive than permanent bins. Furthermore, a significant negative correlation ($r=-0.579$, $p=.004$) was found between population density and bio-waste quantities. All cities achieving above-average collection rates (including non-PAYT outliers like Höxter) had a population density below 2,000 inhabitants/km². In contrast, densely populated capitals often reported lower capture rates, likely due to physical space constraints for bins in multi-apartment buildings.

3.3 Quality of Bio-waste

Bio-waste quality data was limited, with only 11 cities providing numeric impurity rates. While the average impurity rate across these cities was approximately 2%, results varied significantly within charging groups. For example, within the PAYT group, Zurich (0.9%) and Argentona (1.25%) achieved high purity, whereas Zagreb reported 10–20% impurities, attributed to a reliance on unmonitored drop-off points and a relatively new collection system (established in 2019).

The findings suggest that institutional maturity and regulation are stronger predictors of quality than the charging system itself. High-performing cities like Hamburg and Vienna have operated city-wide collection for over 30 years, allowing for refined communication and logistics. Additionally, the consistently low impurity rates (2-3%) in German cities (Anonymous city 2, Hamburg, Berlin) likely reflect the impact of the German Bio-waste Ordinance's strict regulatory requirements rather than the specific charging mechanism.

3.4 Perceived Effectiveness and Satisfaction

Municipal satisfaction scores showed a stark contrast between charging types. On a 5-point scale, PAYT municipalities rated their systems most effective (4.1), followed by Flexible+ (3.7) and Flexible (3.5) systems. In contrast, flat-fee municipalities rated their systems' effectiveness at only 1.1, indicating a consensus that non-differentiated fees fail to incentivize sorting.

Despite the high satisfaction with PAYT, respondents emphasized that financial levers are not a panacea. Success was consistently attributed to a "policy mix" where charging is supported by frequent awareness campaigns and convenient infrastructure.

4 Discussion

The study confirms that differentiated charging, particularly PAYT, effectively increases bio-waste capture rates by raising the relative cost of residual waste disposal. However, findings from cities like Helsinki suggest that the "price effect" is often weakened when waste fees represent only a small fraction of total household expenses. Since population density was found to be a dominant factor, municipalities should adapt infrastructure to urban constraints by exploring access-controlled communal bins to reduce anonymity. Success relies on a "policy mix" where economic incentives are supported by high-convenience, door-to-door collection and mandatory service connection (Anschluss- und Benutzungszwang). To maintain high purity levels, direct feedback mechanisms such as Höxter's warning card system and regular communication interventions are recommended over purely financial penalties. Regulation also plays a critical role, as seen in how the German Bio-waste Ordinance (BioAbfV) enforces strict impurity thresholds regardless of the charging model. Furthermore, increasing broader economic levers like landfill and incineration taxes would enhance the comparative value of bio-waste recycling (Van Beukering et al., 2009). Ultimately, municipalities must transition from viewing waste charges as mere financing tools to utilizing them as strategic behavioral drivers within an integrated management framework.

5 Conclusion

This study shows that PAYT-based waste charging systems are generally associated with higher bio-waste capture rates across European municipalities. Nevertheless, achieving high-quality separate bio-waste collection requires more than financial incentives. Municipalities should adopt integrated strategies that com-

bine differentiated charging with convenient infrastructure, clear regulation, and regular communication. Future research should focus on harmonising bio-waste quality indicators and evaluating solutions for densely populated areas. As EU recycling targets tighten, understanding how economic instruments interact with local conditions will be crucial for advancing circular bio-waste management.

Acknowledgements

This research was done in cooperation with the EU-funded project Bin2Bean.

References

Allers, M. A.; Hoeben, C. (2010): Effects of unit-based garbage pricing: A differences-in-differences approach. Environmental and Resource Economics 45: 405–428.

Bilitewski, B. (2008): Pay-as-you-throw—A tool for urban waste management. Waste Management 28: 2759–2767.

Dijkgraaf, E.; Gradus, R. (2005): Efficiency effects of unit-based pricing systems and institutional choices of waste collection. Resource and Energy Economics 27: 292–315.

EEA (European Environment Agency) (2020): Bio-waste in Europe — Turning challenges into opportunities. Copenhagen, European Environment Agency.

Gerwin, W.; Repmann, F.; Galatsidas, S.; Vlachaki, D.; Gounaris, N.; Baumgarten, W.; Voland, S.; Emmerling, C.; Schöning, I.; Bodner, G.; Leitner, S.; Schleuß, P.-M.; Glæsner, N.; Tóth, G.; Hengl, T. (2018): Assessment and quantification of marginal lands for biomass production in Europe using soil-quality indicators. Soil 4: 267–290.

Lüssenhop, P.; Walk, S.; Körner, I. (2024): Abfall-Atlas: Bioabfall und Restmüll Deutschland 2022. Hamburg, Technische Universität Hamburg.

Panagos, P.; Ballabio, C.; Lugato, E.; Jones, A.; Borrelli, P.; Scarpa, S.; Montanarella, L. (2024): Soil carbon as a key element for climate mitigation in Europe. Science of the Total Environment 906: 167543.

Reichenbach, J. (2008): Status and prospects of pay-as-you-throw in Europe – A review of pilot research and implementation studies. Waste Management 28: 2753–2758.

Van Beukering, P.; Bartelings, H.; Linderhof, V.; Oosterhuis, F. (2009): Effectiveness of unit-based pricing of waste in the Netherlands. Resource and Energy Economics 31: 1–18.

Kontakt
Maike Hentschel (Masterstudentin)
Leuphana Universität Lüneburg
E-Mail: maike.hentschel@stud.leuphana.de

Leon Höhm

WIR! recyceln Fasern – Analyse von Marktbarrieren bei der Etablierung einer Kreislaufführung von Carbonfasern

***Abstract**: Carbonfasern (CF) bieten hohe Leistung bei geringem Gewicht und sind für zukunftsorientierte Branchen wie Luft- und Raumfahrt, Windenergie und Bauwesen von entscheidender Bedeutung. Die Etablierung eines Faserkreislaufs ist entscheidend, um Ressourcen zu schonen und Umweltauswirkungen zu reduzieren. Das Projekt WIR! recyceln Fasern untersucht in der Region Elbtal-Sachsen aktuelle Marktbarrieren für die Kreislaufführung von recycelten Carbonfasern (rCF). Mittels qualitativer Experteninterviews und einer PESTEL-basierten Inhaltsanalyse werden strukturelle, technologische, rechtliche und wirtschaftliche Hürden identifiziert. Ergebnisse zeigen komplexe Wechselwirkungen zwischen geringen Abfallmengen, fehlender Abfallschlüsselnummer, unzureichender Technologieentwicklung und geringer Marktnachfrage.*

1 Einleitung

Carbonfasern (CF) verfügen über vielfältige technische Eigenschaften. Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) weisen bei geringem Gewicht eine höhere Steifigkeit und Festigkeit als Stahl auf (Cardarelli, 2008). Diese Eigenschaften prädestinieren CFK insbesondere für den Einsatz in der Luft- und Raumfahrt, bei Windkraftanlagen und auch in der Baubranche (Lengsfeld et al., 2019). Diese technischen Eigenschaften sorgen unter anderem dafür, dass der Bedarf an CF weiterhin ansteigt (Sauer, 2025). Durch den Einsatz von CF – z.B. als Bewehrung im Beton – kann der Ressourceneinsatz verringert und die Lebensdauer von Gebäuden erhöht werden. Meng et al. konnten außerdem die Potentiale zur Kosteneinsparung und Reduktion negativer Umweltwirkungen von recycelten Carbonfasern (rCF) anhand verschiedener Studien in der Automobilindustrie und Luftfahrt (2020; 2018; 2017) offenlegen. Wie CF nach der Nutzungsphase in den Kreislauf zurückgeführt werden können, ist weiterhin aktueller Stand der Forschung. Das Ziel des Projektes WIR! recyceln Fasern ist die Etablierung eines Faserkreislaufs in der Projektregion Elbtal-Sachsen. Ein Teilaspekt dieses übergeordneten Ziels ist die Analyse und Überwindung von Marktbarrieren, die eine Kreislaufführung von CF erschweren oder verhindern. Zum Beispiel ist bislang noch keine getrennte Erfassung möglich, da eine entsprechende Abfallschlüsselnummer für CF nicht existiert (Burgstaller et al., 2023). Die Analyse soll dabei helfen konkrete Marktbarrieren der Gegenwart zu identifizieren um darauf aufbauend Handlungsempfehlungen für die Akteure der Projektregion zu geben. Fragestellungen sind somit: Welche aktuellen Marktbarrieren verhindern eine Kreislaufführung von Carbonfasern? – und – Wie können diese kategorisiert und überwunden werden? Zur Beantwortung der Fragestellungen werden qualitative Experteninterviews durchgeführt und mittels qualitativer Inhaltsanalyse ausgewertet.

2 Theoretischer Hintergrund

Die erste theoretische Grundlage für spätere Definitionen von Marktbarrieren legten Chamberlin (1933) und Robinson (1933) mit ihren Arbeiten zum unvollständigen Wettbewerb. Chamberlin beschreibt, wie Produktdifferenzierung und Markenloyalität etablierten Unternehmen langfristig Übergewinne ermöglichen und

neue Wettbewerber schwer in den Markt drängen können. Robinson beschreibt, dass Marktmacht durch strukturelle Hürden entsteht, die den Marktzutritt erschweren, z.B. durch einen hohen Kapitalbedarf bei neuen Wettbewerbern oder technologische Dominanz bei etablierten Unternehmen. Chamberlin und Robinson beschrieben, dass Märkte nicht automatisch perfekt sind, weil strukturelle und strategische Faktoren den Wettbewerb behindern. Während beide Werke die theoretischen Grundlagen für das Verständnis von Marktungleichgewichten schufen, prägte Bain (1956) erstmals den Begriff der Markteintrittsbarrieren. Bain analysierte empirisch, wie Skaleneffekte, Kapitalkosten und abschreckende Preissetzung verhindern, dass neue Anbieter in Märkte eintreten. Beispielsweise schützen in der Stahlindustrie die hohen Fixkosten etablierte Firmen vor neuen Wettbewerbern. Porter übernahm die Markteintrittsbarrieren als Teil seines Fünf-Kräfte-Modells (1980), mit welchen er den Wettbewerb in etablierten Märkten erklärt. Die fünf Kräfte sind die Verhandlungsmacht von Kunden, die Verhandlungsmacht von Lieferanten, die Bedrohung durch Substitute, die Bedrohung durch neue Wettbewerber und die Rivalität bestehender Unternehmen.

Die genannten Werke konzentrieren sich auf die Beschreibung von Marktbarrieren in etablierten Märkten, welche sich nur bedingt auf zirkuläre Geschäftsmodelle übertragen lassen. Die Märkte für zirkuläre Geschäftsmodelle müssen häufig erst noch geschaffen werden oder befinden sich in einem frühen Stadium. Dies trifft auch auf die Kreislaufführung von CF zu. Es gibt neuere Publikationen, die sich mit den Barrieren und Treibern speziell für zirkuläre Geschäftsmodelle beschäftigen (Geissdoerfer et al., 2023; Kirchherr et al., 2018; Ritzén & Sandström, 2017; Tura et al., 2019; Vermunt et al., 2019) bzw. mit den Herausforderungen zirkulärer Geschäftsmodellinnovationen (Bressanelli et al., 2019; Diaz Lopez et al., 2019; Santa-Maria et al., 2022). Die Quellen beschreiben Kategorien von Marktbarrieren für zirkuläre Geschäftsmodelle, die ähnlich der Kategorien einer PESTEL-Analyse sind. Die PESTEL-Analyse ist ein strategisches Werkzeug zur Analyse des Umfelds eines Unternehmens. PESTEL ist ein Akronym, gebildet aus den makroökonomischen Faktoren Political, Economic, Social, Technological, Ecological und Legal. Die Analyse soll Chancen und Risiken für ein Unternehmen aufdecken (Kaufmann, 2025, S. 19–27).

3 Methodik

Die Methodik kann in vier Schritte unterteilt werden. Zunächst wird mit einer Literaturrecherche die Wissensgrundlage zur Konzipierung des Interviewleitfadens geschaffen. Ebenso werden die in der Literatur bereits beschriebenen Marktbarrieren herausgearbeitet, sodass sie später mit den Ergebnissen der Interviews zusammengeführt werden können. Im zweiten Schritt werden neue Daten durch qualitative, semi-strukturierte Experteninterviews erhoben. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um das sich in einer frühen Phase befindende Geschäftsfeld strukturiert und explorativ zu erschließen. Der Interviewleitfaden ist dabei auf Basis einer PESTEL-Analyse konzipiert. Die PESTEL-Analyse ist ein vielgenutztes Instrument der Umfeldanalyse, und ihre Kategorien sind auch für die Kreislaufführung von CF relevant. Deswegen bilden ihre Kategorien die deduktiven Kategorien für die Auswertung im dritten Schritt. Die Auswertung erfolgt in einem zweistufigen Codierprozess. Deswegen werden nach der ersten Auswertung die Interviews induktiv codiert und ausgewertet. Das dient dazu, neue, im Material auftretende Aspekte zu identifizieren und das Kategoriensystem zu ergänzen. Im vierten und letzten Schritt werden die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche und den Interviews zusammengeführt. Dadurch soll die Relevanz der ermittelten Marktbarrieren sichergestellt werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

Beim Auswerten der Interviews lassen sich mögliche Wechselwirkungen zwischen den Marktbarrieren erkennen. Diese Wechselwirkung ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Geringe Abfallmengen (strukturelle Barriere) führen zu weniger Investitionsbereitschaft in die Etablierung einer Kreislaufführung. Das kann wiederum bedingen, dass die vorherrschenden Technologien nicht in dem Maße weiterentwickelt werden, dass CF in marktfähiger Qualität gesammelt und recycelt wird. Eine geringere Qualität recycelter gegenüber primärer CF, bei trotzdem hohen Kosten durch Energieverbrauch beim Recycling können zu einer verminderten Nachfrage führen. Ist das Marktvolumen noch nicht relevant und Technologien noch nicht ausgereift, so fehlen auch wichtige Argumente für die Erstellung einer Abfallschlüsselnummer. Eine eigene Abfallschlüsselnummer für carbonfaserhaltige Abfälle könnte dazu führen, dass größere Abfallmengen erfasst und im Kreislauf gehalten werden können.

Jedoch lässt sich auf der anderen Seite argumentieren, dass zunächst eine technologische, logistische sowie wirtschaftliche Perspektive für die Kreislaufführung von CF aufgezeigt werden muss, um die aufwendigen Prozesse zur Schaffung eines regulatorischen Rahmens auf den Weg zu bringen. Wie diese Marktbarrieren überwunden werden können, ist Teil der weiteren Bearbeitung dieses Themas.

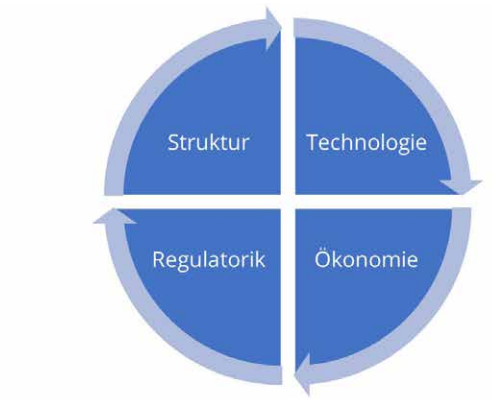


Abbildung 1: Wechselwirkung identifizierter Marktbarrieren für die Kreislaufführung von Carbonfasern

Literatur/Quellen

Bain, J. S. (1956). Barriers to New Competition: Their Character and Consequences in Manufacturing Industries. Harvard University Series on Competition in American Industry: Bd. 3. Harvard University Press. https://www.degruyterbrill.com/isbn/9780674188037 https://doi.org/10.4159/harvard.9780674188037

Bressanelli, G., Perona, M. & Saccani, N. (2019). Challenges in supply chain redesign for the Circular Economy: a literature review and a multiple case study. International Journal of Production Research, 57(23), 7395–7422. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1542176

Burgstaller, M., Frick, F., Potrykus, A., Schramm, B., Strauss, F., Scheer, S., Link, F., Behringer, K., Pfuhl, W., Schlenga, R., Brantsch, P., Menrath, A., Müller, T., Nieberl, M., Hofmann, A., Reh, K. & Weißhaupt, P. (2023). Digital Kreisläufe schließen am Beispiel des Recyclings von Sportbooten, Leichtflugzeugen

sowie Bedarfsgegenständen aus Faserverbundwerkstoffen Abschlussbericht: Texte / Umweltbundesamt ; 2023, 93. Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Umweltbundesamt.

Cardarelli, F. (2008). Materials handbook: A concise desktop reference (2. ed.). Springer.

Chamberlin, E. H. (1933). The Theory of Monopolistic Competition: A Reorientation of the Theory of Value. Harvard University Press (Cambridge, Massachusetts).

Diaz Lopez, F. J., Bastein, T. & Tukker, A. (2019). Business Model Innovation for Resource-efficiency, Circularity and Cleaner Production: What 143 Cases Tell Us. Ecological Economics, 155, 20–35. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.03.009

Geissdoerfer, M., Santa-Maria, T., Kirchherr, J. & Pelzeter, C. (2023). Drivers and barriers for circular business model innovation. Business Strategy and the Environment, 32(6), 3814–3832. https://doi.org/10.1002/bse.3339

Kaufmann, T. (2025). Strategiewerkzeuge aus der Praxis: Band 1: Analyse und Beurteilung der strategischen Ausgangslage (2., aktualiserte Auflage). Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-662-69887-7

Kirchherr, J., Piscicelli, L., Bour, R., Kostense-Smit, E., Muller, J., Huibrechtse-Truijens, A. & Hekkert, M. (2018). Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU). Ecological Economics, 150, 264–272. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028

Lengsfeld, H., Mainka, H. & Altstädt, V. (2019). Carbonfasern: Herstellung, Anwendung, Verarbeitung. Hanser.

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, 200, 108362. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108362

Meng, F., McKechnie, J. & Pickering, S. J. (2018). An assessment of financial viability of recycled carbon fibre in automotive applications. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 109, 207–220. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.03.011

Meng, F., McKechnie, J., Turner, T., Wong, K. H. & Pickering, S. J [Stephen J.] (2017). Environmental Aspects of Use of Recycled Carbon Fiber Composites in Automotive Applications. Environmental science & technology, 51(21), 12727–12736. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04069

Porter, M. E. (1980). Industry Structure and Competitive Strategy: Keys to Profitability. Financial Analysts Journal(vol. 36, No. 4), 30–41. https://www.jstor.org/stable/4478361

Ritzén, S. & Sandström, G. Ö. (2017). Barriers to the Circular Economy – Integration of Perspectives and Domains. Procedia CIRP, 64, 7–12. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.005

Robinson, J. (1933). The Economics of Imperfect Competition. Macmillan and Co. (London).

Santa-Maria, T., Vermeulen, W. J. V. & Baumgartner, R. J. (2022). How do incumbent firms innovate their business models for the circular economy? Identifying micro-foundations of dynamic capabilities. Business Strategy and the Environment, 31(4), 1308–1333. https://doi.org/10.1002/bse.2956

Sauer, M. (2025). Marktbericht 2024: Der Globale Markt für Carbonfasern und Carbon Composites [Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen - frei zugängliche Kurzfassung -]. https://composites-united.com/wp-content/uploads/2025/03/CU-Marktbericht_2024_GER_Kurzfassung.pdf

Tura, N., Hanski, J., Ahola, T., Ståhle, M., Piiparinen, S. & Valkokari, P. (2019). Unlocking circular business: A framework of barriers and drivers. Journal of Cleaner Production, 212, 90–98. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.202

Vermunt, D. A., Negro, S. O., Verweij, P. A., Kuppens, D. V. & Hekkert, M. P. (2019). Exploring barriers to implementing different circular business models. Journal of Cleaner Production, 222, 891–902. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.052

Kontakt

Leon Höhm, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Technische Universität Dresden / Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft
Tel.-Nr. +49 351 46344129
E-Mail: leon.hoehm1@tu-dersden.de

Lívia Hökl, Anke Bockreis

Entwicklung einer maßgeschneiderten Methode zur Detektion und Validierung von PFAS in biogenen Abfallströmen

***Abstract**: Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind aufgrund ihrer Persistenz, Mobilität und Toxizität eine zunehmende Herausforderung für die Kreislaufwirtschaft und die biologische Abfallbehandlung. Trotz ihrer wachsenden Relevanz in der Abfallwirtschaft fehlen derzeit harmonisierte und matrixgeeignete Analysemethoden zur zuverlässigen Bestimmung von PFAS in Bioabfällen. In diesem Dissertationsprojekt wird daher eine analytische Methode entwickelt und etabliert, die die Quantifizierung relevanter PFAS-Verbindungen in heterogenen Bioabfallmatrizes ermöglicht. Ergänzend dazu werden die PFAS-Konzentrationen in den Input- und Outputströmen biologischer Behandlungsanlagen systematisch erfasst. Die resultierenden Daten sollen eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die Bewertung potenzieller Risiken, die Optimierung bestehender Prozesse und die Entwicklung von Strategien zur Reduzierung von PFAS in biogenen Materialien bieten. Die Arbeit leistet somit einen zentralen Beitrag zur sicheren Ressourcennutzung in einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft.*

1 Einleitung

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) bilden eine umfangreiche Stoffgruppe mit mehreren Tausend bekannten Verbindungen. Sie finden seit Jahrzehnten breite Anwendung in der industriellen Produktion und in Konsumgütern (Clara et al., 2008). Aufgrund ihrer chemischen Stabilität, ihrer wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften sowie ihrer Beständigkeit gegenüber Abbauprozessen (Al Amin et al., 2020) werden PFAS in zahlreichen Produkten verwendet, beispielsweise in Textilien, Lebensmittelverpackungen, Kochgeschirr, Reinigungsmitteln, Feuerlöschschäumen, Kosmetika und Pflanzenschutzmitteln (Bolan et al., 2021). Diese weitverbreitete Nutzung führt zu einem kontinuierlichen Eintrag in Abfall- und Umweltkompartimente (Lenka et al., 2021; Stoiber et al., 2020).

PFAS-haltige Abfälle stellen sowohl technisch als auch ökologisch erhebliche Herausforderungen dar, da ihre Entfernung und Zerstörung durch die chemische Stabilität, die hydrophoben Eigenschaften und die strukturelle Vielfalt der Verbindungen deutlich erschwert wird. Konventionelle Behandlungsverfahren tragen nur begrenzt zur Reduktion der PFAS-Belastung bei (Meegoda et al., 2022; Tavasoli et al., 2021), während thermische Verfahren derzeit die einzige verlässliche Option zur vollständigen Zerstörung darstellen (Gehrmann et al., 2024).

Klassische PFAS-Quellen wie Feuerwehrübungsplätze, Abwässer oder Klärschlämme (Gallen et al., 2018; Hamid et al., 2018; Link et al., 2024) stehen bereits seit Längerem im Fokus von Forschung und Regulierung, wohingegen die Kenntnisse über das Vorkommen und das Verhalten von PFAS in Bioabfällen noch begrenzt sind. Über den Gebrauch von PFAS-haltigen Produkten gelangen diese Substanzen indirekt in die getrennt gesammelten Bioabfälle (z. B. Lebensmittelverpackungen, Grünschnitt oder Lebensmittelreste), die anschließend einer biologischen Behandlung zugeführt werden (Lazcano et al., 2020; Thakali et al., 2022; Wang et al., 2024). Biogene Abfälle sind eine bedeutende Ressource in der Kreislaufwirtschaft, da sie in energetische und stoffliche Verwertungsprozesse eingebracht werden können. Die daraus entstehenden Komposte und Gärprodukte werden häufig als Düngemittel oder Bodenverbesserer in der Landwirt-

schaft eingesetzt. Zugleich können persistente organische Kontaminanten wie PFAS in diesen Produkten verbleiben (Brändli et al., 2006; Kupper et al., 2006; Timshina et al., 2024) und so potenziell in landwirtschaftlich genutzte Böden und damit langfristig in die Umwelt gelangen (DeSilva et al., 2021; Pozzebon & Seifert, 2023; Saliu & Sauvé, 2024).

Vor diesem Hintergrund befasst sich das vorliegende Projekt mit der Entwicklung eines analytischen Verfahrens zur quantitativen Erfassung von PFAS. Das Ziel besteht darin, fundierte Daten bereitzustellen, die zur Bewertung von PFAS in biogenen Abfallströmen beitragen und eine Grundlage für künftige Monitoring- und Regulierungsstrategien in der Kreislaufwirtschaft schaffen.

2 Methodik

2.1 Analytisches Konzept

Die methodische Entwicklung umfasst die Erarbeitung eines standardisierten Arbeitsablaufs von der repräsentativen Probenahme über die, auf die komplexe Matrix abgestimmte Probenvorbereitung bis hin zur instrumentellen Analyse. Hauptverfahren sind die Festphasenextraktion (SPE) zur Aufreinigung und Anreicherung der Probe sowie die Hochleistungsflüssigkeitschromatographie mit gekoppelter Tandem-Massenspektrometrie (HPLC-MS/MS) zur Detektion und Quantifizierung. Der Fokus liegt auf der Anpassung der Extraktions- und Messparameter an variable, organisch komplexe Matrizes wie Bioabfall und Kompost. Ein besonderes Augenmerk gilt der Minimierung von Matrixeffekten, der Auswahl geeigneter Isotopenstandards und der Festlegung qualitätssichernder Kontrollschritte.

Im Rahmen einer geplanten Messkampagne sollen die biogenen Abfallströme entlang des Behandlungsprozesses systematisch untersucht werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Erfassung und Bewertung von PFAS in den verschiedenen Prozessstufen biologischer Abfallbehandlungsanlagen. Zunächst werden die Inputmaterialien charakterisiert, um potenzielle Eintragsquellen von PFAS zu identifizieren und um ein Verständnis für die Bandbreite möglicher PFAS-Gehalte bereits im Eingangsmaterial zu erlangen. Auch die PFAS-Konzentrationen in den Outputströmen werden analysiert. Dabei wird untersucht, in welchem Ausmaß PFAS in die erzeugten Produkte, wie Komposte oder Gärreste, übergehen.

Abbildung 1: Schema der geplanten Untersuchungen mittels SPE-Extraktion und HPLC-MS/MS-Analyse

2.2 Datenverarbeitung und Qualitätssicherung

Für die Auswertung werden Kriterien der analytischen Qualitätssicherung herangezogen, zu denen unter anderem Bestimmungs- und Nachweisgrenzen, Wiederfindungsraten, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Matrizes gehören. Diese Parameter sollen bereits zu Beginn der Methodenoptimierung ermittelt werden, um die Übertragbarkeit der Methode auf verschiedene biogene

Stoffströme sicherzustellen. Mithilfe systematischer Laborversuche mit bekannten Standards und Referenzmaterialien soll eine umfassende Validierung der Methode erreicht werden.

3 Zielsetzung und Ausblick

Das Projekt befindet sich noch in der Anfangsphase. Das Ziel besteht in der Entwicklung einer praxistauglichen Methode zur Detektion von PFAS in biogenen Abfallströmen, die sich für Routineuntersuchungen sowie für Forschungs- und Monitoringzwecke eignet. Die Ergebnisse der Messkampagne sollen das Verständnis für die Verteilung und Persistenz von PFAS in biologischen Prozessen verbessern. Zudem sollen sie als Grundlage für weiterführende Bewertungen in der Abfallwirtschaft dienen. Langfristig soll die Methode dazu beitragen, Eintragspfade zu identifizieren und Maßnahmen zur Reduktion von PFAS im Stoffkreislauf abzuleiten.

Danksagung

Das Dissertationsprojekt (FFG-Projektnummer: FO999922979) wird im Rahmen des Dissertationsprogramms für Tiroler Hochschulen vom Land Tirol gefördert und von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt. Ein besonderer Dank gilt der Innsbrucker Kommunalbetriebe AG (IKB), deren engagierte Kooperation und fachliche Expertise wesentlich zur Umsetzung des Projekts beitragen.

Literatur/Quellen

Al Amin, M., Sobhani, Z., Liu, Y., Dharmaraja, R., Chadalavada, S., Naidu, R., Chalker, J. M., & Fang, C. (2020). Recent advances in the analysis of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)—A review. *Environmental Technology & Innovation*, *19*, 100879. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100879

Bolan, N., Sarkar, B., Vithanage, M., Singh, G., Tsang, D. C. W., Mukhopadhyay, R., Ramadass, K., Vinu, A., Sun, Y., Ramanayaka, S., Hoang, S. A., Yan, Y., Li, Y., Rinklebe, J., Li, H., & Kirkham, M. B. (2021). Distribution, behaviour, bioavailability and remediation of poly- and per-fluoroalkyl substances (PFAS) in solid biowastes and biowaste-treated soil. *Environment International*, *155*, 106600. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106600

Brändli, R. C., Bucheli, T. D., & Kupper, T. (2006). *Organic pollutants in source-separated compost*. http://chm.pops.int/portals/0/docs/from_old_website/documents/meetings/poprc/submissions/annexf_2007/br%c3%a4ndli%20et%20al%20organohalogen%20compounds%2068.%20swiss.pdf

Clara, M., Scheffknecht, C., Scharf, S., Weiss, S., & Gans, O. (2008). Emissions of perfluorinated alkylated substances (PFAS) from point sources--identification of relevant branches. *Water science and technology, a journal of the International Association on Water Pollution Research*, *58*(1), 59–66. https://doi.org/10.2166/wst.2008.641

DeSilva, A. O., Armitage, J. M., Bruton, T. A., Dassuncao, C., Heiger-Bernays, W., Hu, X. C., Kärrman, A., Kelly, B., Ng, C., Robuck, A., Sun, M., Webster, T. F., & Sunderland, E. M. (2021). PFAS Exposure Pathways for Humans and Wildlife: A Synthesis of Current Knowledge and Key Gaps in Understanding. *Environmental toxicology and chemistry*, *40*(3), 631–657. https://doi.org/10.1002/etc.4935

Gallen, C., Eaglesham, G., Drage, D., Nguyen, T. H., & Mueller, J. F. (2018). A mass estimate of perfluoroalkyl substance (PFAS) release from Australian wastewater treatment plants. *Chemosphere*, *208*, 975–983. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.024

Hamid, H., Li, L. Y., & Grace, J. R. (2018). Review of the fate and transformation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfills. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, *235*, 74–84. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.030

Kupper, T., C. Brändli, R., & D. Bucheli, T. (2006). *Organic pollutants in compost and digestate: occurrence, fate and impacts*. https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=12f7706dad5d565dab5ccade1c14597bf125e7fb

Lazcano, K. R., Choi, Y. J., Mashtare, M. L., & Lee, L. S. (2020). Characterizing and Comparing Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Commercially Available Biosolid and Organic Non-Biosolid-Based Products. *Environmental Science & Technology*, *54*(14), 8640–8648. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07281

Lenka, S. P., Kah, M., & Padhye, L. P. (2021). A review of the occurrence, transformation, and removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment plants. *Water Research*, *199*, 117187. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117187

Link, G. W., Reeves, D. M., Cassidy, D. P., & Coffin, E. S. (2024). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in final treated solids (Biosolids) from 190 Michigan wastewater treatment plants. *Journal of Hazardous Materials*, *463*, 132734. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132734

Meegoda, J. N., Bezerra de Souza, B., Casarini, M. M., & Kewalramani, J. A. (2022). A Review of PFAS Destruction Technologies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(24), 16397. https://doi.org/10.3390/ijerph192416397

Pozzebon, E. A., & Seifert, L. (2023). Emerging environmental health risks associated with the land application of biosolids: a scoping review. *Environmental Health*, *22*(1), 57. https://doi.org/10.1186/s12940-023-01008-4

Saliu, T. D., & Sauvé, S. (2024). A review of per- and polyfluoroalkyl substances in biosolids: geographical distribution and regulations. *Frontiers in Environmental Chemistry*, *5*. https://doi.org/10.3389/fenvc.2024.1383185

Stoiber, T., Evans, S., & Naidenko, O. V. (2020). Disposal of products and materials containing per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A cyclical problem. *Chemosphere*, *260*, 127659. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127659

Tavasoli, E., Luek, J. L., Malley, J. P., & Mouser, P. J. (2021). Distribution and fate of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment facilities. *Environmental Science: Processes & Impacts*, *23*(6), 903–913. https://doi.org/10.1039/d1em00032b

Thakali, A., MacRae, J. D., Isenhour, C., & Blackmer, T. (2022). Composition and contamination of source separated food waste from different sources and regulatory environments. *Journal of Environmental Management*, *314*, 115043. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115043

Timshina, A. S., Robey, N. M., Oldnettle, A., Barron, S., Mehdi, Q., Cerlanek, A., Townsend, T. G., & Bowden, J. A. (2024). Investigating the sources and fate of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in food waste compost. *Waste Management*, *180*, 125–134. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.03.026

Wang, X., Huang, X., Zhi, Y., Liu, X., Wang, Q., Yue, D., & Wang, X. (2024). Leaching of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from food contact materials with implications for waste disposal. *Journal of Hazardous Materials*, *479*, 135658. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135658

Kontakt

Lívia 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

Carmen Beisswanger, Claus Lang-Koetz, Ulrich Hutschek, Marius Heil, Alexandra Wolf, Natalie Käser, Nisha Anders

Circular Economy-Potenziale für produzierende Unternehmen in der Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken

***Abstract**: Die Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken steht durch den Wandel von der Automobil- zur Mobilitätswirtschaft unter hohem Anpassungsdruck. Circular Economy (CE) bietet Potenziale zur Reduktion von Ressourcenrisiken, zur Stärkung der Resilienz und zum Aufbau neuer Wertschöpfung, wird jedoch oft durch mangelnde Transparenz, fehlende Partnerlogiken und geringe Priorisierung gebremst. Der Beitrag stellt ein anwendungsorientiertes Vorgehen vor, das regionale CE-Potenziale systematisch identifiziert und in umsetzungsnahe Pilotpfade überführt. Kombiniert werden eine KI-gestützte Analyse von rund 800 regionalen Unternehmen auf Basis öffentlicher Websignale, eine Cluster- und Matching-Logik entlang potenzieller Output-zu-Input-Ketten sowie eine wissenschaftsbasierte Trend- und Technologieanalyse. Die Ergebnisse werden in vier Bausteinen verdichtet: Status quo relevanter Materialfelder und Akteure, Zielbild zentraler CE-Trends, Gap-Analyse der Umsetzungshemmnisse und eine Roadmap priorisierter Pilotpfade. Der Beitrag zeigt datengetriebene Ansatzpunkte für regionale Kreisläufe und benennt Voraussetzungen für deren Skalierung.*

1 Einleitung

Die Wirtschaftsregion Heilbronn-Franken weist eine hohe industrielle Dichte und Fertigungstiefe auf, insbesondere in den Bereichen Metall, Kunststoff, Chemie und Elektronik. Zugleich ist sie durch Automobil- und Zulieferstrukturen stark von der Transformation hin zur Elektromobilität und zur Mobilitätswirtschaft betroffen. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche konkreten Chancen die Circular Economy (CE) regionalen Unternehmen bietet und wie sich diese in umsetzbare Initiativen überführen lassen. In der Praxis ist der Einstieg in CE weniger ein Erkenntnis- als ein Umsetzungsproblem: Zwar ist das Thema präsent, doch fehlen häufig (i) Transparenz über relevante Material- und Wertschöpfungsbezüge, (ii) belastbare Prioritäten sowie (iii) die Übersetzung in Pilotvorhaben (Hina et al., 2022; Corvellec et al., 2022). Der Beitrag adressiert diese Lücke durch ein kombiniertes Vorgehen aus datengetriebener regionaler Unternehmensanalyse, wissenschaftsbasierter Trend- und Technologieanalyse und einer strukturierten Verdichtung zu priorisierten Handlungsfeldern.

2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Ziel der Arbeit ist es, CE-Potenziale für produzierende Unternehmen in Heilbronn-Franken sichtbar zu machen und in umsetzungsnahe Schritte zu überführen. Im Zentrum stehen drei Fragen:

1. Status quo: Welche CE-relevanten Merkmale lassen sich in der regionalen Unternehmenslandschaft erkennen und wie verteilt sich dies über zentrale Material- und Themenfelder?
2. Potenziale: Welche Kreislaufchancen ergeben sich aus dem regionalen „Ökosystemblick“, v.a. dort, wo Abfälle/Nebenprodukte eines Unternehmens als Input eines anderen dienen können?

3. Priorisierung: Welche Handlungsfelder und Pilotpfade sind – unter den Bedingungen von Transformation, Ressourcenrisiken und Marktanforderungen – vorrangig?

3 Methodik

Das Vorgehen kombiniert quantitative und qualitative Bausteine und führt sie über eine strukturierte Bewertungslogik zusammen.

3.1 Datengetriebene regionale Unternehmensanalyse

Als Grundlage dient ein Verzeichnis von rund 800 als relevant identifizierten Unternehmen aus der Region. Die Datenerhebung erfolgt mittels automatisierter Website-Analyse (Crawler), die Inhalte erschließt und thematisch relevante Textpassagen identifiziert. Die Informationen werden in einer projektspezifischen Datenbasis gespeichert und anschließend durch KI-Modelle klassifiziert; Synonyme und Mehrdeutigkeiten werden dabei über semantische Vektorrepräsentationen berücksichtigt. Ergebnis ist ein strukturiertes Unternehmensabbild, u.a. mit vermutetem Produktionsinput und potenziellen Abfall- und Nebenprodukten.

3.2 Clusterbildung und Matching entlang von Output-Input-Ketten

Für die Entwicklung eines CE-Ökosystemblicks werden zwei Datenquellen zusammengeführt: Produktionsinputs und Abfall-/Nebenprodukte. Auf beiden Seiten werden Cluster gebildet (z. B. Materialgruppen und typische Stoffkonfigurationen). Anschließend werden potenzielle Verknüpfungen („Matches“) zwischen Abfall-/Nebenprodukt-Clustern und Input-Clustern berechnet. Die Logik nutzt eine tokenbasierte Auswertung und bewertet die Verknüpfungen über eine Matching-Intensität, die (vereinfacht) aus inhaltlicher Überschneidung und Vernetzung der Cluster abgeleitet wird. Damit lassen sich regionale Stoffkreisläufe priorisieren (Qualität, Mengen, Logistik, rechtliche Anforderungen).

3.3 Trend- und Technologieanalyse aus wissenschaftlicher Literatur

Ergänzend zur regionalen Sicht wird eine Trend- & Technologieanalyse durchgeführt, die auf wissenschaftlichen Veröffentlichungen basiert. Datengrundlage ist OpenAlex (über 240 Mio. Einträge), aus der über ein Suchprofil relevante Dokumente ab 2015 identifiziert und als Korpus geladen werden; im vorliegenden Projekt wurden 1.354 wissenschaftliche Veröffentlichungen ausgewertet. Die Inhalte werden über kontextsensitive Sprachmodelle semantisch repräsentiert, hierarchisch geclustert und über Zeitverläufe hinsichtlich Trenddynamik analysiert. In der Auswertung wurden 14 Technologie-Hauptcluster identifiziert; zusätzlich werden Anwendungscluster genutzt, um zu zeigen, wo diese Technologien in CE-Kontexten wirken.

3.4 Qualitative Validierung und strategische Verdichtung

Die datengetriebenen Ergebnisse werden durch leitfadengestützte Expert*inneninterviews kontextualisiert und in einer erweiterten SWOT-Logik verdichtet (Helms & Nixon, 2010). Interne Stärken/Schwächen der Region werden mit externen Chancen/Risiken (z. B. Markt, Technologie, Regulierung) verknüpft, gewichtet und in strategische Optionen übersetzt (z. B. Maßnahmenpakete und Pilotpfade).

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in vier Bausteinen dargestellt:

4.1 Status-quo-Bild: Materialfelder und regionale Ausgangslage

Die regionale Analyse zeigt eine ausgeprägte industrielle Vielfalt als gute Grundlage für zirkuläre Wertschöpfung. In der Clusterung wurden fünf zentrale Materialfelder identifiziert: Metall, Kunststoff, Chemie, Elektronik und Verpackung. Besonders hohe Potenziale bestehen bei Metall- und Kunststoffabfällen. Insgesamt ergibt sich eine Potenzialquote von rund 60 %: Ein großer Teil der betrachteten Materialströme ist stofflich oder prozesstechnisch grundsätzlich wiederverwendbar. Auch zeigen sich clusterübergreifende Synergien, v.a. zwischen Metall-, Kunststoff- und Verpackungsindustrie.

4.2 Zielbild/Benchmarking: Technologie- und Anwendungstrends

Die wissenschaftsbasierte Trendanalyse macht sichtbar, welche Themen in der Automobil- bzw. Mobilitätsindustrie CE-relevant an Bedeutung gewinnen. Als zentrale Trendfelder werden Künstliche Intelligenz, nachhaltige Materialien und digitale Elektromobilität herausgearbeitet. Beispielhaft wird „Electric Vehicle Battery Lifecycle Management and Repurposing“ als Wachstumstrend beschrieben, der Second-Life-Anwendungen, Zustandsdiagnostik und digitale Plattformen für Logistik und Vermarktung adressiert (Illa Font et al., 2023; Regulation (EU) 2023/1542). Es wurden 14 Technologie-Hauptcluster identifiziert; die Ergebnisse wurden entlang von Anwendungsclustern strukturiert, um regionale Relevanzpfade abzuleiten.

4.3 Gap-Bild: zentrale Lücken und Transformationsrisiken

Trotz guter industrieller Voraussetzungen zeigen die Befunde mehrere Engpässe, die die Realisierung regionaler Kreisläufe erschweren. Hervorgehoben werden: starke Abhängigkeit vom Verbrenner-Segment sowie fragmentierte Cluster- und Datenstrukturen. Zudem wird ein Transformationsindex berichtet: rund 45–50 % der Zulieferer befinden sich bereits in oder auf dem Weg zur Elektromobilität, während rund 40 % stark im Verbrennergeschäft verharren. Diese Struktur ist für CE doppelt relevant: Sie beeinflusst (i) das Tempo, um neue Wertschöpfung aufzubauen, und (ii) das Risiko bzgl. Rohstoff-, Energie- und Nachfragevolatilität.

4.4 Roadmap: priorisierte Handlungsfelder und Pilotpfade

Aus der Verdichtung der internen und externen Sicht ergeben sich vier strategische Leitlinien für die Region: (1) lokale Stoff- und Energiekreisläufe stärken, (2) Daten und Plattformen als Voraussetzung für Skalierung aufbauen, (3) Transformationsrisiken aktiv steuern, (4) Kooperation und Governance als CE-Erfolgsfaktor etablieren. Daraus werden Pilotpfade abgeleitet, die insbesondere zwei Zielrichtungen adressieren: (1) Ökosystem-Piloten entlang konkreter Stoffketten, um die identifizierten Matches praktisch zu prüfen und zu skalieren. (2) Befähiger-Piloten (Daten, Standards, Nachweisfähigkeit), um Vertrauen und Wiederholbarkeit zu schaffen – z. B. durch Materialpässe, ein gemeinsames Daten-Minimalset und einfache Qualitätsklassen für Sekundärmaterialien.

5 Diskussion

5.1 Beitrag und Neuheitswert

Beitrag und Neuheitswert liegen im Aufzeigen einer skalierbaren Vorgehenslogik, die regionale CE-Potenziale systematisch sichtbar macht und auf die Machbarkeit regionaler CE-Geschäftsfelder und CE-Innovationen priorisiert (Lang-Koetz et al., 2025; Potting et al., 2017). Der neuartige Kern ist die Verbindung von (i) breit angelegter, KI-gestützter Erhebung und Strukturierung der regionalen Unternehmenssignale, (ii) einem Matching-Ansatz entlang von Abfall-/Nebenprodukt-zu-Input-Ketten und (iii) einer externen Trend- und Technologieperspektive, die zukünftige Relevanzpfade absichert.

5.2 Aussagekraft, Grenzen und Übertragbarkeit

Die Ergebnisse zeigen robuste Muster auf Ebene von Materialfeldern und Clusterverknüpfungen. Gleichzeitig ist klar: Webbasierte Unternehmenssignale sind eine Näherung an reale Stoffströme (Hina et al., 2022). Für Umsetzung und Skalierung sind Validierungsschritte erforderlich, insbesondere zu Mengen, Qualität, Logistik und rechtlichen Rahmenbedingungen. Die methodische Verdichtung über eine erweiterte SWOT unterstützt die Priorisierung, ersetzt aber nicht die Ausgestaltung in konkreten Pilotkonsortien. Das Vorgehen ist auf andere Regionen und Branchen übertragbar, sofern digitale Unternehmenssichtbarkeit, die Einbindung regionaler Akteure zur Validierung und eine strukturierte Umsetzung gegeben sind. Die in Heilbronn-Franken abgeleiteten Leitlinien – Regionalisierung, datenbasierte Skalierung, Steuerung von Transformationsrisiken sowie Kooperation und Governance – sind als allgemeine, regionsspezifisch zu konkretisierende Muster zu verstehen.

6 Fazit und Ausblick

Heilbronn-Franken verfügt über sehr gute CE-Voraussetzungen in regionalen Wertschöpfungsnetzwerken – getragen durch industrielle Breite und relevante Materialfelder. Gleichzeitig bestehen klare Hürden (Verbrennerstrukturen, Daten- und Koordinationslücken) für Übergang von „Potenzial“ zu „Pilot“. Nächste, praxisnahe Schritte können sein: (1) Top-Matches mit ausgewählten Unternehmen validieren (Mengen, Qualität, Anforderungen, Logistik). (2) Daten-Minimalsets definieren (Materialparameter, Herkunft, Qualität, Zeitfenster) für Austausch und Skalierung. (3) Pilotketten in starken Materialfeldern starten (z. B. Metall/Kunststoff) mit Befähiger-Maßnahmen (Standards, Nachweisfähigkeit). Damit wird der Übergang von der Potenzialanalyse in eine belastbare regionale CE-Ökosystemarchitektur vorbereitet.

Literatur/Quellen

Corvellec, H., Stowell, A. F., & Johansson, N. (2022). Critiques of the circular economy. Journal of Industrial Ecology, 26(2), 421–432. https://doi.org/10.1111/jiec.13187

European Parliament and Council. (2023). Regulation (EU) 2023/1542. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/

European Parliament and Council. (2024). Regulation (EU) 2024/1781. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/

Helms, M. M., & Nixon, J. (2010). Exploring SWOT analysis – where are we now? A review of academic research from the last decade. Journal of Strategy and Management, 3(3), 215–251. (Emerald)

Hina, M., Chauhan, C., Kaur, P., Kraus, S., & Dhir, A. (2022). Drivers and barriers of circular economy business models: Where we are now, and where we are heading. Journal of Cleaner Production, 333, 130049. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130049

Illa Font, C. H., Siqueira, H. V., Machado Neto, J. E., Santos, J. L. F. d., Stevan, S. L., Jr., Converti, A., & Corrêa, F. C. (2023). Second Life of Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles: A Short Review and Perspectives. Energies, 16(2), 953. https://doi.org/10.3390/en16020953 (MDPI)

Lang-Koetz, C., Wichert, P., & Deterding, L. (2025). Finding ideas for sustainability-oriented innovations: Using Circular Business Models for innovation. In J. Woidasky, J. Araujo, H. Hinderer & T. Viere (Hrsg.), Applied Circular Economy Engineering. Wiley.

OpenAlex. (o. J.). Works – OpenAlex Technical Documentation (API Entities). (docs.openalex.org)

Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

Kontakt

Carmen Beisswanger, Senior Project Manager
TIM Consulting GmbH
0173 7689 402
carmen.beisswanger@tim-consulting.de
tim-consulting.de

Marcel Kern, Jörg Woidasky

Kreislaufwirtschaftliche Ansätze in der Patientenbeatmung

***Abstract**: Die Patientenbeatmung als unverzichtbarer Bestandteil der modernen Medizin wird nicht nur in Notfällen wie Atem- oder Kreislaufstillständen eingesetzt, sondern auch bei Routineeingriffen wie der Anästhesie im Operationssaal oder auch als dauerhafte Therapiemaßnahme. Neben dem Basis-Beatmungsgerät, welches als Mehrwegprodukt konzipiert ist, kommen Verbrauchsmaterialien wie z. B. Schlauchsysteme, Filter oder Masken zum Einsatz. Bei ihnen handelt es sich typischerweise um Einwegkomponenten mit relativ kurzen Nutzungsintervallen. Sie werden fast ausschließlich im Restabfall entsorgt und meist thermisch verwertet. Das kreislaufwirtschaftliche Potential dieser Produkte wurde trotz ihres sehr häufigen Einsatzes bisher nicht untersucht, so dass sich hier eine Forschungslücke zeigt, die derzeit durch eine systematische Studie zur Quantifizierung und kreislaufgerechten Produktgestaltung mit Unterstützung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geschlossen wird.*

1 Einleitung

Im Gesundheitswesen haben die bestmögliche Patientenversorgung und die Patientensicherheit oberste Priorität. Allerdings ist der Gesundheitssektor auch für bis zu 5% der globalen CO_2 Emissionen verantwortlich und trägt somit erheblich zur Verschärfung der Klimakrise bei (Rodríguez-Jiménez et al., 2023). Ein Grund hierfür sind die für medizinische Untersuchungen und Behandlungen eingesetzte Vielzahl von Medizinprodukten (Franke & Hofmann, 2023): In Europa sind heute mehr als 500.000 verschiedene Medizinprodukte verfügbar (Sousa et al., 2021) und 90% der entsorgten Medizinprodukte sind Einwegprodukte oder -komponenten (Moultrie et al., 2016). Der jährlich Ressourcenbedarf des deutschen Gesundheitswesens mit ca. 107 Millionen Tonnen entspricht 5% des deutschen Rohstoffverbrauches (Ostertag et al., 2021).

In Deutschland werden jährlich etwa 16 Mio. Operationen durchgeführt, bei denen sehr oft eine Beatmung erforderlich wird. Daneben werden knapp 160.000 Intensivpatienten und ca. 70.000 Heimpatienten über einen längeren Zeitraum beatmet, und auch bei der Schlaftherapie erfolgt eine (nicht invasive) Beatmung. Jeder dieser Anwendungsfälle erfordert spezifische Wechselintervalle der Verbrauchsmaterialien, die vom Verwurf direkt nach der Nutzung z. B. bei einer Operation bis hin zu einer einjährigen Nutzungsdauer von Schlauchsystemen bei Schlaftherapie-Anwendungen gehen, so dass bereits die Quantifizierung der Abfälle aus der Beatmung umfangreiche Untersuchungen erfordert, die noch nicht abgeschlossen sind. Bereits jetzt kann jedoch festgestellt werden, dass die medizinisch unverzichtbare Patientenbeatmung einen besonders ressourcenintensiven Bereich darstellt, der mit hohen Energieverbräuchen, dem Einsatz von Einmalmaterialien sowie der Nutzung klimaschädlicher Gase verbunden ist (Garcia Borrega et al., 2024; Hunfeld et al., 2023). Vor dem Hintergrund globaler Nachhaltigkeitsziele ist die Entwicklung und Implementierung nachhaltiger Konzepte in der Patientenbeatmung dringend erforderlich.

2 Systematische Identifikation kreislaufwirtschaftlicher Ansätze

Als grundlegender methodischer Ansatz zur Verbesserung der kreislaufwirtschaftlichen Situation bei Beatmungssystemen wurde die Anwendung der zehn R-Strategien nach (Potting et al., 2017) auf die Patientenbeatmung gewählt. Das Ziel der R-Strategien ist dabei, das Maß der Zirkularität von Produkten oder Werkstoffen von einem linearen Lebenszyklus hin zu einer vollständigen Kreislaufwirtschaft voranzutreiben. Dies kann u. a. durch die Vermeidung von Abfällen, die Maximierung der Nutzungsintensität über mehrere Produkt-Nutzungszyklen sowie die Verlängerung der Nutzung der Materialien im Zyklus realisiert werden (Potting et al., 2017).

Zur Identifikation beatmungsspezifischer Ansätze erfolgte zunächst von Mai bis Juli 2025 eine systematische Literaturrecherche zu den Themenfeldern „Beatmung“ (medical ventilation), „Kreislaufwirtschaft“ (circular economy, recycling, R-strategy) und „Gesundheitswesen“ (healthcare, medical) in den Datenbanken ScienceDirect, Springer Nature Link, Wiley und der KIT-Bibliothek. Die Recherche-Ergebnisse der einzelnen Themenfelder wurden miteinander verknüpft und anschließend den zehn R-Strategien zugeordnet. Sie bilden damit die theoretische Grundlage für Fachdiskussionen mit Herstellern von Beatmungsgeräten und Verbrauchsmaterialien sowie weiteren Stakeholdern. Aus diesen Fachdiskussionen können dann in einem Folgeschritt konkrete zirkularitätsorientiert gestaltete Produkte und Prozesse einschließlich entsprechender Geschäftsmodelle entwickelt werden.

3 Darstellung konkreter Zirkularitätsansätze bei der Produkt- und Prozessgestaltung

In Tabelle 1 sind die spezifischen Umsetzungsmöglichkeiten der R-Strategien für die Patientenbeatmung dargestellt, die im Rahmen der Literaturauswertung identifiziert wurden.

Tabelle 1: Zuordnung der literaturbasierten Zirkularitätsansätze für die Patientenbeatmung zu den R-Strategien nach (Potting et al., 2017)

R-Strategie	Bedeutung	Ansätze in der Patientenbeatmung
R0 Refuse	Verzicht auf nicht notwendige Produkte oder Materialien.	Vermeidung klimaschädlicher Gase in der Anästhesie wie Desfluran oder Lachgas (Schuster, 2024)
		Entwicklung von Beatmungssystemen mit längeren Nutzungsdauern (14 Tage) (Fisher & Paykel Healthcare Limited., 2025)
R1 Rethink	Neugestaltung von Produkten und Prozessen mit Fokus auf Nachhaltigkeit.	Entwicklung von HME-Filtern aus biologisch abbaubaren Aerogelen wie Gelatine oder Chitosan (Artusi et al., 2025)
R2 Reduce	Minimierung des Material- und Energieverbrauchs	Minimal-Flow-Anästhesie: Durch die Senkung der Frischgasflussraten kann der Verbrauch und die Emission von volatilen Anästhetika gesenkt werden (Schuster, 2024).
		Reduktion des Energieverbrauches durch Abschalten der Geräte und den Verzicht des Standy-Modus (Schuster, 2024).
		Konsequentes Abfallmanagement, sodass Verbrauchsmaterialien nicht als infektiöser Abfall behandelt werden müssen (Schuster, 2024).

R3 Reuse	Mehrfache Nutzung von Produkten und Komponenten.	Aufbereitung von Mehrwegbeatmungsschläuchen und Beatmungsgeräten (Kranabetter & Axel Kramer, 2010)
		Beatmungssysteme können in der Anästhesie unter definierten Bedingungen bis zu 7 Tage bei mehreren Patienten eingesetzt werden (Kranabetter & Axel Kramer, 2010).
R4 Repair	Instandsetzung defekter Produkte zur Verlängerung der Lebensdauer.	Reparatur von Beatmungsgeräten (Kranabetter & Axel Kramer, 2010)
R5 Refurbish	Aufarbeitung von Produkten, um sie in einen neuwertigen Zustand zu versetzen.	Wiederaufbereitung von Einmalartikeln für den erneuten Einsatz (Kagoma et al., 2012).
R6 Remanufacture	Komplette Überarbeitung von Produkten unter Verwendung neuer und gebrauchter Teile.	Die Modernisierung älterer Anästhesiegeräte ermöglicht eine weitere Nutzung beispielsweise in der Tiermedizin oder in Simulationslaboren (Weiss et al., 2016).
		Case-Study zur Sammlung und Wiederaufbereitung von Beatmungsgeräten (Asadi et al., 2022)
R7 Repurpose	Zweckentfremdung von Produkten oder Komponenten für andere Anwendung.	Bei Kapazitätsengpässen können in Krisenzeiten Anästhesiegeräte durch technische Anpassungen als Intensivbeatmungsgerät genutzt werden (Panchamia et al., 2020)
R8 Recycle	Rückgewinnung von Materialien zur Herstellung neuer Produkte.	Demontagestudie von Beatmungssystemen bestehend aus Beatmungsschläuchen, Masken, Gasentnahmeleitungen und Beatmungsbeuteln (Goldberg et al., 1996).
		Saubere Kunststoffe (z.B. Polypropylen aus Verpackungen), Papier und Metalle aus Einweginstrumenten (Laryngoskop-Spatel) können recycelt werden (Schuster, 2024).
		Narkosegas-Recycling: Mithilfe von Aktivkohlefiltern können volatile Anästhetika aufgefangen, destilliert und für eine erneute medizinische Verwendung aufgereinigt werden (Schuster, 2024).
R9 Recover	Gewinnung von Energie aus nicht mehr verwendbaren Materialien.	Nicht recycelbare und nicht-infektiöse Abfälle werden thermisch verwertet und für die Energieerzeugung genutzt (Schuster, 2024).

4 Fazit

Die Auswertung der systematischen Literaturrecherche zeigte einerseits, dass für jede der zehn R-Strategien bereits konkrete beatmungsbezogene Ansätze identifiziert werden konnten. Das Gesundheitswesen scheint sich hier seiner Verantwortung zur Reduzierung von Abfällen zu stellen und hat bereits erste Maßnahmen z. B. zur Reduktion von Narkosegasen und einer verstärkten Nutzungsintensität von Beatmungssystemen in der Anästhesie ergriffen. Anderseits sind die bisher publizierten kreislaufwirtschaftlichen Ansätze im Beatmungsbereich weder besonders zahlreich noch aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht umfassend: Eine stoffliche Verwertung findet bislang primär bei Verpackungen und beim Narkosegas statt. Bei den eingesetzten Medizinprodukte lassen sich bislang nur Pilotprojekte zur Demontage von Beatmungssystemen finden. Eine kreislaufwirtschaftliche Gesamtstrategie für den Beatmungsbereich beginnend mit der Quantifizierung der Produktströme über deren zirkularitätsorientierte Gestaltung bis hin zur Einbettung in nachhaltige Geschäftsmodelle ist daher dringend notwendig. Dies ist Gegenstand des von der Deutschen

Bundesstiftung Umwelt im Förderschwerpunkt CirculAID mit dem Förderkennzeichen AZ 39031/01-31 geförderten Verbundprojekts „SEB - Systematische Erschließung des kreislaufwirtschaftlichen Potentials von Beatmungssystemen“.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeiten sowie den Projektpartnern Löwenstein Medical und Wilamed für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit im Rahmen dieses Vorhabens.

Literatur/Quellen

Artusi, C., Campodoni, E., Tarlati, L., Iglesias, B. V., Sansone, A., Ferreri, C., Belosi, F., Vandini, A., Monticelli, P., & Sandri, M. (2025). Development and validation of eco-friendly designed heat and moisture exchange filters for the safeguard of the respiratory tract and of the environment. *Materials Today Sustainability*, *30*, 101108. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101108

Asadi, Z., Khatir, M. V., & Rahimi, M. (2022). Robust design of a green-responsive closed-loop supply chain network for the ventilator device. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(35), 53598–53618. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19105-1

Fisher & Paykel Healthcare Limited. (2025). *F&P 950 System*. Fisher & Paykel Healthcare Limited. https://www.fphcare.com/de/products/devices-and-humidifiers/950-system/adults/

Franke, M., & Hofmann, A. (2023). Circular Economy für Kunststoffe im Gesundheitswesen. In *Green Health—Nachhaltiges Wirtschaften im Gesundheitswesen* (S. 193–198). MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG.

Garcia Borrega, J., Hermes, C., König, V., Kitz, V., Möller, S., Stark, D., Janssens, U., Mager, D., & Kochanek, M. (2024). Nachhaltigkeit in der Intensiv- und Notfallversorgung. *Medizinische Klinik - Intensivmedizin und Notfallmedizin*, *119*(2), 108–115. https://doi.org/10.1007/s00063-023-01039-2

Goldberg, M. E., Vekeman, D., Torjman, M. C., Seltzer, J. L., & Kynes, T. (1996). Medical waste in the environment: Do anesthesia personnel have a role to play? *Journal of Clinical Anesthesia*, *8*(6), 475–479. https://doi.org/10.1016/0952-8180(96)00127-4

Hunfeld, N., Diehl, J. C., Timmermann, M., Van Exter, P., Bouwens, J., Browne-Wilkinson, S., De Planque, N., & Gommers, D. (2023). Circular material flow in the intensive care unit—Environmental effects and identification of hotspots. *Intensive Care Medicine*, *49*(1), 65–74. https://doi.org/10.1007/s00134-022-06940-6

Kagoma, Y., Stall, N., Rubinstein, E., & Naudie, D. (2012). People, planet and profits: The case for greening operating rooms. *Canadian Medical Association Journal*, *184*(17), 1905–1911. https://doi.org/10.1503/cmaj.112139

Kranabetter, R., & Axel Kramer, J. R., Klaus Züchner, Ojan Assadian, Georg Daeschlein, Nils-Olaf Hübner, Edeltrut Dietlein, Martin Exner, Matthias Gründling, Christian Lehmann, Michael Wendt, B. M. Graf, Dietmar Holst, Lutz Jatzwauk, Birgit Puhlmann, Thomas Welte, Antony R. Wilkes. (2010). Infektionsprävention bei der Narkosebeatmung durch Einsatz von Atemsystemfiltern. *Der Anaesthesist*, *59*(12), 1124–1132. https://doi.org/10.1007/s00101-010-1818-3

Moultrie, J., Sutcliffe, L., & Maier, A. (2016). A maturity grid assessment tool for environmentally conscious design in the medical device industry. *Journal of Cleaner Production*, *122*, 252–265. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.108

Ostertag, K., Bratan, T., Gandenberger, C., Hüsing, B., & Pfaff, M. (2021). *Ressourcenschonung im Gesundheitssektor—Erschließung von Synergien zwischen den Politikfeldern Ressourcenschonung und Gesundheit*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-01-25_texte_15-2021_ressourcenschonung_gesundheitssektor.pdf

Panchamia, R. K., Piracha, M. M., & Samuels, J. D. (2020). Desperate times: Repurposing anesthesia machines for mechanical ventilation in COVID-19. *Journal of Clinical Anesthesia*, *66*, 109967. https://doi.org/10.1016/j.jclinane.2020.109967

Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain*. https://www.researchgate.net/publication/319314335_Circular_Economy_Measuring_innovation_in_the_product_chain

Rodríguez-Jiménez, L., Romero-Martín, M., Spruell, T., Steley, Z., & Gómez-Salgado, J. (2023). The carbon footprint of healthcare settings: A systematic review. *Journal of Advanced Nursing*, *79*(8), 2830–2844. https://doi.org/10.1111/jan.15671

Schuster, M. (2024). Positionspapier mit konkreten Handlungsempfehlungen der DGAI und des BDA: Ökologische Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie und Intensivmedizin – Aktualisierung 2024. *Schuster M, Richter H, Pecher S, Bein T, Grüßer L, Kowark A et al: Positionspapier mit konkreten Handlungsempfehlungen der DGAI und des BDA: Ökologische Nachhaltigkeit in der Anästhesiologie und Intensivmedizin – Aktualisierung 2024*, *11*, 541–557. https://doi.org/10.19224/ai2024.541

Sousa, A. C., Veiga, A., Maurício, A. C., Lopes, M. A., Santos, J. D., & Neto, B. (2021). Assessment of the environmental impacts of medical devices: A review. *Environment, Development and Sustainability*, *23*(7), 9641–9666. https://doi.org/10.1007/s10668-020-01086-1

Weiss, A., Hollandsworth, H. M., Alseidi, A., Scovel, L., French, C., Derrick, E. L., & Klaristenfeld, D. (2016). Environmentalism in surgical practice. *Current Problems in Surgery*, *53*(4), 165–205. https://doi.org/10.1067/j.cpsurg.2016.02.001

Kontakt

Marcel Kern
Hochschule Pforzheim - Fakultät für Technik, 75175 Pforzheim, Deutschland
Tel.-Nr. +49 7231/28-6714
E-Mail: marcel.kern@hs-pforzheim.de

Antonius Klein-Reesink

Entwicklung eines Entscheidungstools zur Kreislaufschließung bei Geokunststoffen

***Abstract**: Der Einsatz von Geokunststoffen ist im modernen Bauwesen weit verbreitet und leistet einen wesentlichen Beitrag zur technischen Leistungsfähigkeit und Ressourceneffizienz von Infrastrukturbauwerken. Mit zunehmender Zahl von Sanierungs-, Erhaltungs- und Rückbaumaßnahmen rückt jedoch der Umgang mit ausgebauten Geokunststoffen verstärkt in den Fokus von Planung, Bauausführung und Nachhaltigkeitsbewertung. In der aktuellen Baupraxis erfolgt der Rückbau von Geokunststoffen häufig ohne systematische Entscheidungsgrundlage, was in vielen Fällen zu deren vollständigen thermischen Verwertung führt, obwohl Recycling- oder Wiederverwendungspotenziale bestehen könnten. Ziel der zugrunde liegenden Masterarbeit ist die Entwicklung eines praxisnahen Entscheidungsunterstützungstools, das technische, wirtschaftliche und ökologische Kriterien integriert und unterschiedliche Rückbau- und Verwertungsszenarien vergleichbar macht. Der vorliegende Beitrag stellt das methodische Konzept des Tools, den zugrunde liegenden Entscheidungsbaum sowie die Umsetzung in einer Excel-basierten Anwendung vor. Anhand definierter Szenarien wird gezeigt, wie zulässige Handlungsoptionen identifiziert, bewertet und transparent gerankt werden können.*

1 Einleitung

Geokunststoffe haben sich in den vergangenen Jahrzehnten als unverzichtbare Bauprodukte im Erd-, Verkehrs-, Wasser- und Deponiebau etabliert. Sie übernehmen dort zentrale Funktionen wie Trennung, Filterung, Bewehrung, Drainage, Abdichtung oder Erosionsschutz und tragen maßgeblich zur Funktionsfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit von Bauwerken bei. Parallel zum steigenden Einsatz von Geokunststoffen nimmt auch die Zahl an Erhaltungs-, Sanierungs- und Rückbaumaßnahmen bestehender Infrastrukturen kontinuierlich zu. Damit rückt der Umgang mit Geokunststoffen am Ende ihrer Nutzungsdauer zunehmend in den Fokus von Baupraxis und Forschung.

Vor dem Hintergrund nationaler und europäischer Zielsetzungen zur Kreislaufwirtschaft rückt zunehmend auch der Bausektor in den Fokus (BMUV, 2024), da er große Material- und Stoffströme verursacht. Geokunststoffe bestehen überwiegend aus polymeren Rohstoffen und weisen grundsätzlich Potenziale für Recycling oder Wiederverwendung auf. Dennoch werden sie in der Praxis beim Rückbau häufig mechanisch zerstört und anschließend der thermischen Verwertung zugeführt. Obwohl Geokunststoffe am Ende ihrer Nutzungsphase oft der thermischen Verwertung zugeführt werden, ist dieser Prozess mit erheblichen Hürden verbunden. Die mechanische Zerstörung beim Ausbau und starke mineralische Anhaftungen erschweren die energetische Nutzung in Müllverbrennungsanlagen (MVA), da sie einen hohen Reinigungsaufwand sowie einen erhöhten Aschegehalt verursachen.

Zudem handelt es sich bei Geokunststoffen um sehr hochkalorische Materialien; dieser hohe Heizwert führt in herkömmlichen MVAs häufig zu thermischen Überlastungen (Quicker & Weber, 2020), weshalb sie für diese Anlagen nur bedingt geeignet sind. Darüber hinaus belasten das zusätzliche Gewicht des Erdreichs und die damit verbundenen Transportkosten die Wirtschaftlichkeit dieses Entsorgungspfades.

Gleichzeitig zeigen Forschung und Praxis, dass auch schonende Ausbauverfahren (Naue GmbH & Co. KG, 2025) grundsätzlich möglich sind und somit die Voraussetzungen für den ReUse-Einsatz oder das Recycling geschaffen werden. Ob solche Ansätze flächendeckend technisch umsetzbar, wirtschaftlich tragfähig und ökologisch sinnvoll sind, lässt sich jedoch ohne eine strukturierte Bewertungslogik nur eingeschränkt beurteilen. Daraus ergibt sich ein Bedarf an Entscheidungsunterstützungssystemen, die Rückbau- und Verwertungsoptionen transparent und multidimensional bewerten. Der vorliegende Beitrag stellt ein entsprechendes Tool vor, das im Rahmen einer Masterarbeit entwickelt wird. Die Arbeit wird im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojekts **ProGeo-UP**, das in Zusammenarbeit mit Industrie- und Wissenschaftspartnern durchgeführt wird, erarbeitet.

2 Methodik

Das entwickelte Entscheidungsunterstützungstool kombiniert einen regelbasierten Entscheidungsbaum mit einer multikriteriellen Nutzwertanalyse. Ziel ist es, die Komplexität von Rückbau- und Verwertungsentscheidungen systematisch zu strukturieren und eine nachvollziehbare Entscheidungsfindung zu ermöglichen. Der methodische Aufbau orientiert sich an ingenieurwissenschaftlichen Variantenuntersuchungen, wie sie im Bauwesen üblich sind.

2.1 Szenarienbasierte Strukturierung

Zur Abbildung der Baupraxis wird ein szenarienbasierter Ansatz gewählt, der fünf typische Rückbau- und Verwertungsvarianten unterscheidet. Diese Szenarien kombinieren unterschiedliche Ausbauverfahren mit verschiedenen Verwertungswegen. Durch diese Systematisierung wird der Entscheidungsraum bewusst auf realistische und praxisrelevante Handlungsoptionen begrenzt, ohne die wesentlichen Einflussfaktoren auszublenden. Die Szenarien dienen nicht nur als Rechenvarianten, sondern bilden das strukturelle Rückgrat des Tools. Sämtliche Eingabedaten, Regeln und Bewertungskennwerte werden konsequent szenarienspezifisch verarbeitet. Dadurch lassen sich Unterschiede zwischen den Varianten klar herausarbeiten, etwa hinsichtlich des Materialerhaltungsgrades, der Prozessdauer oder der anfallenden Stoffströme (Hahne & Giegrich, 2022).

2.2 Entscheidungsbaum zur Prüfung der Zulässigkeit

Die erste Stufe der Entscheidungsfindung erfolgt über einen hierarchisch aufgebauten Entscheidungsbaum. Dieser prüft zunächst die Vollständigkeit der Eingangsdaten sowie rechtliche und organisatorische Randbedingungen. Anschließend werden technische Mindestanforderungen an Materialzustand und Baustellenlogistik überprüft. Szenarien, die eine dieser Bedingungen nicht erfüllen, werden ausgeschlossen und nicht weiter bewertet (Gleich et al., 2021). Zur Veranschaulichung der Entscheidungslogik ist der im Tool implementierte Entscheidungsbaum in Abbildung 1 dargestellt. Durch die vorgelagerte Filterung wird sichergestellt, dass ausschließlich technisch und organisatorisch umsetzbare Optionen in die Bewertung eingehen.

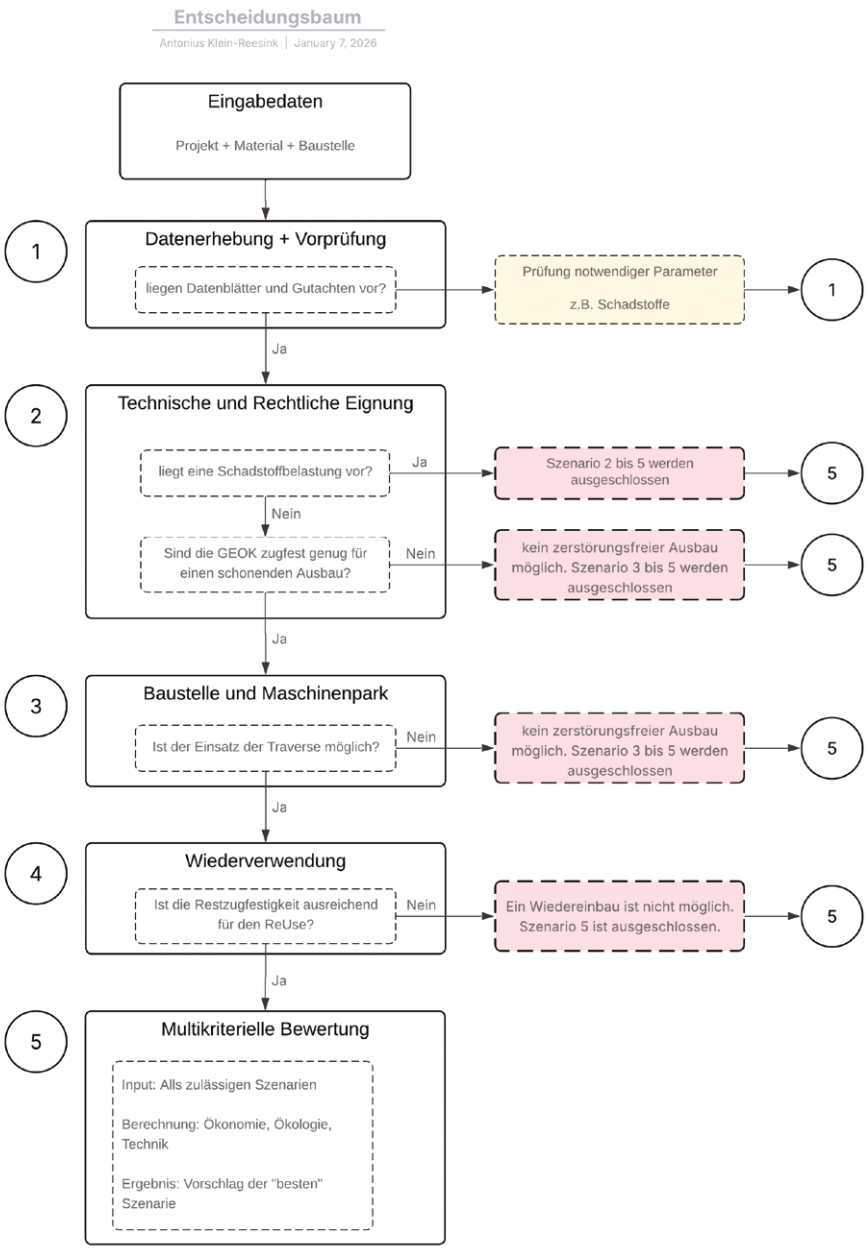


Abbildung 1: Schematischer Entscheidungsbaum zur Identifikation zulässiger Rückbau- und Verwertungspfade für Geokunststoffe

2.3 Multikriterielle Bewertung zulässiger Szenarien

Die zulässigen Szenarien werden anschließend mittels einer Nutzwertanalyse bewertet. Die Bewertung erfolgt entlang der Dimensionen Technik, Ökonomie und Ökologie. Die technische Bewertung berücksichtigt den Materialerhaltungsgrad und die Prozesssicherheit, die wirtschaftliche Bewertung basiert auf Rückbau-, Transport- und Entsorgungskosten, und die ökologische Bewertung fokussiert auf Treibhausgasemissionen sowie mögliche Substitutionsgutschriften (Cerdas et al., 2021). Die Gewichtung der Dimensionen kann nutzerabhängig angepasst werden.

3 Umsetzung des Tools

Das Tool wurde als Excel-basierte Anwendung umgesetzt, um eine hohe Praxistauglichkeit zu gewährleisten. Die Benutzeroberfläche ist klar strukturiert und trennt Eingabedaten, Logik- und Berechnungsebene sowie Ergebnisdarstellung. Die Ergebnisse werden in einem Dashboard zusammengeführt, das sowohl absolute Kennwerte als auch normierte Nutzwerte und ein Gesamtranking der Szenarien darstellt.

Danksagung

Das Projekt ProGeo-Up wird durch die Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft - Kunststoffrecyclingtechnologien (KuRT)“ des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert.

Literatur/Quellen

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2024): Entwurf Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS). Berlin, BMUV.

Cerdas, F.; Rostek, N.; Herrmann, C. (2021): Life Cycle Assessment of Circular Economy Strategies. IN Thiede, S.; Herrmann, C. (Eds.). Cham, Springer Nature Switzerland.

Gleich, B.; Kiermaier, A.; Schöbel, S. (2021): Circular Economy: Von der strategischen Planung zur praktischen Umsetzung. Berlin, Heidelberg, Springer Gabler.

Hahne, J.; Giegrich, J. (2022): Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft im Bauwesen – Methodik zur Bewertung der Umweltwirkungen. IN Umweltbundesamt (Ed.). Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.

Naue GmbH & Co. KG (2025): Rückbau von Geokunststoffen mit Rückbautraverse – sauber trennen, sicher aufrollen. URL: https://www.naue.com/de/dienstleistungen/rueckbau-von-geokunststoffen-mit-rueckbautraverse-sauber-trennen-sicher-aufrollen/ (Abruf am 05.11.2025).

Quicker, P.; Weber, K. (2020): Energetische Nutzung von Abfällen. In: Flamme, S. et al. (Hrsg.): Strategien, Konzepte, Technik. Wiesbaden, Springer Vieweg.

Kontakt

Antonius Klein-Reesink, wissenschaftlicher Mitarbeiter
FH Münster, Institut für Infrastruktur, Wasser, Ressourcen, Umwelt – AG Ressourcen (IWARU)
Tel.-Nr. 0251 83-65160
E-Mail: a.klein-reesink@fh-muenster.de
Homepage: www.fh-muenster.de/en/iwaru/forschung/Ressourcen

Julian Klüttermann, Isabel Kaphahn, Peter Quicker

Bewertung des thermochemischen Verhaltens von Papierrejekten

***Abstract**: Papierrejekte aus der Aufbereitung von Altpapier, z. B. Wellpappenaltpapier (Old Corrugated Cardboard – OCC)-basierte-Rejektströme, stellen aufgrund ihrer heterogenen Zusammensetzung aus faserhaltigen, polymerbasierten und beschichteten Komponenten eine besondere Herausforderung für das stoffliche Recycling dar [1, 2]. Zur Erschließung stofflicher Nutzungspfade wurden ca. 40 Mg Papierrejekt mittels NIR-Sortierung in polymerreiche und papierfaserdominierte Fraktionen aufgetrennt, um Polyolefine für das chemische Recycling bereitzustellen. Als prozessintegrierte Alternative wird zudem eine zweistufige Pyrolyse untersucht, welche die durch TGA-FTIR bestimmten unterschiedlichen thermischen Zersetzungsbereiche faserhaltiger und polymerer Komponenten gezielt nutzt. Während sich die papierbasierten Bestandteile überwiegend im Bereich von 300–350 °C zersetzen, erfolgt die Degradation der Polyolefine primär zwischen 350–450 °C [3, 4, 5]. Die NIR-Sortierung reduziert den Massenverlust in der ersten Stufe deutlich und führt bei den polymerreichen Fraktionen zu einem Zersetzungsverhalten, das dem reiner Polyolefine entspricht. Die Ergebnisse zeigen, dass die PO/PS-Fraktion erfolgreich isoliert werden konnte, wodurch eine gezieltere Auslegung thermochemischer Prozesse ermöglicht wird. Gleichzeitig kann eine zweistufige Pyrolyse als in-situ-Strategie ähnliche Zielsetzungen adressieren und somit eine prozesstechnisch Alternative darstellen.*

1 Einleitung

In Europa werden jährlich 52,1 Mio. Mg Altpapier gesammelt, von denen etwa 46,1 Mio. Mg erneut in der Papierproduktion eingesetzt werden. Dies entspricht rund 50 % des gesamten Rohstoffeinsatzes der Papierindustrie. Der größte Einzelstrom ist Wellpappenaltpapier mit etwa 30,7 Mio. Mg Altpapier pro Jahr [6]. In den hierfür betriebenen Aufbereitungsprozessen fallen systematisch OCC-Rejekte als Nebenströme aus Aufschluss, Siebung und Sortierung an. In Deutschland entstehen rund 3 Mio. Mg Papierrejekte pro Jahr (EAV 03 03, 2021), von denen über 80 % energetisch verwertet werden [7].

Die stoffliche Verwertung dieser Rejektströme ist aufgrund ihrer heterogenen Zusammensetzung herausfordernd. Papierbasierte Verpackungen bestehen häufig aus mehreren funktionalen Materialschichten und enthalten neben Fasern auch Kunststoffe, polymerbasierte Verbund- und Barriereschichten (z. B. Papier-PE oder Papier-PE-Al-Laminierungen) sowie Beschichtungen. Während die faserhaltigen Bestandteile im Aufbereitungsprozess weitgehend zurückgewonnen werden können, verbleiben polymerhaltige und mineralische Komponenten im Rejektstrom. Diese Mischung aus Papier- und Kunststoffanteilen schränkt mechanische Recyclingrouten ein und macht thermochemische Prozesse als alternative Verwertungsoption zunehmend relevant. Insbesondere Polyolefine sind aufgrund der Abwesenheit von funktionellen Gruppen und Heteroatomen sowie ihres günstigen Pyrolyseverhaltens ein geeignetes Einsatzmaterial für das chemische Recycling. [1]

2 Material und Methoden

Für die Untersuchungen wurden 40 Mg OCC-Papierrejekt durch die Tomra Feedstock GmbH (gemeinsam mit dem ANTS-Institut der RWTH Aachen) mittels Nahinfrarot (NIR)-Sortierung fraktioniert. Aus dem unsortierten Ausgangsmaterial entstanden polymerreiche Zielfraktionen, die ebenso wie das Ausgangsmaterial einer Immediat- und Elementaranalyse sowie einer thermogravimetrischen Analyse (TGA) mit Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) des Abgases unterzogen wurden.

2.1 Material

Die NIR-Sortierung führte zu zwei polymerreichen Fraktionen, einer Polyolefinfraktion sowie einer Polyolefin-Polystyrol-Mischfraktion. Polystyrol wurde dabei gezielt miterfasst, um die Sortierausbeute zu erhöhen. Beide Fraktionen wurden zunächst getrennt untersucht. Für weiterführende Aufbereitungsversuche wurden die Fraktionen anschließend zusammengeführt, um eine ausreichende Materialmenge bereitzustellen. Das Gemisch wurde mechanisch zerkleinert und erneut einer NIR-Sortierung unterzogen, bei der gezielt 2D-PO/PS-Folien abgetrennt wurden. Die so isolierte 2D-PO/PS-Fraktion wurde anschließend in einem Scheibenagglomerator agglomeriert.

2.2 Methodik

Alle Proben wurden getrocknet und auf < 0,5 mm zerkleinert. Die thermogravimetrische Analyse wurde angelehnt an DIN 51005/51006 mit einer Linseis STA PT1600 durchgeführt. Die Proben wurden unter Stickstoff mit 10 K/min bis 500 °C erhitzt und anschließend 30 min isotherm gehalten.

Parallel erfolgte eine kontinuierliche Gasphasenanalyse mittels FTIR (Gasmet CX4000), mit der CO, CO_2, Kohlenwasserstoffe und weitere relevante Komponenten erfasst wurden. Die Kombination aus TGA und FTIR erlaubt die Zuordnung der freigesetzten gasförmigen Zersetzungsprodukte zu den jeweiligen thermischen Zersetzungsbereichen.

3 Ergebnisse

Die TGA-Verläufe in Abbildung 1 zeigen deutliche Unterschiede zwischen dem unsortierten Rejekt (Input) und den sortierten polymerreichen Fraktionen (PO, PO/PS). Die erste Massenabnahmestufe bis etwa 350 °C ist bei den polymerreichen-Fraktionen deutlich geringer ausgeprägt und bei der zusätzlich sortierten sowie agglomerierten PO/PS-Fraktion nahezu vollständig reduziert. Dies ist auf den verringerten Faseranteil zurückzuführen. Darauf folgt zwischen 350 und 450 °C der typische Zersetzungsbereich von Polyolefinen. [1, 3]

Die zugehörige FTIR-Gasphasenanalyse (Abbildung 2) des Ausgangsmaterials (Input) zeigt im Bereich der ersten Massenabnahmestufe (300-350 °C) erhöhte CO_2- und CO-Konzentrationen sowie Hinweise auf Stickstoffverbindungen. Im Temperaturfenster der Polyolefinzersetzung (350-450 °C) steigen CH_4, höhere Kohlenwasserstoffe und BTEX deutlich an. Zusätzlich treten geringe Mengen Styrol auf. Die Abgaszusammensetzung der PO/PS-Fraktion (Abbildung 3) bestätigt, dass die in Abbildung 2 beobachteten CO_2- und CO-Konzentrationen mit der Zersetzung papierbasierter Bestandteile zusammenhängen. Diese Konzentrationen treten im Abgas der PO/PS-Fraktion nicht mehr auf, während CH_4, höhere Kohlenwasserstoffe und aromatische Verbindungen dominieren.

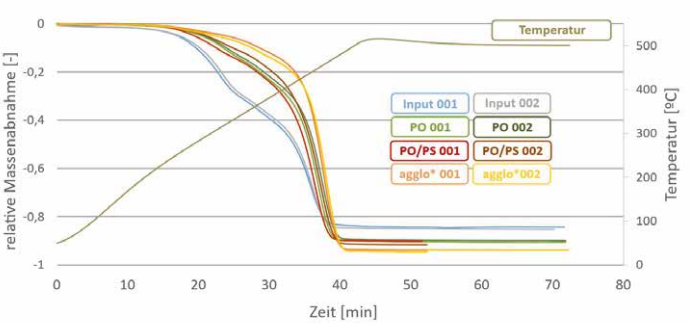


Abbildung 1: TGA-Analysen des OCC-Papierrejekts (Input) und der sortierten Fraktionen sowie der zusätzlich sortierten sowie agglomerierten Fraktion (agglo) unter N_2-Atmosphäre. Aufheizrate: 10 K/min bis 500 °C, 30 min Haltezeit*

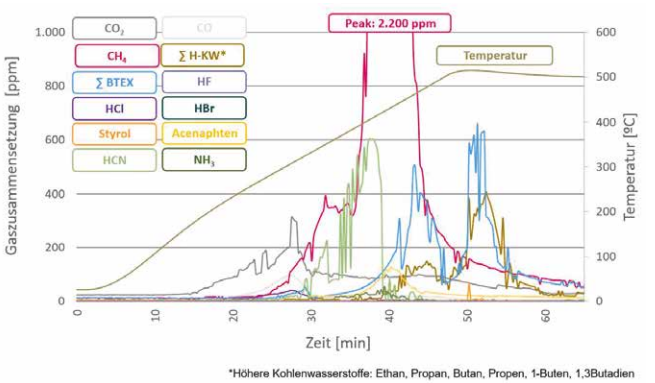


Abbildung 2: FTIR-TG-Abgasanalyse der Probe Input 001

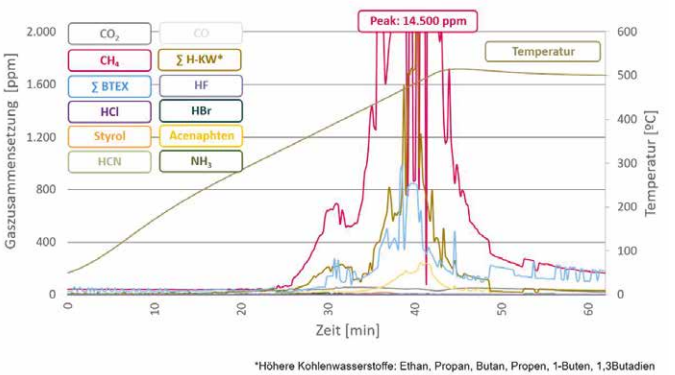


Abbildung 3: FTIR-TG-Abgasanalyse der Probe agglo 001

Das thermische Zersetzungsverhalten der Faser- und Polymeranteile unterscheidet sich grundsätzlich, weist jedoch in bestimmten Temperaturbereichen Überlappungen auf, sodass keine vollständige Abgrenzung möglich ist. Dies gilt es vertieft zu untersuchen, um den Ansatz einer zweistufigen Pyrolyse zu evaluieren.

4 Fazit & Ausblick

Die Untersuchungen bestätigen, dass die Papierrejekte bei der Pyrolyse in zwei getrennten Stufen zersetzt werden. Faserbasierte Bestandteile reagieren überwiegend bei 250-350 °C, polymerbasierte Anteile bei 350-450 °C. Das Verhältnis dieser Komponenten bestimmt maßgeblich die Qualität thermochemischer Produkte. Die NIR-Sortierung reduziert den papierdominierten Masseverlust deutlich und führt bei polymerreichen Fraktionen zu einem Abbauverhalten, das nahezu reinen Polyolefinen entspricht. Durch eine zweistufige Pyrolyse können die Produkte der Faser- und Polymerzerlegung getrennt gewonnen und gezielt verwertet werden.

In weiteren Arbeiten werden zusätzliche Sortieroptionen untersucht sowie diskontinuierliche und kontinuierliche Pyrolyseversuche durchgeführt, um den Schadstofftransfer und die Qualität größerer Kondensatmengen zu bewerten und darauf aufbauend ein geeignetes Prozesskonzept für das Recycling von OCC-Rejektströmen zu entwickeln.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Projekts *SPaRe (03EN2131 A-D).*

Literatur/Quellen

[1] Johansson, A.-C.; Selander, A.; Soleimanisalim, A. H.; Nordsvahn, R.; Shafaghat, H.: Chemical recycling of complex reject streams from the paper industry via thermal and catalytic pyrolysis. In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 181. Jg., 2024, S. 106572

[2] Quicker, P. und Seitz, M.: Abschätzung der Potenziale und Bewertung der Techniken des thermochemischen Kunststoffrecyclings. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, Januar 2024

[3] Matsuzawa, Y.; Ayabe, M.; Nishino, J.: Acceleration of cellulose co-pyrolysis with polymer. In: Polymer Degradation and Stability. 71. Jg., 2001, Nr. 3, S. 435–444

[4] Burhenne, L.; Messmer, J.; Aicher, T.; Laborie, M.-P.: The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 101. Jg., 2013, S. 177–184

[5] Quicker, P.; Weber, K. (Hrsg.): Biokohle. Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016

[6] CEPI, Confederation of European Paper Industry: Cepi Key Statistics 2024. European pulp & paper industry. URL: https://www.cepi.org/cepi-key-statistics-2024/ [Stand: 06.12.2025]

[7] Statistisches Bundesamt: Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Abfallarten. Erhebung der Abfallentsorgung in Deutschland. EAV 03 03. URL: https://www-genesis.destatis.de/genesis/online [Stand: 03.10.2025]

Kontakt

M. Sc., Julian Klüttermann, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
RWTH Aachen/LuF-TEER
Tel.-Nr. +49 241 80-96696
Kluettermann@teer.rwth-aachen.de
Homepage: https://www.teer.rwth-aachen.de

Romana Kopecká, Marlies Hrad, Marion Huber-Humer

Prospective use of Temporary Material Hubs: A quantitative recyclability assessment

***Abstract**: Temporary Material Hubs (TMHs) aim to address low global and European circularity rates by temporarily storing and therefore preventing the disposal of materials/waste that could be recycled in the future but currently lack viable technologies or feasible economic conditions/markets. Within this study, a quantitative recyclability assessment framework was developed to evaluate the suitability of candidate materials for TMHs, using a 0–5 scoring system. The framework builds on a systematic literature review conducted to identify recyclability indicators, complementing those described by van Nielen et al. (2022). Using this framework, it will be possible to determine whether selected materials/waste should be stored in TMHs or directed to final sinks. This assessment represents a step toward implementing TMHs. In turn, TMHs are expected to improve circularity by diverting potentially valuable materials from disposal and enabling maximal reasonable material recovery, as opposed to premature energy recovery and landfilling.*

1 Introduction

The European policy framework including the New Circular Economy Action Plan, the adapted Waste Framework Directive and the Landfill Directive aim to reduce disposal and increase recycling. Yet, circularity rates remain rather low: 7.2% on a global scale and 11.5% in Europe (European Environment Agency, 2024; Fraser et al., 2024). Meanwhile, material and product consumption continues to rise (Fraser et al., 2024) and under a business-as-usual scenario, 3.78 billion tonnes of municipal solid waste per year will be generated by 2050 (United Nations Environment Programme, 2024). Enhancing circularity is therefore the main motivation of this project.

A novel conceptual framework introduces Temporary Material Hubs (TMHs) to address premature disposal, and emphasizes the importance of final sinks for maintaining clean material cycles (Kopecká et al., 2026). While the theoretical groundwork has been laid, TMHs require further investigation before real-world implementation. A priority is a recyclability assessment using indicators that 1) identify materials/waste that could benefit from TMHs, and 2) verify their suitability for storage in TMHs through a quantitative assessment.

The study builds on research by van Nielen et al. (2022) who proposed a recyclability assessment framework for minor metals, using neodymium, indium and platinum as case-studies. We extend this framework with indicators identified through a systematic literature review (SLR). Given the absence of a clear EU-level definition of recyclability Kopecká et al. (2026) and the heterogenous of concepts in the literature (Geist & Balle, 2025), Kopecká et al. (2026) introduced "recycling pillars" as guiding principles for TMHs. We use these pillars to cluster indicators and pinpoint recyclability bottlenecks. The study aims to support decisions on whether – and under which conditions – TMHs should be employed.

2 Methods

2.1 Systematic literature research (SLR)

A SLR was conducted to identify recyclability indicators described in the literature and to map recyclability definitions used in prior studies. The review, carried out in September and October 2025, followed a simplified Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) approach and checklist (Page et al., 2021). The databases Scopus and Web of Sciences were used to identify the relevant studies. No restrictions in terms of type of a publication or a field of science were applied. Inclusion criteria were: studies related to solid waste management and material recovery for specific products/materials, with a main focus on recyclability and its indicators. Exclusion criteria were: studies focused on catalysts, chemistry, or medical/clinical topics. Only English-language publications from 2019 onward were considered to ensure up-to-dateness. The assessment framework by van Nielen et al. (2022) was identified within this SLR. The search strings used were:

- Scopus: *TITLE-ABS-KEY ((recyclab*) AND (indicator*) AND (material* OR waste*)) AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2026 AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))*;
- Web of Science: *(TS=(recyclab* AND indicator* AND (material* OR waste*))) AND LA=(English).*

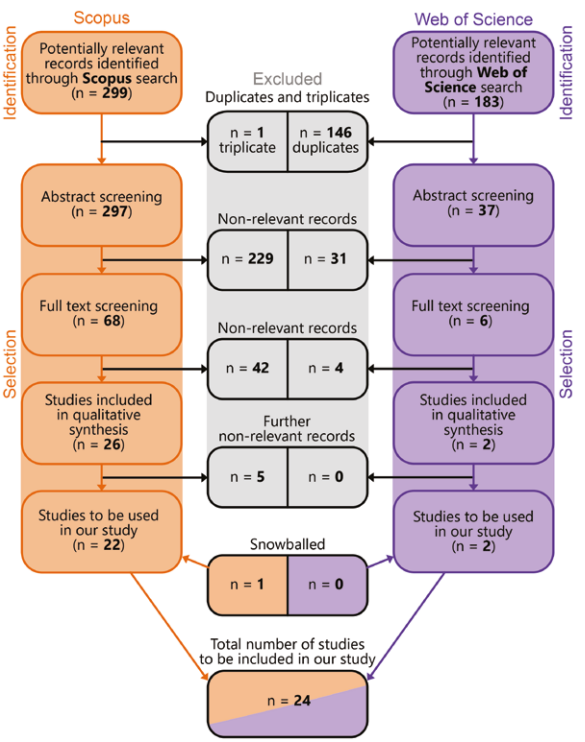


Fig. 1: Systematic literature review scheme; based on a simplified PRISMA framework (Page et al., 2021)

Initially, 299 studies in Scopus and 183 in Web of Science were identified as potentially relevant. After the deletion of duplicates/triplicates, non-relevant records and adding articles identified through the “snow-ball method”, 24 studies were assessed as relevant for this paper and are planned to be included in the study. A scheme of the conducted SLR is depicted in Fig. 1.

2.2 Recyclability assessment

TThe recyclability assessment in this study is based on the framework developed by van Nielen et al. (2022) who focused on a recyclability assessment of minor metals. Building on the set of indicators in their framework and adding the indicators identified in the SLR, a unique set of indicators will be created. The indicators will be organized under recycling pillars: (1) environmental and health protection, (2) adequate recycling technologies, and (3) economic feasibility/market; and an overarching legislation. Indicators are either qualitative or quantitative. Qualitative indicators have their scores based on an arbitrary expert decision, quantitative indicators use values from indicator reports, MFA studies and from the literature. Quantitative indicators are normalized relative to minimum and maximum possible indicator values translated to a 0-5 scale using given formulas (van Nielen et al., 2022); score 5 is the highest achievable and denotes an excellent performance.

A few examples of indicators, their units and formulas used to calculate the scores 0-5 (if available) clustered according to the recycling pillars are listed in Tab. 1. Indicators related to the recycling pillar Legislation are exclusively qualitative, such as an existence of EPR legislation or export restrictions in place.

Table 1: Examples of indicators, units and formulas (if available) to calculate the scores 0-5 assigned to individual recycling pillars; x corresponds to the value from literature; adapted from van Nielen et al. (2022)

	Environmental and health protection	**Adequate recycling technologies**	**Economic feasibility/market**
Quantitative indicators	GHG emissions (% of virgin) $5 * (1 - x)$	Technology readiness level (TRL) $5 * (x - 1)/8$	Market value (EUR/t) $x/20$
	Energy consumption (N/A) N/A	Recovery efficiency (%) $5 * x$	Price volatility (%) $5 * (1 - \frac{x - 5\%}{25\%})$
Qualitative indicator	Toxic process chemicals (N/A)	Expertise required (N/A)	Market stability (N/A)

Unlike value chain stages-clustering performed by van Nielen et al. (2022), we cluster into recycling pillars to identify which pillar currently presents the systematic bottleneck to feasible recycling. This will enable the stakeholders to decide whether TMHs or final sinks are an adequate solution for specific material/waste.

Many indicators used by van Nielen et al. (2022) are qualitative, which increases the uncertainty in score calculation. Although their framework offers a solid basis for recyclability assessment, further research is imperative to deepen the reliability of both the method and the set of indicators, and to tailor the method to a broader variety of materials/products – this is the focus of our study.

3 Results and Conclusions

As the study is ongoing, results and conclusions will be reported in subsequent stages, after the proceedings submission deadline.

The goal of this study is the development of a decision-support tool to assess whether TMHs should be employed or whether final sinks are the preferred option, based on the materials'/waste's characteristics affecting recyclability.

Acknowledgement

This project is financed by the BOKU University. The author is employed at the Institute of Waste Management and Circularity (ABFK-BOKU).

References

European Environment Agency. (2024). *Now is the time to accelerate the shift to a more circular Europe*. https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/now-is-the-time-to

Fraser, M., Conde, Á., & Laxmi, H. (2024). *The Circularity Gap Report*. https://www.circularity-gap.world/2024#download

Geist, H., & Balle, F. (2025). Recyclability: Redefining the concept for the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, *29*(5), 1505–1522. https://doi.org/10.1111/jiec.70082

Kopecká, R., Hrad, M., & Huber-Humer, M. (2026). Temporary Material Hubs to enhance circular economy: A conceptual framework. *Detritus*.; accepted for publication in December 2025

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, *372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

United Nations Environment Programme. (2024, February 25). *Global Waste Management Outlook 2024 | UNEP - UN Environment Programme*. https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024

van Nielen, S. S., Kleijn, R., Sprecher, B., Miranda Xicotencatl, B., & Tukker, A. (2022). Early-stage assessment of minor metal recyclability. *Resources, Conservation and Recycling*, *176*, 105881. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105881

Contact
Romana Kopecká, MSc, University Assistant
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/lawi/abfk

Alina Krieger, Franziska Zecha, Anne-Kathrin Cassier-Woidasky, Jörg Woidasky

Kreislaufwirtschaftliche Aspekte der Hämodialyse

***Abstract**: Das deutsche Gesundheitswesen trägt mit rund 68 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente (CO_2-Äq.) (etwa 6 % der nationalen Emissionen) erheblich zum Ressourcenverbrauch bei. Die Hämodialyse (HD), das weltweit dominierende Nierenersatzverfahren, behandelt rund 100.000 Patienten[1] in Deutschland. Eine einzelne HD-Sitzung verbraucht über 500 Liter Wasser und erzeugt bis zu 4 Kilogramm (kg) Abfall. Angesichts dieser Intensität war das Ziel der Arbeit die technisch-ökologische Bewertung der HD-Behandlung durch die quantitative und stoffliche Analyse der eingesetzten Einwegprodukte. Die untersuchten Produktsets setzen sich hauptsächlich aus Kunststoffen zusammen, wobei die dominierenden Materialien Polyvinylchlorid (PVC) und Polypropylen (PP) sind. Die Abfallmenge pro Patient und Jahr (bei 143 Behandlungen) liegt zwischen 108,8 kg und 147,8 kg. Es wurde festgestellt, dass die vollständige Entleerung von Restflüssigkeiten die Abfallmasse signifikant reduziert. Die Dialyse über den arteriovenösen Shunt stellte sich als die abfallärmere Behandlungsform im Vergleich zur Katheter-HD heraus. Insbesondere die Reduktion des PVC-Anteils sowie die verstärkte Umsetzung materialeffizienter, sortenreiner Monomaterialsysteme können die Kreislauffähigkeit der eingesetzten medizinischen Einwegprodukte wesentlich verbessern.*

1 Einleitung

Aufgrund steigenden Versorgungsbedarfs und Technisierung rücken ressourcenintensive Therapien wie die Hämodialyse (HD), mit der in Deutschland etwa 100.000 Patienten behandelt werden, in den Fokus (Häckl et al., 2021). Die HD entfernt Stoffwechselabbauprodukte und überschüssige Flüssigkeit aus dem Blut und stabilisiert pH-Wert und Elektrolythaushalt (DGfN, o.J.). Der Zugang erfolgt über einen Shunt oder zunächst über einen zentralvenösen Katheter (Antwerpes et al., o.J.). Durch regelmäßig wiederkehrenden Material- und Energieverbrauch weist die HD einen hohen CO_2-Fußabdruck auf (Lim et al., 2013). Pro Patient entstehen jährlich bis zu 546 kg Abfall (Francisco & Laranjinha, 2021), was in Deutschland rund 55.000 Mg pro Jahr entspricht. Kreislaufwirtschaftliche Aspekte sind in den Regelungen zur HD kaum vorhanden, sodass diesem Missstand mit der hier vorliegenden Untersuchung abgeholfen werden soll (DGfN, 2022).

2024 gab es weltweit etwa 4,2 Millionen Dialysepatienten, mit prognostiziertem Anstieg auf sieben Millionen bis 2035. Die HD ist die häufigste Therapieform und betrifft 89 % der Patienten (3,7 Mio.), während 1 % die Heim-HD und 10 % die Peritonealdialyse nutzen (Fresenius Medical Care, 2025). Für Deutschland werden rund 100.000 dauerhafte HD-Patienten geschätzt (DGfN, 2024). Bis 2040 wird ein Anstieg auf etwa 120.000 bis 123.000 erwartet (Häckl et al., 2021). Studien zum Abfallaufkommen behandeln unterschiedliche Teilaspekte (García-Vicente et al., 2016), sodass ein Orientierungsbereich von 1,5 bis 5 kg Abfall pro HD-Behandlung angegeben werden kann (Piccoli et al., 2015).

Literaturangaben zeigen übereinstimmend einen Kunststoffanteil von 30 bis 40 Gew.-% am HD-Abfall (Francisco & Laranjinha, 2021). Detaillierte Materialdaten stammen von Piccoli et al. (2015): 61 Gew.-% der Materialien gelten als gefährlich, darunter Dialysator und Schläuche (1.050 g). Weniger als 30 Gew.-% der

1 Im Folgenden wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit der Begriff ‚Patient' bzw. ‚Patienten' verwendet. Gemeint sind stets alle Geschlechter.

nicht gefährlichen Kunststoffabfälle sind recycelbar. Erste Carbon-Footprint-Analysen liegen vor (Mtioui et al., 2021), während umfassende ökobilanzielle Bewertungen seltener sind (Drew et al., 2022). Studien wie die von Hernández-de-Anda et al. (2023) beginnen diese Forschungslücke zu schließen.

2 Methodik

2.1 Materialuntersuchungen an Hämodialyse-Sets und Erhebung der Klimawirkung

Untersucht wurden zwei Produktsets für die HD-Behandlung über einen Dialyseshunt. Eines dieser Sets lässt sich durch den Austausch bestimmter Komponenten auch für Katheter-Behandlungen adaptieren, wodurch eine vergleichende Analyse des Materialverbrauchs beider Modalitäten ermöglicht wurde. Dabei wird das erste Set, das für die HD über einen Shunt vorgesehen ist, als Set SHD1 (Set Shunt-Hämodialyse 1) bezeichnet. Das zweite Produktset wird als Set HD2 (Set Hämodialyse 2) bezeichnet. Da dieses Set unter Berücksichtigung der spezifischen Komponenten sowohl für die Shunt- als auch für die Katheter-Behandlung untersucht wurde, dient es als Basis für die Behandlung über einen Shunt als Set SHD2 (Set Shunt-Hämodialyse 2) und für die Katheterbehandlung als Set KHD2 (Set Katheter-Hämodialyse 2).

Die Produktsets wurden mit Handwerkzeugen bis auf homogene Materialien demontiert und mittels FTIR (Alpha Platinum ATR von Bruker mit ATR-LIB-POLYMERS-1-472-2.01, ATR-LIB-POLYMERS-2-472-2.01, ATR-LIB-POLYMERS-3-472-2.01, ATR-LIB-POLYMERS-4.4722.S01, BPAD.s01, Demolib.s01, FILLER.s01, RAMDEMO.s01 und SR.IDX-Datenbanken) und eines XRF-Handgerätes (Niton XL2 Gold von Thermo Fisher im Messprogramm „Legierungen“) identifiziert.

Zur Berechnung der Klimawirkung wurden zunächst alle im Produkt enthaltenen Werkstoffe identifiziert und den entsprechenden Datensätzen der Datenbank 3.12 aus ecoinvent zugeordnet. Anschließend wurden die spezifischen Treibhausgasemissionen der einzelnen Materialien unter Berücksichtigung ihrer Massenanteile gewichtet und zu einer gesamtproduktbezogenen Klimawirkung (kg CO_2-Äq.) aggregiert.

2.2 Quantifizierung der Abfallerzeugung durch Hämodialyse-Behandlungen

Für die Verbrauchsmengenanalyse wurde der Einsatz der drei Sets (Shunt-HD mit Set SHD1, Shunt-HD mit Set SHD2 sowie Katheter-HD mit Set KHD2) untersucht. In allen Einsatzfällen wird die Einsatzmasse inklusive der vorliegenden Primärverpackungen betrachtet. Dabei handelt es sich um die reine Produkt- und Verpackungsmasse ohne Flüssigkeiten oder chemische Komponenten. Zusätzlich werden die Entsorgungsmassen sowohl in der Variante mit Entleerung als auch in der Variante ohne Entleerung der Restflüssigkeit nach abgeschlossener Behandlung quantifiziert. In beiden Varianten wird die verbleibende Menge an Bicarbonat der Entsorgungsmasse zugerechnet. Tabelle 1 zeigt die durch die HD-Behandlung entstehenden Abfallmassen. Die Berechnung der Ergebnisse erfolgt bezogen auf einen Dialysetermin sowie auch für eine einjährige Patientenbehandlung mit 143 Behandlungsterminen pro Patient und Jahr. Das vollständige Schlauchsystem sowie der Dialysator (jeweils ohne Verpackung) zählen in beiden Sets zu den Hauptverursachern des Abfallaufkommens, mit einem Anteil von 478 g an 637,7 g (ca. 74,9 Gew.-%) bei SHD1 bzw. 425,7 g an 588,5 g (ca. 72,3 Gew.-%) bei SHD2 an der Gesamteinsatzmasse ohne Verpackungen. Diese Komponenten bieten damit signifikante Ansatzpunkte für Abfall- und Ressourcenschonungsstrategien.

Tabelle 1: Abfallentstehung durch HD-Behandlungen mit den Sets SHD1, SHD2 und KHD2.

Abfallquellen bzw. -arten der HD				
		SHD1	SHD2	KHD2
Einsatzmasse/ Behandlung (gesamt, ohne Verpackung)	Einsatzmasse [g]	614,0	558,2	639,6
	Anzahl Materialarten	14	19	18
davon Dialysator (ohne Verpackung)	Einsatzmasse [g]	153,7	120,3	120,3
	Anzahl Materialarten	5	4	4
davon Bicarbonatsystem (ohne Verpackung, ohne Bicarbonat)	Einsatzmasse [g]	64,9	27,0	27,0
	Anzahl Materialarten	1	2	2
davon Schlauchsystem (gesamt, ohne Verpackung)	Einsatzmasse [g]	324,3	305,4	305,4
	Anzahl Materialarten	6	9	9
davon Verbrauchsprodukte für das An- und Ablegen (ohne Verpackung)	Einsatzmasse [g]	84,5	105,5	186,9
	Anzahl Materialarten	7	10	8
Gesamt-Verpackungsmasse [g]		23,7	30,3	37,2
Verhältnis Verpackungsmasse pro Produktmasse [%]		3,9	5,4	5,8
Gesamtmasse zur Entsorgung (entleert)/ Behandlung [g]		761,7	770,3	856,3
Gesamtmasse zur Entsorgung (entleert)/ Patient und Jahr [kg]		108,8	110,2	122,5
Gesamtmasse zur Entsorgung (nicht entleert)/ Behandlung [g]		1001,6	947,3	1033,3
Gesamtmasse zur Entsorgung (nicht entleert)/ Patient und Jahr [kg]		143,1	135,5	147,8

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die wichtigsten Werkstoffe in festen Abfällen sind PVC (mit einem Anteil von 41 Gew.-% bzw. 259,5 g (KHD2) bis 49 Gew.-% bzw. 297,3 g (SHD1)) und PP (mit einem Anteil von 15 Gew.-% bzw. 81,4 g (SHD2) bis 18 Gew.-% bzw. 112,2 g (KHD2)). Darüber hinaus wird PC (Set SHD1 mit 89,6 g PC) festgestellt, was einem Masseanteil der gesamten Einsatzmasse ohne Verpackungen von 15 Gew.-% entspricht.

Die kreislaufwirtschaftliche Untersuchung der Produkte stellt entscheidungsrelevante Informationen für wichtige Stakeholdergruppen des Gesundheitswesens bereit: Für die medizinische Sicht ist relevant, dass es bisher unterschiedliche Körper-Zugangswege zur Dialyse gibt, die vor allem durch medizinische Indikationen begründet werden. Wenn aus medizinischer Sicht keine Kontraindikationen bestehen, sollten die weniger materialintensiven Produkte verwendet werden. Hierzu sind jedoch noch weitere Untersuchungen erforderlich, um belastbare Entscheidungen zu ermöglichen. Die Dialyse über einen arteriovenösen Shunt geht mit einer geringeren Abfallmenge einher als die Behandlung über einen Dialysekatheter. Dies ist auf den höheren Materialverbrauch beim An- und Ablegen der Katheter-Dialyse zurückzuführen. Aus Sicht des Beschaffungswesens kann unter der Annahme einer funktionalen Gleichwertigkeit bereits durch die Produktwahl die Abfallmasse, die der Produktmasse entspricht, minimiert werden.

Darüber hinaus werden für funktional gleichwertige Produkte auch unterschiedliche Anzahlen verschiedener Werkstoffe eingesetzt, deren Vielzahl grundsätzlich ein Kreislaufhemmnis darstellt. Darüber hinaus

sind im Sinne einer Vermeidung energie- und mediensparende Dialysetechniken zu bevorzugen. Aus pflegerischer Sicht ist eine Verbesserung der Kreislaufwirtschaft insbesondere durch die vollständige Restentleerung der Produkte vor ihrer Entsorgung möglich, die jedoch in den Arbeitsablauf von Pflegekräften leistbar integriert werden müssen. Aus der Perspektive der Produkthersteller sind aus wenigen Werkstoffen bestehende, materialeffiziente und gut restentleerbare Lösungen aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht bevorzugt. Gelingt es dann noch, den Verwendern Informationen zur Klimawirkung zur Verfügung zu stellen, so können umweltbezogene Produkteigenschaften zukünftig im Beschaffungsprozess berücksichtigt werden.

Literatur/Quellen

Antwerpes, F., Diener, M., van den Höfel, N., Fink, B., Hofmann, B., & von Westphalen, G. (o.J.). Dialyseshunt. DocCheck Flexikon. https://flexikon.doccheck.com/de/Dialyseshunt, aufgerufen am 16.11.2025.

DGfN. (2022, Februar 17). Dialysestandard. Deutsche Gesellschaft für Nephrologie e.V. https://www.dgfn.eu/dialyse-standard.html?file=files/content/downloads/dialysestandard/2016-03-23%20Dialysestandard-V2022-1_Stand_20220217.pdf&cid=2212, aufgerufen am 07.04.2025.

DGfN. (2024). Fakten zu Nephrologie. https://www.dgfn.eu/hintergrundmaterial.html?file=files/content/presse/hintergrundmaterial/DGFN-Fakten-Nephrologie-2024.pdf, aufgerufen am 08.04.2025.

DGfN. (o.J.). Hämo-Dialyse. Deutsche Gesellschaft für Nephrologie e.V. https://www.dgfn.eu/haemodialyse.html, aufgerufen am 16.11.2025.

Drew, J., Christie, S. D., Rainham, D., & Rizan, C. (2022). HealthcareLCA: An open-access living database of health-care environmental impact assessments. The Lancet Planetary Health, 6(12), 1000–1012. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00257-1

Francisco, D., & Laranjinha, I. (2021). Portuguese Nephrology: We can be greener. Portuguese Journal of Nephrology & Hypertension, 35(1), 6–10. https://doi.org/10.32932/pjnh.2021.04.110

Fresenius Medical Care. (2025, März 12). Annual Report 2024. https://freseniusmedicalcare.com/content/dam/fresenius-medical-care/global/en/04_media/pdf/publications/2024/FME_Annual_Report_2024_EN.pdf, aufgerufen am 08.04.2025.

García-Vicente, S., Llopis-González, A., González-Steinbauer, C., & Morales Suárez-Varela, M. (2016). Evaluating hazardous waste generation in for-profit outpatient haemodialysis centres. Journal of Renal Care, 42(1), 60–65. https://doi.org/10.1111/jorc.12143

Häckl, D., Kossack, N., & Schoenfelder, T. (2021). Prävalenz, Kosten der Versorgung und Formen des dialysepflichtigen chronischen Nierenversagens in Deutschland. Gesundheitswesen (Bundesverband Der Arzte Des Offentlichen Gesundheitsdienstes (Germany), 83(10), 818–828. https://doi.org/10.1055/a-1330-7152

Hernández-de-Anda, M. T., Taboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q., Velarde-Sánchez, M., & Márquez-Benavides, L. (2023). Environmental impacts of a Mexican hemodialysis unit through LCA. Journal of Cleaner Production, 384, 135480. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135480

Lim, A. E. K., Perkins, A., & Agar, J. W. M. (2013). The carbon footprint of an Australian satellite haemodialysis unit. Australian Health Review, 37(3), 369. https://doi.org/10.1071/AH13022

Mtioui, N., Zamd, M., Ait Taleb, A., Bouaalam, A., & Ramdani, B. (2021). Carbon footprint of a hemodialysis unit in Morocco. Therapeutic Apheresis and Dialysis, 25(5), 613–620. https://doi.org/10.1111/1744-9987.13607

Piccoli, G. B., Nazha, M., Ferraresi, M., Vigotti, F. N., Pereno, A., & Barbero, S. (2015). Eco-dialysis: The financial and ecological costs of dialysis waste products: is a „cradle-to-cradle“ model feasible for planet-friendly haemodialysis waste management? Nephrology Dialysis Transplantation, 30(6), 1018–1027. https://doi.org/10.1093/ndt/gfv031

Kontakt

Alina Krieger, B. Sc. Wirtschaftsingenieurwesen
Hochschule Pforzheim
E-Mail: kriegera@hs-pforzheim.de

Jonathan Mahl, Krassimir Garbev, Hans-Joachim Gehrmann, Aaron Münch, Jule Stumpf, Manuela Wexler, Dieter Stapf

Untersuchung des thermochemischen Abbauverhaltens von Carbonfasern in Zementklinker

***Abstract**: Der zunehmende Einsatz carbonfaserverstärkter Kunststoffe (CFK), beispielsweise durch den Neubau von Windenergieanlagen, führt zu einem stetigen Anstieg carbonfaserhaltiger Abfallströme. Während für bestimmte Fraktionen bereits fasererhaltende Recyclingverfahren existieren, fehlt bislang ein geeignetes Entsorgungskonzept für nicht-rezyklierbare Fraktionen. Aufgrund der hohen Prozesstemperaturen und der langen Verweilzeiten des Feststoffs im Drehrohrofen erscheint der Zementklinkerprozess grundsätzlich für einen vollständigen oxidativen Abbau von Carbonfasern (CF) geeignet zu sein.*

Im Rahmen dieser Arbeit wird das thermochemische Abbauverhalten von CF in synthetischem Rohmehl (RM) unter Variation des Eisenoxidanteils untersucht. Hierzu wurden CF dem RM zugesetzt und in einem Muffelofen unter Stickstoffatmosphäre bis zu Temperaturen von 1500 °C thermisch behandelt. Die Ergebnisse zeigen, dass CF im RM unter den gegebenen Bedingungen nicht vollständig abgebaut werden. Die Hauptoxide des RM (CaO, SiO_2, Al_2O_3, MgO) reagieren nicht mit den CF. Eisenoxide (FeO, Fe_2O_3) hingegen fungieren als Sauerstoffdonatoren und ermöglichen einen oxidativen Abbau der Fasern. Dieser erfolgt über eine carbothermische Reduktion der Eisenoxide unter Bildung von CO bzw. CO_2. Ein erhöhter Eisenoxidanteil im RM bedingt jedoch die Bildung von Calciumaluminatferrit (Brownmillerite) im Zementklinker, was die Ausbeute an den beiden wichtigen Mineralphasen Tricalciumsilikat (Alit) und Dicalciumsilikat (Belit) verringert. Das bedeutet eine geringere Zementqualität bezüglich Abbindezeit und Festigkeit. Ein Austrag lungengängiger Faserfragmente in die Gasphase konnte während der Versuche nicht nachgewiesen werden.

1 Einleitung

Carbonfasern (CF) werden vorwiegend zur Verstärkung von Kunststoffen eingesetzt. Die Hauptanwendungsbereiche von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) sind die Luft- und Raumfahrt, der Fahrzeugbau sowie Rotorblätter von Windenergieanlagen (Witten und Mathes 2024). Aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften bei geringer Dichte ermöglichen CFK eine Gewichtsreduktion der Bauteile und schonen somit während der Produktlebenszeit Material- und Energieressourcen (Lengsfeld et al. 2019). Der damit verbundene globale Anstieg des CFK-Bedarfs führt jedoch zu einer Zunahme von CF-haltigen Abfällen (Lefeuvre et al. 2019). Zwar ermöglichen verschiedene Recyclingverfahren z.B. die Pyrolyse und die Solvolyse grundsätzlich eine Rückgewinnung der Fasern, jedoch nehmen dabei die Faserlänge und -orientierung sowie die mechanische Leistungsfähigkeit ab. Gleichzeitig entstehen nicht rezyklierbare Fraktionen, die einer sonstigen Verwertung zugeführt werden müssen (Kühne und Stapf 2022). Eine Verwertung dieser CF-Abfallfraktion in konventionellen Verbrennungsanlagen ist nicht möglich, da sie bei den vorliegenden Prozessparametern (u. a. Verweilzeit, Temperatur) nicht vollständig oxidativ abgebaut werden (Quicker und Stockschläder 2021). Dem Gegenüber weist die Zementklinkerproduktion mit hohen Temperaturen und langen Verweilzeiten des Feststoffs im Drehrohr Bedingungen auf, die für einen vollständigen Abbau von CF geeignet sein könnten (Zeschmar-Lahl et al. 2020).

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des thermochemischen Abbauverhaltens von CF in der Feststoff- bzw. Schmelzphase unter prozessnahen Bedingungen des Zementklinkerbrennens. Untersucht werden dabei die Einflüsse zentraler Prozessparameter, insbesondere der Temperaturführung (Heizrate, maximale Prozesstemperatur, isotherme Haltezeit), der Gasatmosphäre (Luft bzw. Stickstoff) sowie der chemischen Zusammensetzung des Rohmehls (RM), wobei der Schwerpunkt auf der Variation des FeO bzw. Fe_2O_3Gehalts liegt. Im Mittelpunkt steht die Identifikation der reaktiven Phase(n) bzw. der reaktiven Komponenten des RM, die maßgeblich zum Abbauverhalten beitragen. In der vorliegenden Darstellung werden ausschließlich die Ergebnisse der Versuchsreihe mit variierendem FeO-Anteil berücksichtigt.

2 Methodik

Zunächst wird eine synthetische RM-Mischung auf Basis einer typischen Portlandzementzusammensetzung aus den Hauptoxiden CaO, SiO_2, Al_2O_3 und MgO hergestellt. Diese Grundmischung wird mit variierenden Anteilen von FeO im Bereich von 0,0 wt.% bis 15,0 wt.% ergänzt. Den so modifizierten Versuchsmischungen werden zusätzlich 10,0 wt.% einer handelsüblichen, auf Polyacrylnitril basierenden CF (unbeschlichtet und vom Hersteller geschnitten) zugesetzt, um die finalen Probenmischungen zu erhalten.

Die chemische Zusammensetzung der Probenmischungen sowie der nach der thermischen Behandlung gebildeten Produkte wird mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA, TIGER8, Bruker-AXS) und Röntgendiffraktometrie (XRD, Empyrean, Malvern-Panalytical) charakterisiert. Die Partikelgrößenverteilung der Ausgangskomponenten sowie der CF und die Homogenität der Mischungen werden durch digitale Lichtmikroskopie (VHX-6000, Keyence) in Kombination mit einer eigens entwickelten Bildanalyse ermittelt.

Für die thermische Behandlung werden jeweils 10 g der Probenmischung in einem 25-ml-Platintiegel eingebracht und in einem Muffelofen (HTL 04/40, Thermoconcept) unter kontrollierten Bedingungen erhitzt. Die Erwärmung erfolgt mit einer Heizrate von 20 K/min bis zu einer Endtemperatur von 1500 °C, gefolgt von einer Abkühlphase. Über eine definierte Gaszufuhr wird im Ofenraum eine Stickstoffatmosphäre eingestellt. Die während des Prozesses entstehenden Produktgase werden mittels nichtdispersiver Infrarotspektroskopie (NDIR X-STREAM XEGK, Emerson Process Management) auf O_2, CO und CO_2 analysiert, um Rückschlüsse auf die ablaufenden Reaktionen zu ermöglichen. Die Massenabnahme der Probe wird gravimetrisch bestimmt. Zusätzlich werden die potenzielle Bildung und Freisetzung lungengängiger CF-Fragmente durch eine Filtration vor der Gasanalyse abgeschätzt.

3 Ergebnisse

3.1 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Mittels digitaler Lichtmikroskopie in Kombination mit einer nachgeschalteten Bildanalyse wurden die minimalen und maximalen Feret-Durchmesser der CF ermittelt. Insgesamt wurden 4013 Einzelobjekte einer Probe quantitativ ausgewertet. Der Anteil der Partikel (Länge/Durchmesser < 3) beträgt etwa 80 %, während der Anteil der Fasern (Länge/Durchmesser ≥ 3) bei rund 20 % liegt. Etwa 6 % der detektierten Fasern entsprechen der von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) definierten kritischen WHO-Fasergeometrie (Länge/Durchmesser ≥ 3; Länge ≥ 5 µm; Durchmesser < 3 µm), die hinsichtlich Lungengängigkeit und potenzieller toxikologischer Wirkung als relevant eingestuft wird. Die Fasern weisen einen minimalen Feret-Durchmesser < 10 µm sowie einen maximalen Feret-Durchmesser von < 150 µm auf, was den Herstellerangaben entspricht.

Die mittels RFA bestimmte chemische Zusammensetzung des RM zeigt mit 62,2 wt.% CaO, 21,3 wt.% SiO_2, 7,8 wt.% Al_2O_3 und 3,8 wt.% MgO eine für Portlandzementrohmehle charakteristische Hauptoxidverteilung. Bei den mit FeO angereicherten RM-Mischungen liegen die tatsächlich erreichten FeO-Gehalte geringfügig unter den Zielwerten, wobei die Abweichungen in allen Fällen < 10 % betragen.

3.2 Einfluss des FeO-Gehalts auf das thermochemische Abbauverhalten von CF

In Abbildung 1 (links) sind die zeitlichen Verläufe der gemessenen CO_2-Konzentrationen sowie der Ofentemperatur für die Versuchsreihen zum thermochemischen Abbauverhalten von CF in RM unter Variation des FeO-Gehalts in Stickstoffatmosphäre dargestellt. Beim Versuch mit reinem RM zeigt sich nach etwa 66 min bei einer Ofentemperatur von rund 1200 °C ein deutlicher Anstieg der CO_2-Konzentration. Dieser verstärkt sich bei etwa 1400 °C nochmals signifikant, bevor die CO_2-Konzentration ab 1500 °C abrupt abfällt. Ergänzende Untersuchungen belegen, dass dieser Verlauf weder auf strukturelle Veränderungen der CF noch auf eine Reduktion des SiO_2 zurückzuführen ist. Letzteres wurde durch Versuche mit integrierter Haltezeit bei 1500 °C ausgeschlossen. Als mögliche Ursachen kommen daher Verunreinigungen im Platintiegel, Reaktionen mit dem Tiegelmaterial bzw. katalytische Effekte von Platin oder ein erhöhter Falschluftanteil infolge von Undichtigkeiten im Ofensystem in Betracht.

Im Versuch mit 5,0 wt.% FeO tritt ein charakteristischer CO_2-Peak im Temperaturbereich zwischen 800 °C und etwa 1200 °C auf. Dieser ist auf die carbothermische Reduktion von FeO durch den Kohlenstoff der CF zurückzuführen. Zu berücksichtigen ist hierbei ein Falschluftanteil von ca. 7,0 vol.%, wodurch die Reduktion zusätzlich über CO erfolgen kann. Mit steigendem FeO-Gehalt im RM nimmt die Intensität dieses CO_2-Peaks entsprechend zu.

In Abbildung 1 (rechts) ist der auf Grundlage der gravimetrischen Analyse bestimmte Probenumsatz dargestellt. Es zeigt sich, dass der Umsatz mit steigendem FeO-Gehalt des RM zunimmt. Der maximal mögliche Probenumsatz, der sich aus dem vollständigen Abbau der CF ergibt, wird jedoch nicht erreicht.

Lichtmikroskopische Aufnahmen bestätigen, dass in allen Proben CF nach der thermischen Behandlung verbleiben. Im RM mit 5,0 wt.% FeO bleiben die Faserdurchmesser weitgehend erhalten, wobei der Verlust des Faserglanzes auf einen leichten oxidativen Angriff hindeutet. Mit zunehmendem FeO-Gehalt verstärken sich oxidative Schäden, sichtbar durch lokalen Lochfraß und eine Verringerung des Faserdurchmessers. Die Braunfärbung der gebrannten Produkte deutet auf die Bildung von Calciumaluminatferrit (Brownmillerit) hin, was durch XRD-Analysen bestätigt wurde.

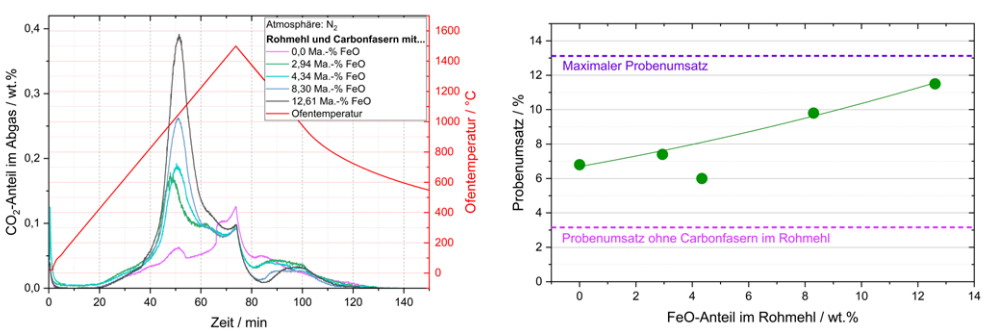


Abbildung 1: CO_2-Konzentration und Ofentemperatur in Abhängigkeit der Versuchszeit bei variierendem FeO-Gehalt im Rohmehl (links); gravimetrisch bestimmter Probenumsatz bei variierendem FeO-Gehalt im Rohmehl (rechts).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend zeigt sich, dass CF im synthetischen RM unter den gegebenen Bedingungen nicht vollständig thermochemisch abgebaut werden. Die Hauptoxide des RM (CaO, SiO_2, Al_2O_3, MgO) verhalten sich inert, während FeO als Sauerstoffdonator zum oxidativen Abbau beiträgt. Der Abbau erfolgt über die carbothermische Reduktion des Eisenoxids unter Bildung von CO bzw. CO_2. Ein erhöhter FeO-Anteil im RM begünstigt jedoch die Bildung von Brownmillerit, was die Ausbeute an Tricalciumsilikat (Alit) und Dicalciumsilicat (Belit) verringert. Das hat eine geringere Zementqualität bezüglich Abbindezeit und Festigkeit zur Folge. Ein Austrag lungengängiger Faserfragmente in die Gasphase wurde nicht beobachtet.

Bereits untersucht wurden weitere Einflussfaktoren wie die CF-Geometrie, die CF-Struktur und das CF-Precursormaterial, die Korngröße des RM sowie die Ofenatmosphäre und die Heizrate.

Zukünftig soll der CF-Umsatz über Elementaranalysen der Reaktionsprodukte quantifiziert werden. Ergänzend sind Untersuchungen mit realem RM vorgesehen, um Effekte der tatsächlichen Korngrößenverteilung und von Verunreinigungen (z. B. K_2O, Na_2O) abzubilden. Darüber hinaus sind Versuche geplant, bei denen die Durchmischung der Feststoff bzw. Schmelzphase über Gasinjektion realisiert wird.

Literatur/Quellen

Kühne, Christian; Stapf, Dieter (Hg.) (2022): Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter. TEXTE 92/2022. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-von-rueckbau-recyclingstandards-fuer.

Lefeuvre, Anaële; Garnier, Sébastien; Jacquemin, Leslie; Pillain, Baptiste; Sonnemann, Guido (2019): Anticipating in-use stocks of carbon fibre reinforced polymers and related waste generated by the wind power sector until 2050. In: *Resources, Conservation and Recycling* 141, S. 30–39. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.10.008.

Lengsfeld, Hauke; Mainka, Hendrik; Altstädt, Volker (2019): Carbonfasern. Herstellung, Anwendung, Verarbeitung. München: Hanser (Hanser eLibrary). Online verfügbar unter https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446460805.

Quicker, Peter; Stockschläder, Jan (2021): Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung carbonfaserverstärkter Kunststoffabfälle in thermischen Prozessen. UBA-Texte 131/2021. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Witten, Elmar; Mathes, Volker (2024): Der europäische Markt für Faserverstärkte Kunststoffe / Composites 2023. Marktentwicklungen, Trends, Herausforderungen und Ausblicke. Online verfügbar unter https://www.avk-tv.de/der-europaeische-composites-markt-2023-marktentwicklungen-trends-herausforderungen-und-ausblicke/, zuletzt geprüft am 27.05.2024.

Zeschmar-Lahl, Barbara; Schönberger, Harald; Waltisberg, Josef (2020): Abfallmitverbrennung in Zementwerken. Sachverständigengutachten. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abfallmitverbrennung-in-zementwerken, zuletzt geprüft am 11.12.2025.

Kontakt

Jonathan Mahl, wissenschaftlicher Mitarbeiter
Karlsruher Institut für Technologie / Institut für Technische Chemie
Tel.-Nr. 0721 608 28215 – E-Mail: jonathan.mahl@kit.edu – Homepage: https://www.itc.kit.edu/

Natalie Marzinek, Hannah Weber, Gerald Koinig, Alexia Tischberger-Aldrian

Analyse und Bewertung der Recyclingfähigkeit von Matratzenüberzügen durch Merkmalserfassung und Materialcharakterisierung

***Abstract**: Matratzenbezüge stellen eine wachsende Herausforderung im Textilrecycling dar – insbesondere vor dem Hintergrund der seit 2025 EU-weit geltenden Getrenntsammelpflicht für Alttextilien und der Einführung eines EPR-Systems. Für die werkstoffliche Verwertung ist eine präzise Sortierung nach Faserzusammensetzung entscheidend. In der vorliegenden Studie wurden 315 Post-Consumer-Matratzenbezüge aus Abfallsammelzentren analysiert. Diese Produkte haben typischerweise eine Nutzungsdauer von 10–15 Jahren, was zeigt, dass Designentscheidungen erst mit erheblicher zeitlicher Verzögerung im Recycling ankommen – ein kritischer Aspekt für die Etablierung von Ökodesign-Standards. Die Bezüge wurden hinsichtlich Schichtaufbau, Verbindungstechniken, Faserzusammensetzung sowie Zusatzkomponenten (z. B. Reißverschlüsse, Kantenbänder) systematisch charakterisiert. Hauptsächliche Fasertypen waren Polyester (65 %), Baumwolle (12 %) und Wolle (3 %). Häufig traten komplexe Mischungen mit bis zu fünf verschiedenen Fasertypen innerhalb einer Schicht auf. Die Alttextilien wurden zudem mit aktuellen Produkten auf dem Markt verglichen, um Entwicklungen im Materialeinsatz und Potenziale für recyclinggerechtes Design zu identifizieren. Die Ergebnisse verdeutlichen die strukturelle und stoffliche Komplexität von Matratzenbezügen und die damit verbundenen Herausforderungen für die optische Sortierung. Durch die Kombination von empirischer Materialanalyse und systematischer Bewertung der Recyclingfähigkeit trägt die durchgeführte Masterarbeit zur Weiterentwicklung spezialisierter Recyclingverfahren bei und zeigt auf, dass die Ergebnisse auch auf andere Heimtextilien übertragbar sein könnten. Damit wird ein Beitrag zur Umsetzung europäischer Kreislaufwirtschaftsziele geleistet.*

1 Einleitung

In der Europäischen Union fallen jährlich rund 30 Millionen gebrauchte Matratzen und Matratzenbezüge an (Hügli, 2023). Da Matratzen aus hygienischen Gründen meist bereits nach ca. fünf Jahren ersetzt werden, entsteht ein kontinuierlich wachsender Abfallstrom. Die derzeitige Entsorgungspraxis ist jedoch ökologisch problematisch: Ein Großteil der Matratzen wird deponiert oder energetisch verwertet, während stoffliche Recyclingwege bislang nur eine geringe Rolle spielen (Demandt, 2023). Während sich der öffentliche Diskurs im Bereich Textilrecycling in erster Linie auf Bekleidung konzentriert, bleiben Heimtextilien – insbesondere Matratzenbezüge als äußere textile Hülle von Matratzen – weitgehend unbeachtet. Dabei stellen gerade Matratzenüberzüge aufgrund ihrer komplexen, mehrschichtigen Materialstrukturen eine besondere Herausforderung für das Recycling dar. Unterschiedliche Faserkombinationen, Versteppungen und zusätzliche Ausstattungselemente erschweren sowohl die Sortierung als auch die materialseitige Verwertung. Gleichzeitig ist das Wissen über die tatsächliche Materialzusammensetzung und konstruktive Ausführung der am Markt verfügbaren Bezüge bislang begrenzt. Für die Entwicklung recyclingfreundlicher Produktdesigns sowie für fundierte Ökodesign-Vorgaben ist jedoch eine systematische Erfassung dieser Merkmale unerlässlich.

Vor diesem Hintergrund untersucht der vorliegende Beitrag die Recyclingfähigkeit von Matratzenüberzügen durch eine umfassende Merkmalserfassung und Materialcharakterisierung. Grundlage bildet eine Situationsanalyse des aktuellen Marktes, die die eingesetzten Materialien und strukturellen Merkmale identifiziert und hinsichtlich wiederkehrender Muster und Besonderheiten auswertet. Ergänzend erfolgt ein Abgleich der Marktbeobachtungen mit der Faserzusammensetzung gebrauchter PC-Matratzenbezüge.

2 Methodik

2.1 Marktanalyse

Es wurde eine Situationsanalyse des Marktes für Matratzenbezüge durchgeführt, die sich auf ein klar abgegrenztes Zeitintervall und die zentrale Fragestellung konzentrierte, welche Materialien derzeit in handelsüblichen Bezügen eingesetzt werden. Dafür wurden Produkte von fünf ausgewählten Matratzenherstellern untersucht, die sowohl marktführende Unternehmen als auch kleinere Nischenanbieter repräsentieren. Im Mittelpunkt stand die systematische Erfassung relevanter Produkteigenschaften, darunter Preis, Material des Bezugs und der Bezugsfüllung, Grammatur der Füllung, Art der Steppung, Reißverschlussausführung sowie weitere konstruktive Besonderheiten.

2.2 Probencharakterisierung

Zur systematischen Erhebung der Materialvielfalt von Post-Consumer-Matratzenbezügen wurden insgesamt 315 Eckstücke (30 × 30 cm) aus drei österreichischen Altstoffsammelzentren beprobt. Erfasst wurden die Anzahl und der Aufbau der optisch trennbaren Schichten, die Abstände und Muster der Versteppung, funktionale Elemente (z. B. Reißverschlüsse, Kantenbänder) sowie gestalterische Merkmale. Ergänzend erfolgte eine materialanalytische Untersuchung jeder einzelnen Schicht mittels Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR).

2.3 Vergleich zwischen Marktangebot und realen Abfällen

Die Ergebnisse der Marktanalyse wurden auf wiederkehrende Muster, Unterschiede und Besonderheiten hin analysiert. Anschließend erfolgte ein Vergleich der aktuellen Marktsituation mit der Faserzusammensetzung der PC-Matratzenbezüge.

3 Ergebnisse

3.1 Vergleich der Faserzusammensetzung

Das breitere Spektrum an Fasertypen und Fasertypkombinationen, das bei der Analyse der im experimentellen Teil untersuchten Post-Consumer-Matratzenbezüge (PC-Bezüge) festgestellt wurde, zeigte sich auch im aktuellen Marktsortiment deutlich. Die Marktanalyse ergab, dass neben Polyester und Baumwolle auch Viskose, Polypropylen, Polyurethan sowie Funktionsfasern wie Elastan zum Einsatz kommen. Besonders auffällig bei der Marktanalyse war die verstärkte Verwendung der synthetischen Cellulosefaser Tencel. Die dominierenden Fasertypen traten dabei unabhängig vom Preis oder der Positionierung des Produkts (Discounter oder Premiumsegment) auf. Die erwartbare Korrelation zwischen hochwertigen Materialien und höheren Preisen ist somit nicht durchgängig erkennbar. Hinsichtlich der Faser mit dem größten Massenanteil (= Hauptfaser) zeigten sich keine Unterschiede zwischen dem aktuellem Markangebot und den PC-Bezügen. Überwiegend kam bei den beprobten Matratzenbezügen Polyester (65% Massenanteil)

zum Einsatz. Die Faseranteile in allen untersuchten Matratzenbezügen, differenziert nach Fasertyp sind in Abbildung 1 dargestellt. Monomaterial-Bezüge fanden sich bei der Marktanalyse vor allem im unteren Preissegment (100% PES) sowie bei ökologisch positionierten Produkten (100% CO) wieder, wohingegen im höherpreisigen Bereich Materialkombinationen mit Fokus auf Funktionalität dominierten.

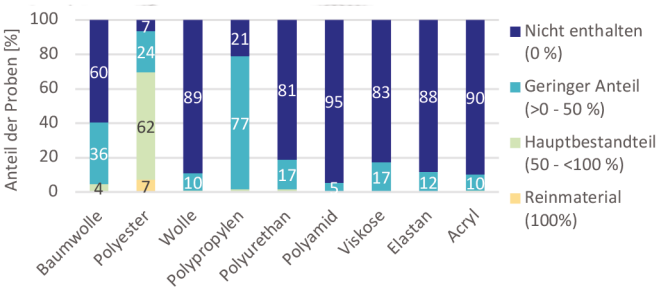


Abbildung 1: Faseranteile nach Faserart von 315 beprobten PC-Matratzenbezügen

Funktionselemente wie Kantenbänder oder Reißverschlüsse sind heutzutage Standard. Die abnehmbare und waschbare Ausführung stellt dabei einen positiven Trend in Bezug auf Hygiene und Lebensdauer dar, wenngleich sich durch das Vorhandensein eines Reißverschlusses die Anzahl an eingesetzten Materialien erhöht. Zusammenfassed lässt sich sagen, dass die Vielfalt an Fasertypkombinationen und der Einsatz von Funktionselementen über die Zeit hinweg konstant geblieben sind. Der Trend geht bei hochpreisigen Produkten zu einer höheren funktionalen Differenzierung, jedoch auch zum Einsatz von recycelten Fasern. Im niedrigpreisigen Bereich haben sich die Fasertypkombinationen in den letzten Jahren kaum verändert.

3.2 Transparenz der Herstellerangaben

Bei den PC-Bezügen war eine Differenzierung zwischen Ober- und Unter- bzw. Randseite in 40% der Proben erkennbar; dies fand sich auch im aktuellen Sortiment wieder. Hersteller machen meist detaillierte Angaben zu materialseitigen Unterschieden, wenngleich die Bezeichnungen für Ober-/Unterseite vielfältig und nicht auf Anhieb erkennbar waren. Insgesamt sind die Herstellerangaben zu aktuellen Produkten jedoch uneinheitlich und teils durch Marketingbegriffe verschleiert (z. B. QuickRefresh™, SmartCool™), wodurch die Glaubwürdigkeit kritisch hinterfragt werden sollte. Angaben zur Anzahl der Schichten oder zur genauen Zusammensetzung innerhalb einzelner Schichten fehlen weitgehend, obwohl diese für die Bewertung der Recyclingfähigkeit entscheidend wären. Zudem variiert die Zugänglichkeit der Informationen stark: Auf manchen Websites sind relevante Angaben klar strukturiert und gut auffindbar, während sie bei anderen vollständig fehlen. Hersteller, die sich an ein umweltbewusstes Publikum richten – etwa mit Fokus auf Nachhaltigkeit oder natürliche Materialien – stellen in der Regel deutlich strukturiertere, leicht auffindbare und inhaltlich fundierte Informationen zur Verfügung.

4 Fazit und Handlungsempfehlungen

4.1. Förderung von Ökodesign

Um Recyclingprozesse zu erleichtern, sollten verbindliche Anforderungen an das Produktdesign von Matratzen festgelegt werden. Hierzu zählen die Begrenzung der Faserkomplexität, das Verwenden von leicht trennbaren Verbindungen, der Verzicht auf nicht-funktionale Designelemente, die Minimierung von Beimischungen, die Förderung der Reparierbarkeit sowie die Einführung von Mindestquoten für den Rezyklateinsatz.

4.2 Transparenz, Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit

Eine zentrale Voraussetzung für hochwertige Recyclingprozesse ist die Bereitstellung verlässlicher Informationen über die Materialzusammensetzung und Struktur von Produkten. Der Gesetzgeber sollte daher eine Anpassung der bestehenden Textilkennzeichnungsverordnung sowie die Einführung von einheitlichen Labels in Betracht ziehen.

4.3 Sortierung

Eine herstellerbasierte Sortierung könnte grundsätzlich sinnvoll sein, sofern sich innerhalb der Produktlinien eines Herstellers konsistente Materialzusammensetzungen zeigen. So wäre etwa bei Herstellern wie Emma, die überwiegend PES-Bezüge einsetzen, eine relativ homogene Fraktion zu erwarten. In der Praxis dürfte eine solche Sortierung jedoch mit erheblichem organisatorischen Aufwand verbunden sein, da Informationen zum jeweiligen Hersteller beim Alttextil in der Regel nicht mehr verfügbar oder lesbar sind. Eine praktikable Umsetzung wäre nur denkbar, wenn entsprechende Informationen digital hinterlegt und abrufbar wären, etwa über einen digitalen Produktpass. Dadurch ließe sich nicht nur die herstellerbezogene Zuordnung, sondern auch eine materialspezifische Sortierung realisieren.

Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Wirtschaft, Energie und Tourismus und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Weiters bedanken wir uns sehr herzlich für die finanzielle und inhaltliche Unterstützung durch unsere Unternehmenspartner, in alphabetischer Reinfolge: 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

Demandt, M., 2023. Extended Producer Responsibility (EPR) in der Matratzenindustrie (Wuppertaler Studienarbeiten zur nachhaltigen Entwicklung Nr. 33). Wuppertal Institut, Wuppertal.

Hügli, J., 2023. Closed Textile Cycle for Communally Collected Postconsumer Mattress Covers in Europe. Presented at the Future Textile Conference, Bristol.

Kontakt

Ass.Prof. DI Dr.mont. Alexia Tischberger-Aldrian
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft
Montanuniversität Leoben
Tel.: +43 3842 402 5116
E-Mail: alexia.tischberger-aldrian@unileoben.ac.at

Inken Maria Michael, Kathrin Greiff

Achieving Circularity through LCA Integration in Product Life Cycle Management Systems

***Abstract**: Integrating life cycle assessment (LCA) into early product design is necessary for achieving environmental sustainability and circularity. Yet, it remains difficult to implement due to the complexity of design spaces, computationally expensive models, and methodological inconsistencies. This work proposes a two-level perspective on LCA integration, addressing both mathematical decision support methods and data-management workflows. The analysis demonstrates that common methods are suitable for distinct problem types and current method selection based on convention rather than suitability. Next to mathematical decision support methods, product life cycle management (PLCM) systems are examined as a holistic framework for structuring, linking, and tracing product data across life cycle stages. Combining the most suitable frameworks for both decision support, as well as data-management, environmentally informed decision making can fundamentally influence the sustainability and circularity of a product early on.*

1 Introduction

To further promote the circularity of materials and products, it is important to take appropriate measures for a successful circular economy right from the start of a product's development (Santochi et al. 2002). At the same time, it is important to prevent negative environmental impacts as early as possible (Chu et al. 2012). To this end, the iterative process of product manufacturing, usage, subsequent environmental impact analysis, and redesign should be avoided. Instead, precautions should be taken during the design phase. However, the seemingly endless decision-making options in product design not only lead to organizational difficulties, such as coordination between teams, standardization of design updates, or compatibility between data formats. Challenges also arise when performing life cycle assessments (LCA) for each decision path (Bouyarmane et al. 2019). LCA is the standard method for evaluating environmental impacts. The integration of LCA into the design phase is required to make design decisions based on the impacts each decision could have on the environment. This could concern the material selection and its recyclability potential, a product's longevity through physical design variations or the potential for repairing and replacing components, or the efficiency of a process. Depending on the complexity of the product, there may be far too many design variants to realistically perform a comprehensive LCA for each one. On the one hand, the data basis for each variant must be detailed enough to realistically represent each life cycle and its impacts. On the other hand, this high volume of LCA implementations also requires significant computing power (Greif et al. 2025). To address the problems of data-management and early decision making based on environmental influences, the different methods of integration on a mathematical and data-management level are presented here, with a focus on product life cycle management (PLCM) systems. PLCM, on the data-management level, ensures transparent collaboration between different work groups so that everyone is up to date, with access to necessary documents, models, or guidelines, and all data has already been adapted for compatibility. The state of the art in PLCM systems currently covers the disciplines of mechanics, electronics, software, and systems engineering, without incorporating any type of LCA models (Chenavaz et al. 2025). The integration of LCA into PLCM systems opens up a new basis for decision making in the product design

phase by providing information on environmental impacts linked to a decision made (Chenavaz et al. 2025). At the same time, LCA decision-making methods are being developed and evaluated at the mathematical and computational level.

This work first outlines existing approaches for integrating LCA into early product design based on a systematic literature review. The review reveals two different challenges. On one hand, decision makers require mathematical methods that allow comparing design alternatives based on environmental impacts. On the other hand, the availability, structure, and traceability of life cycle data across disciplines poses a complex data-management task. Thus, a two-level perspective on LCA integration, differentiating between (i) mathematical decision-support methods, and (ii) workflow-oriented data-management frameworks is adopted and described within the following sections, with PLCM systems as a central structuring element.

2 An overview on mathematical approaches and integration options in PLCM

2.1 Mathematical integration methods

Literature research including over 196 articles from 2000 onwards indicates the use of several mathematical methods to computationally support the decision making within the product design phase based on LCA results. Those methods concern multi-criteria discrete alternative problems (MCDA) as part of multi-criteria decision making (MCDM), multi-objective optimization problems (MOO), machine learning-based decision support (ML), simulation, and assisting surrogate models (SM). Each method is suitable for a different problem, as each method requires varying amounts of data availability, distinct degrees of detail in problem definitions, or computational effort, which also correlates with monetary properties. Taking MCDA and MOO, also known as the MCDM subcategory multi-criteria optimization problems, for an exemplary comparison, differences in required parameters, problem definitions, and computational effort can be concluded. MCDA, as the name suggests, deals with a limited, discrete, number of problem alternatives, where mainly parameters are needed for the criteria to be evaluated. Additionally, a basis for preference weighting is required, to set a foundation for subsequent criteria scoring (Wallenius et al. 2008). On the other hand, MOO does not deal with discrete product alternatives. Instead, a problem needs to be described in detail based on equations for physical properties and correlations. To constrain the subsequent calculations, parameters portray the bounds within realistic problem-specific ranges. The subsequent optimization is then carried out, searching (near-)optimal solutions within the extensively defined solution space (Belton and Stewart, 2003; Floudas and Pardalos, 2009). This search within a continuous range can quickly become an expensive task in comparison.

As products can vary in properties, data availability, or complexity, the choice of a suitable decision method is necessary. So far, decision-makers predominantly choose a decision-making method with LCA integration based on popularity or familiarity (Guitouni and Martel, 1998), even if the chosen method might not be the most suitable. Within future research, I aim to provide a guideline on finding the appropriate mathematical method for varying product types.

2.2 Workflow support and product life cycle management

In previous research, data-management for LCA integration within a product's design phase is conducted randomly without following common guidelines. Proposed frameworks aim to provide data across systems, e.g., via linking Excel tables, automated coupling of modeling software, or manual iterative extraction of data between LCA model results and mechanical models (Javanmard and Nava, 2025; Fang et al. 2024; Greif et al. 2025). For identifying hotspots or structuring a system's data, several screening tools and problem specif-

ic structuring frameworks are proposed (Li et al. 2024; Goridov et al. 2025; Cheali et al. 2015). While those methods depict a basis for design phase data-management, only a few are offering a holistic framework that is transferable onto several product types.

PLCM represents such a holistic product system-wide framework for dealing with data. The fundamental idea of PLCM is to provide correct information at the correct time in the correct data format to every person, institution, or system involved in a product's life. Most definitions of PLCM categorize it as a business activity for managing products (Stark et al. 2022). In context of integrating life cycle impact information into the design phase of a product, PLCM is viewed less from a business and more from an engineering viewpoint. This includes managing product data via product models, linking information and data across the whole life cycle for traceability and across different systems, providing a "Single Point of Truth" for the source of data, and supporting decision making through allocated information. The information for a product can be subdivided into three categories: (1) steps of a product's life cycle, (2) disciplines that describe a product's characteristics, and (3) the stakeholder network for the aspect of interest in a product. In PLCM, product data is divided into three entities, i.e., a set of articles, a set of documents, and a set of files. Those three entities are separate from each other and are not linked until the relations are added. The first linkage, 'Bill of Materials', assigns subordinate articles to their superordinate article. Each subordinate article can also consist of several sub-subordinate articles, all listed hierarchically (Eigner and Stelzer, 2009). By structuring product information consistently across life cycle stages, PLCM does not solve LCA integration by itself, but it offers the structural and organizational framework for a holistic, system-wide LCA integration in early product design.

3 Outlook and conclusion

Future work will systematically clarify in detail what each mathematical integration method requires, what their advantages and limitations are, and what product type they are most suitable for. Rather than treating methods like MCDA, MOO, or ML-based approaches as interchangeable tools, their applicability will be differentiated based on product complexity, data availability, required problem knowledge, and provided computational effort. This addresses the current state of authors mainly choosing a method for LCA integration based on popularity, familiarity, or convention instead of suitability. Next to the mathematical support for decision making, the integration of LCA into product development is limited by data availability, structure, and traceability. Therefore, a second focus, a holistic data-management support, shall be investigated. With PLCM suggested as a framework, it is mandatory to analyze data requirements, data formats, and modeling systems associated with LCA. Additionally, the timing on integrating LCA information into product design phases needs to be evaluated as well. Resulting from this, the data from and for an LCA model can be made available with the most suitable properties. In conclusion, the results indicate that by combining suitable integration methods with structured data-management enables environmentally informed design decisions at early development stages. This integrated perspective has the potential to significantly influence product sustainability and circularity before design freedom is constrained. For both, the mathematical and data-management level, the theoretical guidelines will be validated using practical case studies on fiber-reinforced polymer composites. Those composites represent an example of a problem with high design freedom, complex material structures, and challenging end-of-life scenarios. Outcomes will display the practicality of proposed method selection guidelines to support sustainable product design.

Acknowledgements

I.M.M acknowledges funding by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) through the SFB TRR 402 “DediGrad” (project number: 525069572, Germany 2025).

References

Belton, V.; Stewart, T. (2003): Multiple Criteria Decision Analysis: An integrated Approach. Kluwer Academic Publishers. ISBN: 978-0-7923-7505-0.

Bouyarmane, H.; Mehdi, E.; Sallaou, M. (2019): Environmental assessment in the early stages of product design. 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA). 10.1109/ICOA.2019.8727611.

Cheali, P.; Gargal, C.; Gernaey, K.; Sin, G. (2015): A framework for sustainable design of algal biorefineries: Economic aspects and life cycle analysis. Springer International Publishing Switzerland. 10.1007/978-3-319-20200-6_17.

Chenavaz, R.; Dimitrov, S.; Figge, F.; Schlosser, R. (2025): Optimal product replacement: The dark sides of technological progress and the circular economy. Resources, Conservation and Recycling. 10.1016/j.resconrec.2025.108341.

Chu, C.; Su, J.; Chen, Y. (2012): A Concurrent Approach to Reducing Environmental Impact of Product Development at the System Design Stage. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 10.1109/TASE.2012.2194703.

Eigner, M.; Stelzer, R. (2009): Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. Springer. 10.1007/b93672.

Fang, L.; Lefranc, P.; Rio, M. (2024): Effective ecodesign implementation in power electronics: a method based on functional blocks. Cogent Engineering. 10.1080/23311916.2024.2382232.

Floudas, C.; Pardalos, P. (2009): Encyclopedia of Optimization. Springer US. 10.1007/978-0-387-74759-0.

Goridov, N.; Wang, Y.; Goucher-Lmabert, K. (2025): Empowering designers to create life cycle informed products: heuristics for extracting insights from LCA reports. Design Science. 10.1017/dsj.2025.10014.

Greif, L.; Hauck, S.; Kimmig, A.; Ovtcharova, J. (2025): A Knowledge Graph Framework to Support Life Cycle Assessment for Sustainable Decision Making. Applied Sciences. 10.3390/app15010175.

Guitouni, A.; Martel, J. (1998): Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. European Journal of Operational Research. 10.1016/S0377-2217(98)00073-3.

Javanmard, Z.; Nava, C. (2025): Python-driven sensitivity analysis of geometric parameters: Evaluating the impact of geometric variations on environmental performance of large office in Boston. Green Technologies and Sustainability. 10.1016/j.grets.2025.100222.

Li, M.; Gao, F.; Jin, M.; Sun, B.; Liu, Y.; Gong, X.; Nie, Z. (2024): Integrating sustainability into material design and selection through eco-design: A case study on aluminum alloy plates. Journal of Cleaner Production. 10.1016/j.jclepro.2024.144191.

Santoch, M.; Dini, G.; Failli, F. (2002): Computer Aided Disassembly Planning: State of the Art and Perspectives. CIRP Annals. 10.1016/S0007- 8506(07)61698-9.

Stark, J. (2022): Product Lifecycle Management (Volume 1): 21st Century Paradigm for Product Realisation. Springer International Publishing. 10.1007/978-3-030-98578-3.

Wallenius, J.; Dyer, J.; Fishburn, P.; Steuer, R.; Zionts, S.; Deb, K. (2008): Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: Recent Accomplishments and What Lies Ahead. Management Science. 10.1287/mnsc.1070.0838.

Contact

M.Sc., Inken Maria Michael, Research Associate
RWTH Aachen University, Department of Anthropogenic Material Cycles
Tel.: +49 241 8099350
E-Mail: imm@ants.rwth-aachen.de
Homepage: ants.rwth-aachen.de

Tannaz Naseri, Kerstin Kuchta

Evaluation of Failure Mechanisms and Regeneration techniques in NMC and LFP Batteries for Sustainable Circularity

***Abstract**: The rapid growth of electric vehicles (EVs) has led to a massive demand for Nickel-Manganese-Cobalt (NMC) and Lithium Iron Phosphate (LFP) as two important lithium-ion batteries (LIBs), which typically face retirement after 5 to 10 years. Traditional recycling methods like pyrometallurgy and hydrometallurgy are energy-intensive and often environmentally hazardous. Direct regeneration offers a nondestructive alternative by restoring degraded cathodes in situ, maintaining their structural integrity while significantly reducing energy consumption and carbon footprints. This study evaluates the specific degradation mechanisms of NMC and LFP chemistries and analyzes advanced direct regeneration strategies, such as molten salt relithiation, hydrothermal treatment, and advanced oxidation, to facilitate a sustainable circular battery economy.*

1 Introduction

The global transition toward clean energy has driven the LIB market to reach a projected size exceeding $100 billion by 2025 (Gao et al., 2025). Among various battery chemistries, high-energy NMC is favored for long-range EVs, while cost-effective and safe LFP dominates the energy storage and short-range vehicle sectors (Tang et al., 2024). However, the finite lifespan of these batteries creates a waste crisis, with millions of metric tons expected to reach end-of-life (EOL) by 2030 (Liu et al., 2025). Traditional recycling focuses on metal extraction through high-temperature smelting (pyrometallurgy) or acid leaching (hydrometallurgy), which destroys the valuable crystal structure and generates secondary pollution. Direct regeneration rejuvenates degraded electrode materials without complete structural breakdown, preserving the energy embedded during initial manufacturing. This process creates a closed-loop recycling system, from cathode to cathode, which maximizes economic returns and minimizes the environmental burden (Gao et al., 2025). Understanding the chemistry-specific failure mechanisms of NMC and LFP is essential for designing effective, scalable regeneration protocols.

2 Methodology

This research synthesized data from peer-reviewed articles (2019–2025) using databases such as ScienceDirect and Web of Science. The investigation focused on combined search terms like "NMC degradation" and "LFP regeneration". Selected studies were categorized based on their reaction chemistry, temperature ranges, and the specific lithium sources or reducing agents employed. The analysis compared Techno-Economic Analysis (TEA) and Life-Cycle Assessment (LCA) data to evaluate the feasibility of transitioning laboratory-scale direct regeneration to industrial levels.

3 Result and discussion

3.1 Failure Mechanisms: NMC vs. LFP

The investigation identified critical differences in how these two chemistries fail over time. The most common causes of degradation mechanisms, as summarized in Fig. 1.

NMC Degradation: Primary modes include micro-cracking along grain boundaries, transition-metal dissolution, and surface reconstruction to inactive rock-salt/spinel phases. High-nickel cathodes are particularly susceptible to oxygen release and anisotropic lattice strain, which radiatively fragments secondary particles (Jia et al., 2024).

LFP Degradation: Failure is driven by lithium depletion, the accumulation of Fe-Li antisite defects (FeLi), and the oxidation of Fe^{2+} to Fe^{3+}. Unlike NMC, LFP maintains high thermal stability but suffers from the deterioration of its essential carbon coating, which increases internal resistance and slows ion diffusion (Qi et al., 2024).

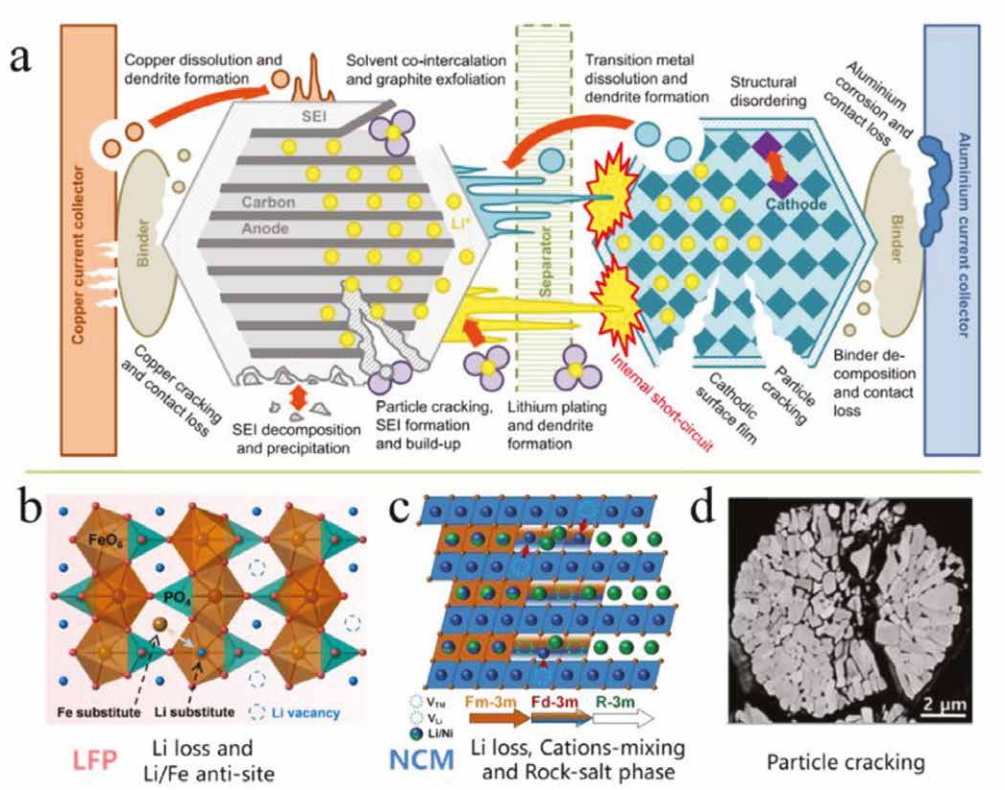


Fig.1. (a) Degradation mechanisms of LIBs. (b–d) Some typical structural degradation in the spent cathode. Adapted with permission from ref (Zhang et al., 2024)

3.2 Advanced Regeneration Strategies

Regeneration techniques must be tailored to address these specific structural failures. Typical DR technologies for spent cathode materials include chemical relithiation (CR), hydrothermal relithiation (HR), solid-state sintering (SS), electrochemical relithiation (ER), molten salt relithiation (MSR), and ionothermal relithiation (IR). In these methods, spent cathode materials are exposed to an excess lithium source and lithiumions aredrivenbackintothecrystalbyphysicalandchemicalmeans.Thetransitionmetal elements in spent cathode materials have a higher valence due to a lack of lithium ions. Transition metal elements are also reduced back to their lower valence during the regeneration process of spent cathode materials (Naseri & Mousavi, 2024).Table 1 is shown the summary different method of DR for regeneration for two dominant chemistries (LFP and NMC) in EVs and ESSs.

Table 1. Direct Regeneration Research for LFP and NMC Cathode Materials

DR Method	Cathod	Parameters/Process	Discharge Capacity	Capacity Retention/Cycling Stability	Ref.
SS	LFP	Oxidation-Reduction process by high-energy sand milling and spray drying.	Initial capacity 144.9 mAh/g at 1C. 135.4 mAh/g at 2C.	98% capacity retention after 400 cycles at 1C. 97% capacity retention after 400 cycles at 2C.	(Qu et al., 2025)
	NCM111	D-NCM111 + Li_2CO_3, sintering at 800 °C for 10h (with mechanochemical activation).	165 mAh/g at 0.2C.	Over 80% capacity retention after 100 cycles.	(Chi et al., 2021)
HT	LFP	Hydrothermal treatment using N, S-CQDs as multifunctional reductants.	Initial discharge capacity of 145.6 mAh/g (1C).	83.7% capacity retention after 1,000 cycles.	(Wang et al., 2025)
	NCM811	LiOH/NaCl molten salt (5:1 molar ratio) at 850 °C for 15 h.	Higher capacity than commercial NCM.	86.5% capacity retention after 200 cycles at 1C.	(Qin et al., 2024)
DES	LFP	Liacac on black mass. Followed by heat treatment for carbon coating.	140 mAh/g (1C retained capacity).	88.5% capacity retention after 400 cycles at 1C.	(Qin et al., 2024)
	NCM622	Redox mediator-assisted chemical relithiation (DTBQ), 3 h immersion (Full cell test).	Initial charge capacity 178.2 mAh/g	76.7% capacity retention after 100 cycles.	(Kim et al., 2025)

3.3 Economic and Environmental Impact

LCA data confirms that direct regeneration is the most environmentally efficient route. It can reduce greenhouse gas (GHG) emissions by up to 70% compared to mining virgin materials. In terms of profitability, direct regeneration of NCM523 can yield a profit of $1.99 to $2.46 per kg, significantly outperforming traditional hydrometallurgy, which often results in negative or marginal returns due to high chemical costs (Li et al., 2025; Wu et al., 2024).

Acknowledgement

This research was supported by the Alexander von Humboldt Foundation (AvH) under a Humboldt Research Fellowship.

References

Chi, Z., Li, J., Wang, L., Li, T., Wang, Y., Zhang, Y., Tao, S., Zhang, M., Xiao, Y., & Chen, Y. (2021). Direct regeneration method of spent LiNi 1/3 Co 1/3 Mn 1/3 O 2 cathode materials via surface lithium residues. *Green Chemistry, 2*3(22), 9099–9108. https://doi.org/10.1039/D1GC03526F

Gao, Z., Liu, Y., El-Bahy, Z. M., Chen, G., Helal, M. H., Lu, B., Han, J., & Zhou, J. (2025). Closed-Loop Recycling Methods to Treat Spent Cathode: Efficient and Direct Regeneration. *Advanced Functional Materials, 35*(35). https://doi.org/10.1002/adfm.202503674

Jia, K., Yang, G., He, Y., Cao, Z., Gao, J., Zhao, H., Piao, Z., Wang, J., Abdelkader, A. M., Liang, Z., Kumar, R. V., Zhou, G., Ding, S., & Xi, K. (2024). Degradation Mechanisms of Electrodes Promotes Direct Regeneration of Spent Li-Ion Batteries: A Review. *Advanced Materials, 3*6(23). https://doi.org/10.1002/adma.202313273

Kim, S., Shin, U., Yoon, H. J., Yoon, S. A., Song, J., Ma, J., Woo, J. J., Nam, K. W., Seo, D. H., & Ryu, W. H. (2025). Unraveling Redox Mediator-Assisted Chemical Relithiation *Mechanism for Direct Recycling of Spent Ni-Rich Layered Cathode Materials.* Advanced Science, 12(11). https://doi.org/10.1002/advs.202417094

Li, J., Shi, R., Wang, J., Cao, Y., Ji, H., Tang, J., Ji, G., Chen, W., Zhang, M., Xiao, X., & Zhou, G. (2025). Interfacial Metal-Solvent Chelation for Direct Regeneration of LiFePO 4 Cathode Black Mass. *Advanced Materials, 37*(5). https://doi.org/10.1002/adma.202414235

Liu, Y., Li, C., Zeng, W., Wang, X., Wang, J., Li, D., & Mu, S. (2025). Recycling of Waste Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries by Deep Eutectic Solvents. *ChemSusChem, 18*(14). https://doi.org/10.1002/cssc.202500541

Naseri, T., & Mousavi, S. M. (2024). Treatment of spent lithium iron phosphate (LFP) batteries. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 47*, 100906. https://doi.org/10.1016/J.COGSC.2024.100906

Qi, C., Yao, T., Zhai, W., Zhang, M., Song, L., & He, J. (2024). Advances in degradation mechanism and sustainable recycling of LiFePO4-type lithium-ion batteries. *Energy Storage Materials, 71*, 103623. https://doi.org/10.1016/J.ENSM.2024.103623

Qin, Z., Zhang, T., Gao, X., Luo, W., Han, J., Lu, B., Zhou, J., & Chen, G. (2024). Self-Reconstruction of Highly Degraded LiNi 0.8 Co 0.1 Mn 0.1 O 2 toward Stable Single-Crystalline Cathode. *Advanced Materials, 36*(5). https://doi.org/10.1002/adma.202307091

Qu, X., Li, J., Gao, Y., Zhu, K., Li, P., & Cao, D. (2025). Efficient Regeneration of Spent Lithium Iron Phosphate Cathodes Materials via Oxidation-Reduction for Industrial-Scale Recycling. *Advanced Functional Materials, 35*(44). https://doi.org/10.1002/adfm.202507117

Tang, D., Ji, G., Wang, J., Liang, Z., Chen, W., Ji, H., Ma, J., Liu, S., Zhuang, Z., & Zhou, G. (2024). A Multifunctional Amino Acid Enables Direct Recycling of Spent LiFePO 4 Cathode Material. *Advanced Materials, 36*(5). https://doi.org/10.1002/adma.202309722

Wang, J., Tan, B., Chen, D., Liu, X., Zhou, R., Hu, C., Liu, C., Zeng, G., & Luo, X. (2025). Multifunctional N, S-co-doped carbon quantum dots enable defect healing and conductive network construction in spent LiFePO4 cathodes. *Chemical Engineering Journal, 522*, 167249. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2025.167249

Wu, X., Liu, Y., Wang, J., Tan, Y., Liang, Z., & Zhou, G. (2024). Toward Circular Energy: Exploring Direct Regeneration for Lithium-Ion Battery Sustainability. *Advanced Materials, 36*(32). https://doi.org/10.1002/adma.202403818

Zhang, B., Xu, Y., Silvester, D. S., Banks, C. E., Deng, W., Zou, G., Hou, H., & Ji, X. (2024). Direct regeneration of cathode materials in spent lithium-ion batteries toward closed-loop recycling and sustainability. *Journal of Power Sources, 589*, 233728. https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2023.233728

Kontakt

Dr. Ing.Tannaz Naseri
Institute of Circular Resource Engineering and Management, Hamburg University of Technology,
Blohmst. 15, 21079, Hamburg, Germany
Tannaz.naseri@tuhh.com

Manuel Neumaier, Florian Hüller, Daniel Jansen, Christina Kunzmann, Daniel Vollprecht

Materialcharakterisierung regionaler Sekundärrohstoffe zur Entwicklung nachhaltiger Bindemittelsysteme für Betonfertigteile

***Abstract**: In dieser Masterarbeit wurde die mechanochemische Aktivierung regionaler Tone aus bergbaulichen Reststoffströmen untersucht und deren Eignung als klimafreundliche Zement- bzw. Klinkerersatzstoffe hinsichtlich des Einflusses auf strukturelle, physikalische und reaktive Eigenschaften bewertet. Die mechanochemische Aktivierung führte zu einer deutlichen Veränderung der Partikeleigenschaften: Die spezifische BET-Oberfläche wurde verringert und die Korngrößenverteilung in den gröberen Bereich verschoben. Strukturelle Untersuchungen mittels Rietveld-Analyse belegten eine erfolgreiche Amorphisierung der Kristallstruktur. Diese strukturellen Veränderungen führten zu einer gesteigerten Reaktivität der Tone, die sich in einer erhöhten Wärmeentwicklung widerspiegelten. Gleichzeitig konnte die Wasseraufnahme signifikant reduziert und die Verarbeitbarkeit der Materialien deutlich verbessert werden. In Mörtelsystemen resultierte der Einsatz der mechanochemisch aktivierten Tone in einer erhöhten Druckfestigkeit, womit die Eignung als Klinker- oder Zementsubstitut nachgewiesen wurde.*

1 Einleitung

Die Herstellung von Betonfertigteilen stellt einen zentralen Bestandteil der modernen Bauindustrie dar. Um die für eine effiziente Produktion erforderlichen hohen Frühfestigkeiten bei gleichzeitig verbesserter Verarbeitbarkeit zu erreichen, kommen neben den üblichen Komponenten wie Sand, Zement und Gesteinskörnung zunehmend feine Zusatzstoffe wie Kalksteinmehl zum Einsatz (Bentz et al., 2017). Die Produktion dieses hochwertigen Kalksteinmehls erfordert die Abtrennung von Verunreinigungen, wobei insbesondere Mergel und Lehm als Nebenprodukte anfallen. Im Kalksteinbruch Wiesenhofen handelt es sich dabei überwiegend um Verwitterungslehm, während bei der Sandgewinnung zusätzlich große Mengen an Sedimentationston entstehen. Diese Materialien finden derzeit keine wirtschaftliche Verwendung, sodass ihre Deponierung mit erheblichen Kosten verbunden ist. In den vergangenen Jahren wurde die Nutzung von Tonen als Zementersatzstoff durch thermische Aktivierung intensiv diskutiert, insbesondere bei Materialien mit hohem Kaolinitgehalt (Overmann et al., 2024). Allerdings ist dieses Verfahren aufgrund des hohen Energiebedarfs, der begrenzten Skalierbarkeit und des damit verbundenen CO_2-Ausstoßes ökologisch und ökonomisch herausfordernd. Eine vielversprechende Alternative stellt die mechanochemische Aktivierung dar, bei der die Tone unter Einsatz hoher mechanischer Energie in Kugel- oder Ringmühlen vermahlen werden. Durch die mechanochemische Aktivierung werden kristallin vorliegende Aluminosilikate teilamorphisiert, so dass die Si- und Al-Ionen für die Hydratphasenbildung in Bindemittelsystemen zur Verfügung stehen und somit zur Festigkeitsentwicklung beitragen (Baki et al., 2024). Gleichzeitig bewirkt das Aufbrechen der Schichtminerale eine veränderte Wasserverteilung im Gefüge, was sowohl die Verarbeitbarkeit als auch die Hydratationsprozesse positiv beeinflusst (Zhang et al., 2025). Diese Effekte eröffnen neue Perspektiven für die nachhaltige Nutzung bislang ungenutzter Nebenprodukte der Rohstoffgewinnung. Die vorliegende Arbeit widmet sich der umfassenden Untersuchung dieser Potenziale. Im Fokus stehen die physikalische Parti-

kelanalyse, die Bewertung der Verarbeitbarkeit sowie die Analyse der Festigkeitsentwicklung unter Einsatz mechanochemisch aktivierter Tone. Ziel ist es, die Eignung dieser Materialien als Bestandteil innovativer Bindemittelsysteme zu prüfen und damit einen Beitrag zur Ressourcenschonung und Emissionsminderung in der Bauindustrie zu leisten.

2 Methodik

2.1 Materialzusammensetzung

Zur vergleichenden Untersuchung wurden die Tonproben zunächst bis zur Massekonstanz getrocknet und in einer Schlagkreuzmühle desagglomeriert. Die chemische Zusammensetzung wurde an Pulverpresslingen mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA, Rigaku Supermini 200) und die mineralogische Zusammensetzung an texturarmen Präparaten mittels Röntgenbeugung (XRD, Siemens AG D5000) und Auswertung mittels Rietveld-Verfeinerung (BGMN) bestimmt.

2.2 Aktivierung

Anschließend erfolgte die mechanochemische Aktivierung eines Teilvolumens mittels Planetenkugelmühle (Fritsch Pulverisette 5) bei 450 min^{-1} über 2 h mit 15 Wolframcarbid-Kugeln (20 mm Durchmesser). Um das während der Mahlung freigesetzte interkristalline Wasser zu entfernen, wurde die Probe nach der Hälfte der Mahldauer erneut getrocknet. Zum Vergleich wurde ein weiterer Teil der Tone bei 700 °C für 30 min kalziniert.

2.3 Verarbeitungseigenschaften

Mit den aktivierten Tonen sowie den Ausgangsproben wurden Mörtelproben gemäß DIN EN 196-1 hergestellt, wobei jeweils 20 % des Zements ersetzt wurde. An diesen Proben wurden mithilfe eines Rotationsrheometers (Viskomat NT) sowie eines Hägermann-Trichters mit Setzfließmaßplatte die rheologischen Eigenschaften untersucht. Das Setzfließmaß wurde zu drei Zeitpunkten (5 min, 30 min, 60 min) nach Wasserzugabe bestimmt. Parallel wurden mittels Rheometer die Fließgrenze und die relative Viskosität ermittelt.

2.4 Physikalische Partikelanalyse

Die Korngrößenverteilung wurde mittels Lasergranulometrie bestimmt. Zusätzlich wurde die spezifische Oberfläche nach der BET-Methode (3P Micro 300) ermittelt. Hierfür wurden die Proben eingewogen, bei 250 °C für eine Stunde evakuiert und anschließend mit Stickstoff als Adsorbat analysiert.

2.5 Reaktivitätsanalyse

Die puzzolanische Aktivität wurde durch den R^3-Test und die isotherme Wärmeflusskalorimetrie bewertet. Die Wärmeentwicklung wurde aufgezeichnet und zur Beurteilung der Reaktivität herangezogen. Ergänzend wurde die Wärmefreisetzung in einem Zementleimsystem bei 20 °C über 7 d gemessen. Ergänzend wurden Versuche im Mörtelsystem durchgeführt, um die Wirkung der aktivierten Tone unter praxisnahen Bedingungen zu bewerten. Hierbei wurden in einer firmeninternen Rezeptur jeweils 10 % und 20 % des Zements durch die Tonproben ersetzt. Die Mörtelproben wurden gemäß DIN EN 196-1 hergestellt und gelagert. Die Biegezugfestigkeit der jeweiligen Mörtelproben wurde im Dreipunktbiegeversuch bestimmt, die Druckfestigkeit wurde an den verbleibenden Halbkörpern geprüft.

3 Ergebnisse

3.1 Materialzusammensetzung

Die Elementaranalyse mittels RFA zeigt, dass die untersuchten Tonproben überwiegend aus SiO_2 und Al_2O_3 bestehen, siehe Tabelle 1. Anteile nicht direkt erfassbarer Komponenten, insbesondere CO_2 und H_2O, wurden unter der Bezeichnung „Balance“ zusammengefasst. Durch die ergänzende mineralogische Analyse mittels XRD konnten neben Quarz als Hauptkomponente verschiedene Schichtsilikate wie die tonmineralogische Phasen Illit-Smektit, Kaolinit und weitere 2, 3 und 4Schichtsilikate identifiziert werden – Karbonatische Phasen wie Calcit waren, insbesondere beim Verwitterungslehm, nur in geringen Mengen nachweisbar. Die durch die mechanochemische Aktivierung verwertbaren Tonminerale Illit-Smektit sowie Kaolinit sind zu einem Anteil von 25-30 % in beiden Tonen vertreten.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Tonproben – Angaben in ma -%

Material	SiO_2	Al_2O_3	Balance	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	TiO_2	SO_3
Verwitterungslehm	53,3	18,0	16,5	6,6	0,5	2,1	1,1	0,9	0,1
Sedimentationston	41,5	21,3	16,4	6,8	6,4	3,2	2,0	0,9	0,7

3.2 Verarbeitungseigenschaften

Die rheologische Untersuchung zeigt einen Anstieg des Drehmoments und damit einen Anstieg der Viskosität für Tone ohne Aktivierung aufgrund deren Wasseraufnahme aus der wässrigen Suspension, siehe Abb. 1 links (blaue Messkurve). Bei Proben nach mechanischer Aktivierung bleibt die Viskosität und damit die Verarbeitbarkeit des Mörtels hingegen auf einem mit der Referenz vergleichbaren Niveau, was auf die Amorphisierung der Tonminerale zurückzuführen ist, in deren Schichten sich nach der Aktivierung kein Wasser mehr anlagern kann (rote Kurve).

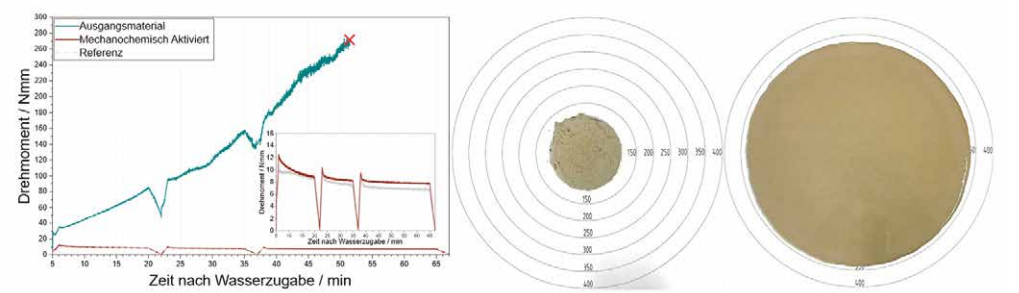


Abbildung 1: Vergleich der rheologischen Eigenschaften im Mörtelsystem: Links der zeitliche Verlauf des Drehmoments; mittig das Setzfließmaß unter Verwendung der Ausgangstone; rechts das Setzfließmaß bei Nutzung der mechanochemisch aktivierten Tone (Angaben in mm).

3.3 Physikalische Partikelanalyse

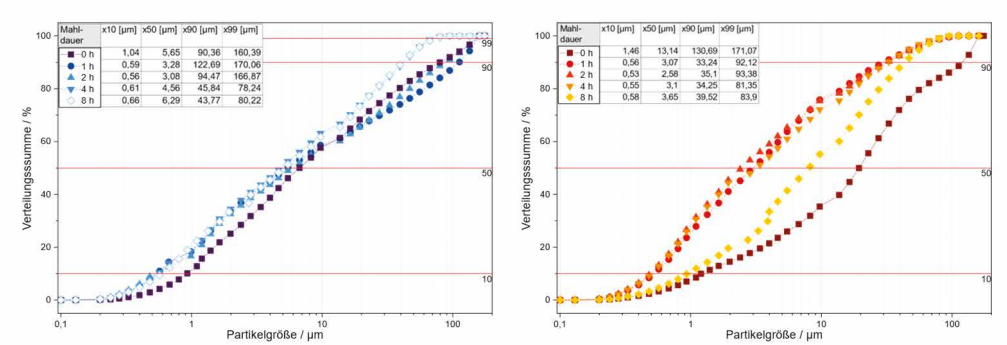


Abbildung 2: Korngrößenverteilungen der untersuchten Tone abhängig von ihrer Mahldauer: links der Sedimentationston; rechts der Verwitterungslehm.

Die Auswertung der BET-Oberfläche ergab eine Absenkung der aktiven Oberfläche bei zunehmender Mahldauer (Tab. 2). Die Mahlkörper erzeugen beim Aufprall genügend Energie, um eine mechanisch induzierte Sinterung zu realisieren. Gleichzeitig tendieren die Partikel durch Van der Waals Kräfte Agglomerate zu bilden (Tole et al., 2019).

Tabelle 2: BET-Oberfläche der beiden Tone abhängig von der Mahldauer – Angaben in m²/g

Material / Mahldauer	0 h	1 h	2 h	4 h	8 h
Verwitterungslehm	38,0	26,0	15,3	10,9	9,1
Sedimentationston	36,2	41,7	32,5	13,2	9,0

3.4 Reaktivitätsanalyse

Die Reaktivitätsanalyse zeigte nach 7 d eine um etwa 20 J/$g_{Bindemittel}$ erhöhte Wärmefreisetzung der mechanochemisch aktivierten Tone im Vergleich zur Ausgangsprobe. Diese Steigerung ist auf die partielle Amorphisierung der Tonminerale zurückzuführen, wodurch reaktive Aluminium und Silikatphasen leichter verfügbar werden und eine verstärkte puzzolanische Reaktion begünstigt wird.

Im Mörtelsystem erreichte die Referenz ohne Zementersatz einen Wert von 72–76 MPa nach 28 d. Bei 20 % Zementsubstitution lagen die mechanochemisch aktivierten Tone mit 72–74 MPa nahezu auf Referenzniveau, während kalzinierte Tone (65–70 MPa) und Ausgangstone (47–53 MPa) im Vergleich geringere Festigkeiten aufwiesen.

Danksagung

Ich danke der Firmengruppe Max Bögl für die Möglichkeit, diese Arbeit im Rahmen der betrieblichen Forschung durchzuführen. Mein Dank gilt dem gesamten Team für die Unterstützung während der Bearbeitung

sowie den Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls *Recycling und Chemical Engineering* an der Universität Augsburg für die wertvolle Zusammenarbeit und fachliche Begleitung.

Ebenso möchte ich den Mitarbeitenden des Geozentrums Nordbayerns an der FAU Erlangen-Nürnberg für ihre Kooperation und die Bereitstellung ihrer Expertise danken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Literatur/Quellen

DIN EN 196-1 (2016): Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Deutsche Fassung EN 196-1:2016. Berlin, Beuth Verlag.

Baki, V. A.; Ke, X.; Heath, A.; Calabria-Holley, J.; Terzi, C. (2024): Improving the pozzolanic reactivity of clay, marl and obsidian through mechanochemical or thermal activation. In: *Mater. Struct.* 57 (1).

Bentz, D. P.; Ferraris, C. F.; Jones, S. Z.; Lootens, D.; Zunino, F. (2017): Limestone and silica powder replacements for cement: early-age performance. In: *Cem. Concr. Compos.* 78: 43–56.

Overmann, S.; Vollpracht, A.; Matschei, T. (2024): Reactivity of calcined clays as SCM – A review. In: *Mater.* 17 (2).

Tole, I.; Habermehl-Cwirzen, K.; Cwirzen, A. (2019): Mechanochemical activation of natural clay minerals: an alternative to produce sustainable cementitious binders – review. In: *Mineral. Petrol.* 113 (4): 449–462.

Zhang, J.; Peng, Y.; Wang, C.; Zhang, W.; Luo, X. (2025): Interlayer water absorption expansion and surface hydration properties of montmorillonite and kaolinite. In: *Miner. Eng.* 234: 109713.

Kontakt
B. Sc. Manuel Neumaier, Masterand
Max Bögl Bauservice GmbH & Co. KG / Universität Augsburg
Tel.-Nr. : +49 1520 8752088
E-Mail: mneumaier@max-boegl.de / manuel.neumaier@uni-a.de

Mariia Piminova, Soraya Heuss-Aßbichler

Bewertung des UNFC-basierten Webtools SARA anhand der Fallstudie Bollrich

***Abstract**: Der weltweite Ressourcenverbrauch steigt kontinuierlich. Insbesondere nimmt die Nachfrage nach kritischen Rohstoffen durch die Entwicklung moderner Schlüsseltechnologien zu. Projekte zur Rückgewinnung solcher Rohstoffe aus Abfallströmen bieten Potenziale, sind aber zugleich mit Barrieren verbunden. Vor diesem Hintergrund wächst das Bedürfnis, solche Projekte im frühen Entwicklungsstadium zu bewerten und zu klassifizieren. Am Beispiel des Bergeteichs Bollrich wurde ein erster Versuch unternommen, eine strukturierte Vorgehensweise für die Bewertung und Klassifikation mineralischer Rohstoffe einzuführen. Das im Horizon Europe Projekt FutuRaM vorgestellte Tool SARA4UNFC ist eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes, mit dem Ziel, den Ablauf zu vereinfachen.*

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurden die beiden Ansätze verglichen und ergänzend wurden Interviews und Befragungen durchgeführt. Der Vergleich dieser beiden Ansätze zeigte, dass SARA4UNFC alle Faktoren abdeckt; zusätzliche Faktoren sind auf den Spezialfall Bollrich zurückzuführen. Damit erfüllt das Webtool zentrale Anforderungen an Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Systematik. Durch eine gezielte Ergänzung ausgewählter Aspekte und die Integration unterstützender Online-Tools kann SARA4UNFC weiter gestärkt werden. Befragungen haben gezeigt, dass verschiedene Interessengruppen an einer Projektbewertung mit dem Webtool interessiert sind.

1 Einleitung

Die Nachfrage nach kritischen Rohstoffen nimmt durch die Entwicklung moderner Schlüsseltechnologien zu (International Energy Agency, 2025). Dazu gehören beispielsweise leistungsstarke Chips für den Einsatz in der künstlichen Intelligenz oder Batterien für den Übergang zu einer dekarbonisierten Energieversorgung. Gleichzeitig sind viele dieser Rohstoffe geologisch oder geopolitisch nur eingeschränkt zugänglich, sodass Versorgungsrisiken für importabhängige Regionen wie die Europäische Union bestehen. Vor diesem Hintergrund wächst das Interesse an Projekten zur Rückgewinnung kritischer Rohstoffe aus Abfallströmen. Solche Projekte erfordern Investitionen, sind jedoch häufig mit Unsicherheiten verbunden. Daraus ergibt sich das Bedürfnis nach einer Methodik, die Projektentwickler*innen eine frühzeitige Bewertung eines Rohstoffprojekts ermöglicht.

Für mineralische Rohstoffe wurden unterschiedliche Klassifikationssysteme zur Bewertung von Rohstoffprojekten etabliert. Eine davon ist das Klassifikationssystem United Nations Framework Classification for Resources (UNECE, 2019). Damit kann der Reifegrad eines Vorhabens erfasst und kommuniziert werden. Hierbei wird der Status des Projekts in drei Dimensionen dargestellt: E-Achse (economic viability, social and environmental impact, legal aspects), F-Achse (technical feasibility) und G-Achse (geology bzw. level of confidence in quantities). Laut Suppes und Heuss-Aßbichler (2021a, p. 2) sowie mündlicher Mitteilung von Heuss-Aßbichler (2025) gibt es derzeit keinen klaren standardisierten Ansatz für die Bewertung von Projekten, um diese danach anhand der UNFC zu klassifizieren. Zur Lösung dieses Problems wurde das Webtool SARA4UNFC entwickelt. Es bietet einen strukturierten Ansatz zur Bewertung von Rückgewinnungsprojekten anhand ökonomischer, ökologischer, technischer und sozialer Kriterien und zur Klassifikation gemäß

den Prinzipien von UNFC. Projektentwickler*innen können damit Stärken und Schwächen des Projekts frühzeitig identifizieren und danach entscheiden, ob das Projekt fortgesetzt oder eingestellt werden soll.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, das Webtool SARA4UNFC aus der Perspektive einer Nutzerin praktisch anzuwenden und kritisch zu bewerten. Es sollen Verbesserungsmöglichkeiten durch einen direkten Vergleich mit einem ähnlichen Ansatz für den Bergbau am Beispiel der Tailing Storage Facility (TSF) in Bollrich identifiziert werden. Offene Fragen dabei sind: (1) Deckt SARA4UNFC alle relevanten Aspekte der praktischen Fallstudie Bollrich ab? (2) Welche Verbesserungsvorschläge lassen sich daraus für die weitere Entwicklung des Webtools ableiten?

2 Methodik

Für die Bewertung des Webtools SARA4UNFC wurden Screening- und Pre-Feasibility-Phasen des Webtools anhand der Fallstudie von Bollrich direkt mit dem zweistufigen Verfahren nach Suppes und Heuss- Aßbichler (2021a, b) verglichen. Ziel dieses Vergleichs war es zu identifizieren, ob es Lücken in SARA4UNFC gibt, die für eine umfassende Bewertung von zentraler Bedeutung waren, aber im Webtool entweder fehlten oder unzureichend berücksichtigt wurden.

Die vergleichende Untersuchung wurde in 3 Schritte unterteilt. Als Erstes wurden die in der Fallstudie betrachteten Aspekte tabellarisch den entsprechenden Fragen aus SARA4UNFC zugeordnet, wobei jede Zeile in der Tabelle mehrere Aspekte aus der Fallstudie zusammenfasst. Zweitens wurde die Analyse der Abdeckungstiefe durchgeführt. Es war zu untersuchen, ob die Strukturen der beiden Verfahren übereinstimmen. Falls eine Lücke identifiziert wurde, wurde die entsprechende Zeile in der Tabelle mit dem Zeichen x markiert. Als Letztes wurde überprüft, ob sich die neuen Fragen im Webtool integrieren lassen. Darüber hinaus wurden vier Interviews und eine Umfrage durchgeführt. Ziel der Befragungen war es, ein besseres Verständnis für die Arbeitsziele und Bedürfnisse hinsichtlich Ressourcenmanagement zu gewinnen.

3 Ergebnisse

Der Vergleich zeigte, dass elf Faktoren aus dem Fall Bollrich im SARA4UNFC nicht berücksichtigt wurden: History, Fragile States Index, Human Footprint Index, Material Reactivity, Post-Mining State, Financial Support, Water Consumption, Ordnance, Scenario Modelling, Social Impacts Due to Project Execution sowie Social Impacts After Project Execution.

In einem der durchgeführten Interviews wies Wirtschaftsprofessor Bernd Wagner von der Universität Augsburg (i.R.) darauf hin, dass er auf Grundlage seiner beruflichen Erfahrung Wirtschaftlichkeit als entscheidend für die Bewertung von Rohstoffprojekten betrachtet. In diesem Zusammenhang schlug er vor, das Webtool durch Materialflusskostenanalyse (MFCA) zu ergänzen, mit der der ökonomische Einfluss von ineffizienten Materialflüssen aufgezeigt werden kann.

Weitere Interviews mit den Entwicklern von SARA4UNFC, u. a. Dr. B. Jayasinghe und I. Dorri, lieferten Einsichten in die Vorgehensweise zur Entwicklung des Tools. SARA4UNFC stellt eine Weiterentwicklung des von Suppes und Heuss-Aßbichler vorgestellten Ansatzes dar, mit dem Ziel, das Verfahren zu vereinfachen und es für sechs unterschiedliche Abfallströme anwendbar zu gestalten. Sie wiesen darauf hin, dass der Kontext bei der Bewertung eines Projekts von entscheidender Bedeutung ist. Dies wird unter UNFC als „context of evaluation in the realm of discourse“ bezeichnet und mit ROD abgekürzt. Die Entwickler betonten, dass SARA4UNFC derzeit in erster Linie auf den Anforderungen für die Genehmigung eines Pro-

jekts basiert (Basic ROD), während Erweiterungen um die Kreislaufwirtschaft (CE-ROD) und Nachhaltigkeit (SDG-ROD) bereits geplant sind.

4 Ausblick

SARA4UNFC stellt ein innovatives hilfreiches Instrument dar, das die Nutzer*innen bei der Entwicklung von Projekten unterstützt. Es erleichtert die Identifikation von Potenzialen und Barrieren. Der zentrale Vorteil von SARA4UNFC liegt in seiner Einfachheit sowie in der Möglichkeit, es auf unterschiedliche Abfallströme anzuwenden. Es ermöglicht eine transparente Kommunikation mit relevanten Interessengruppen und fördert so den Dialog zwischen Wissenschaft, Verwaltung und Industrie. Damit kann SARA4UNFC einen wichtigen Beitrag zum globalen Übergang hin zu einer Kreislaufwirtschaft leisten, um die Abhängigkeit von primären Rohstoffen in den kommenden Jahrzehnten zu verringern. Damit hat das Tool das Potenzial, sich als praxisnahes Standardinstrument zur Bewertung von Projekten zur Rückgewinnung anthropogener Rohstoffe zu etablieren.

Danksagung

Die Arbeit wurde von Prof. Dr. Soraya Heuss-Aßbichler und Prof. Dr.-Ing. habil. Konrad Koch betreut.

Literatur/Quellen

International Energy Agency. (2025). Global critical minerals outlook 2025: Executive summary. https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025/executive-summary

SARA4UNFC, a Structured Anthropogenic Resource Assessment for UNFC. (2022). [Webtool].

Suppes, R. und Heuss-Aßbichler, S. (2021a). How to Identify Potentials and Barriers of Raw Materials Recovery from Tailings? Part I: A UNFC-Compliant Screening Approach for Site Selection. In: Resources, 10(3), 26. DOI: https://doi.org/10.3390/resources10030026

Suppes, R. und Heuss-Aßbichler, S. (2021b). How to Identify Potentials and Barriers of Raw Materials Recovery from Tailings? Part II: A Practical UNFC-Compliant Approach to Assess Project Sustainability with On-Site Exploration Data. In: Resources, 10(11), 110. DOI: https://doi.org/10.3390/resources10110110

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2019). United Nations Framework Classification for Resources: Update 2019. https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/publ/UNFC_ES61_Update_2019.pdf

Kontakt
Mariia Piminova
Masterstudentin, Technische Universität München
Wissenschaftliche Hilfskraft, Ludwig-Maximilians-Universität München
mariia.piminova@tum.de

Ariana C. Morales Rapallo

Recycled Concrete Aggregate Pre-Treatments for Structural Self-Consolidating Concrete: Evidence Synthesis and Selection Framework

***Abstract**: Self-consolidating concrete with recycled concrete aggregate (RCA) can achieve structural performance when aggregate quality is controlled and the mix is re-proportioned. A key barrier is adhered mortar, which increases absorption and weakens the secondary ITZ, strongly affecting SCC preformance. Based on a PRISMA 2020 systematic review from 2018 to 2025, this paper synthesises RCA pre-treatments that remove or densify adhered mortar: mechanical abrasion, thermal-assisted debonding, chemical dissolution/mineral impregnation, accelerated carbonation, and freeze-thaw based separation. A concise selection framework is proposed to align treatment choice with RCA source, target replacement level, and production constraints.*

1 Introduction

Self-consolidating concrete (SCC) is widely adopted in precast construction due to its high flowability and rapid early-strength development, allowing efficient concrete casting of densely reinforced elements. Substituting natural aggregates with recycled concrete aggregates (RCA) in SCC offers a direct pathway to reduce virgin resource extraction and associated CO_2 emissions, supporting more circular concrete production [1]. However, RCA incorporation in SCC cannot be treated as a simple aggregate replacement because RCA exhibits distinct physical characteristics compared with natural aggregates.

The primary cause of this altered behaviour is the presence of adhered mortar and the associated interfacial transition zone on RCA particles, which increases porosity and water absorption. In SCC, this elevated absorption can reduce workability and increase mix variability unless water and admixture dosages are carefully adjusted [2]the adhered mortar on the surface of RA would considerably impact the qualities of concrete products. As a practical treatment procedure, mechanical screening can remove the adhered mortar. This research aims to study the influence of mechanical screening on the fundamental properties of RA and the resulting self-compacting concrete (SCC. The incorporation of RCA in SCC may also contribute to reductions in compressive strength and more significantly the modulus of elasticity of recycled concrete. Consequently, existing guidance restricts RCA use to conservative limits and allowable exposure classes, which has historically confined RCA largely to non-structural applications [3].

Although many studies indicate that controlled RCA dosages can be used without significant overall performance loss, key gaps remain for structural SCC applications. Much of the published evidence relies on high-quality, well-characterised precast rejects rather than variable, field-sourced demolition RCA, and it frequently prioritises 28-days strength over fresh-state performance and early-age strength—both critical for SCC and precast production [4]. Therefore, identifying robust RCA pre-treatment strategies such as mechanical screening/grinding or chemical washing approaches, and corresponding SCC mix-design methodologies is essential to mitigate high-absorption effects. These pre-treatments will enable a higher RCA replacement ratio, and safely expand structural use while improving concrete circularity [1].

2 Methodology

A systematic review and meta-analysis were conducted following PRISMA 2020. Searches in Scopus, ScienceDirect and Google Scholar identified 256 records from 2018 to 2025; after screening and full-text assessment, 46 studies were included in the qualitative synthesis and 24 experimental studies in the quantitative synthesis. Extracted variables included RCA source and grading, pre-treatment, replacement level, SCC mix design parameters, fresh properties and mechanical and durability outcomes [5].

To support pre-treatment selection for SCC, reported pre-treatments were grouped by their primary mechanism:

- Mechanical Treatment Method (MTM): MTM is conceptually a selective removal route. it physically detaches or abrades the weak adhered mortar layer so that the aggregate behaves closer to natural stone. Typical MTM implementations include grinding/ball milling and related abrasion-based operations. The methodological advantage is direct reduction of adhered mortar, which generally lowers water absorption and can improve mechanical performance through a denser secondary ITZ. However, MTM introduces a key trade-off. Excessive mechanical energy can induce microcracking in the natural aggregate skeleton, potentially offsetting the benefits of mortar removal [6], [7], [8].
- Thermal-assisted mechanical variants within MTM: A methodological refinement of MTM is thermal-assisted detachment, where heat is used to weaken the paste–aggregate bond prior to mechanical action. “Heating and rubbing” applies heating followed by grinding, leveraging thermally induced changes to promote mortar separation and produce aggregates with properties closer to natural stone. These approaches can be framed as bond weakening plus controlled abrasion processes; their expected outcome is enhanced detachment efficiency, which may reduce the risk of microcracks compared to purely mechanical abrasion [9], [10].
- Chemical Treatment Method (CTM): CTM operates through chemical modification of the adhered mortar rather than physical removal. One sub-route is acid pre-soaking (commonly investigated acids include HCl, H_2SO_4, and H_3PO_4), which targets partial dissolution/loosening of cementitious phases, thereby reducing water absorption and improving concrete mechanical properties [11]. A second sub-route is impregnation using pozzolanic slurries (e.g., silica fume), which is methodologically distinct: instead of removing mortar, it aims to densify and strengthen the adhered mortar by filling pores and promoting secondary reactions with calcium hydroxide [12].

3 Results

Table 1 synthesises the principal RCA pre-treatment methods reported for SCC, highlighting their intended performance benefits alongside key implementation constraints. This comparison supports selection of a treatment route based on RCA source quality and SCC performance requirements while clarifying the main trade-offs affecting practicality and scale-up.

Table 1: RCA Pre-Treatment Advantages and Disadvantages

RCA Pre-Treatment	Advantages	Disadvantages
Mechanical removal (ball-milling or grinding) [6], [7], [8]	Removes adhered mortar and lowers water absorption	Can induce micro-cracks; energy-intensive; useful for coarse RCA with high attached mortar.
Thermal–mechanical (heating and grinding) [10]	Detaches old cement paste; yields aggregate closer to natural stone	Requires heating equipment; possible thermal damage; suited for demolition-derived RCA when heat and grinding equipment are available.
Microwave heating [9]	Breaks the paste–aggregate bond via thermal stress	Needs specialised microwave reactors; currently limited to laboratory or high-value applications.
Ultrasonic cleaning [12]	Cleans aggregate surface and can raise strength by ≈ 7%	Only removes superficial mortar; equipment is expensive; best for small batches of high-quality RCA.
Acid soaking (chemical treatment) [11]	Reduces water absorption and improves mechanical properties	Handling and disposing of acids pose safety and environmental risks; may roughen aggregate; suitable in controlled lab settings or where regulations allow acid use.
Silica-fume slurry impregnation [12]	Fills pores and forms $CaCO_3$, boosting strength up to 30% at 7 days and 15% at 28 days	Adds processing steps and cost; effectiveness depends on penetration and curing; suited for high-performance SCC requiring enhanced strength and durability.
Accelerated carbonation [13]	Lowers water absorption and permeability and improves durability; also stores CO_2	Requires CO_2 supply and controlled conditions; treatment time can be longer; appropriate for sustainable, high-replacement SCC with carbonation facilities.
Freeze–thaw cracking (and freeze–thaw + high-temperature drying) [14], [15], [16]	Facilitates mortar separation without chemicals; high-temperature variant accelerates detachment	Time-consuming; may damage natural stone; needs freeze–thaw and drying equipment; mainly for research or low-cost non-chemical treatments.

4 Discussion

A methodological interpretation of the reviewed evidence indicates that the effectiveness of RCA pre-treatments in SCC follows a performance chain linking RCA source characteristics, water demand variability, early-age strength development, and durability. The key governing factor is the adhered mortar and the associated secondary ITZ, which alter water absorption and paste–aggregate interactions in ways that are particularly critical for SCC. Accordingly, treatment success cannot be judged from reductions in conventional 24 h absorption alone; it must be confirmed through stable flowability and segregation resistance under realistic production tolerances, together with consistent early-age strength gain and durability-relevant performance.

Comparing treatment routes, mechanical treatment methods (MTM) directly target adhered-mortar removal and can reduce absorption and variability, but require process optimisation to avoid microcracking, grading drift, and fines generation that can destabilise SCC performance and increase paste demand; thermal-assisted variants may improve detachment efficiency but demand dedicated infrastructure and can

face scale-up constraints. Chemical treatment methods (CTM) provide complementary mechanisms: acid soaking can reduce absorption but introduces safety, effluent, and regulatory constraints, whereas densification-based approaches such as mineral impregnation and accelerated carbonation, strengthen the adhered mortar and secondary ITZ and may better support high-performance SCC, with carbonation offering additional CO_2 uptake potential.

5 Conclusion

RCA pre-treatments can expand the feasible replacement range in SCC by removing or densifying adhered mortar. For SCC, surface densification approaches (accelerated carbonation and mineral impregnation) are well aligned with rheological sensitivity, while mechanical/thermal routes are suitable when strong mortar removal is required and processing constraints are acceptable.

References

[1] J. E. Castano and A. Abdel-Mohti, “Assessing the Impact of Recycled Concrete Aggregates on the Fresh and Hardened Properties of Self-Consolidating Concrete for Structural Precast Applications,” Infrastructures, vol. 9, no. 10, p. 177, Oct. 2024, doi: 10.3390/infrastructures9100177.

[2] W. Tang, M. Khavarian, A. Yousefi, B. Landenberger, and H. Cui, “Influence of Mechanical Screened Recycled Coarse Aggregates on Properties of Self-Compacting Concrete,” Materials, vol. 16, no. 4, p. 1483, Feb. 2023, doi: 10.3390/ma16041483.

[3] A. C. Morales Rapallo, J. Zum Brock, M. Doostdar, and K. Kuchta, “UTILIZATION OF RECYCLED AGGREGATES IN CONCRETE: CASE STUDY,” Detritus, no. 26, pp. 69–73, Mar. 2024, doi: 10.31025/2611-4135/2024.18366.

[4] R. Martínez-García, P. Jagadesh, F. Fraile-Fernández, J. Morán-del Pozo, and A. Juan-Valdés, “Influence of Design Parameters on Fresh Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregate—A Review,” Materials, vol. 13, no. 24, p. 5749, Dec. 2020, doi: 10.3390/ma13245749.

[5] A. C. Morales Rapallo and K. Kuchta, “Recycled Concrete Aggregate in Self-Consolidating Concrete: A Systematic Review and Meta-Analysis of Mechanical Properties, RCA Pre-Treatment and Durability Behaviour,” Recycling, vol. 10, no. 6, p. 214, Nov. 2025, doi: 10.3390/recycling10060214.

[6] P. Savva, S. Ioannou, K. Oikonomopoulou, D. Nicolaides, and M. F. Petrou, “A Mechanical Treatment Method for Recycled Aggregates and Its Effect on Recycled Aggregate-Based Concrete,” Materials, vol. 14, no. 9, p. 2186, Apr. 2021, doi: 10.3390/ma14092186.

[7] H. K. A. Al-Bayati, P. K. Das, S. L. Tighe, and H. Baaj, “Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate,” Constr. Build. Mater., vol. 112, pp. 284–298, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.176.

[8] H. Dilbas, Ö. Çakır, and C. D. Atiş, “Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method,” Constr. Build. Mater., vol. 212, pp. 716–726, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.007.

[9] A. Akbarnezhad, K. C. G. Ong, M. H. Zhang, C. T. Tam, and T. W. J. Foo, “Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates,” Constr. Build. Mater., vol. 25, no. 8, pp. 3469–3479, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.038.

[10] E. Pawluczuk, K. Kalinowska-Wichrowska, M. Bołtryk, J. Jiménez, and J. Fernández, “The Influence of Heat and Mechanical Treatment of Concrete Rubble on the Properties of Recycled Aggregate Concrete,” Materials, vol. 12, no. 3, p. 367, Jan. 2019, doi: 10.3390/ma12030367.

[11] V. W. Y. Tam, C. M. Tam, and K. N. Le, “Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches,” Resour. Conserv. Recycl., vol. 50, no. 1, pp. 82–101, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.resconrec.2006.05.012.

[12] A. Katz, “Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate,” J. Mater. Civ. Eng., vol. 16, no. 6, pp. 597–603, Dec. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(597).

[13] D. Xuan, B. Zhan, and C. S. Poon, “Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates,” Cem. Concr. Compos., vol. 84, pp. 214–221, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.09.015.

[14] J. Guo, W. Sun, Y. Xu, W. Lin, and W. Jing, “Damage Mechanism and Modeling of Concrete in Freeze–Thaw Cycles: A Review,” Buildings, vol. 12, no. 9, p. 1317, Aug. 2022, doi: 10.3390/buildings12091317.

[15] Q. Wu, F. Gong, D. Zhi, and Y. Zhao, “Removing attached mortar from recycled aggregate by the combined freeze–thaw cycles and high-temperature drying,” Struct. Concr., vol. 23, no. 5, pp. 3126–3139, Oct. 2022, doi: 10.1002/suco.202100407.

[16] F. Gong, Z. Wang, Y. Ning, L. Yang, and Q. Zeng, “Investigation on the impact of Thermo-Drying towards Freeze-Thaw cycle processing for recycled coarse aggregate,” Constr. Build. Mater., vol. 392, p. 131914, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131914.

Contact

Ariana Morales Rapallo, M. Sc., wissenschaftliche/r Mitarbeiterin
Technische Universität Hamburg
Tel: +49 40 42878 2393
E-Mail: ariana.morales@tuhh.de

Fabian Rüttnauer, Anna-Caroline Assmann, Alena Maria Spies, Karoline Raulf

Stückzahlanteile als Kenngröße für Abfallanalysen? Methodenentwicklung und praktische Untersuchungen

***Abstract**: Mit der Einführung des Einwegkunststofffondsgesetzes (EWKFondsG) werden in Deutsch-land Abgaben von Einwegkunststoffproduktherstellern erhoben, um Kosten für Reinigungsmaßnahmen im öffentlichen Raum zu finanzieren. Um die Abgabesätze zu berechnen, werden im EWKFondsG neben Massen- und Volumenanteilen auch Stückzahlanteile als mögliche Berechnungsgrundlage genannt. Sie sollen den zusätzlichen Aufwand bei manueller Reinigung abbilden. Der vorliegende Beitrag untersucht in diesem Kontext die Eignung von Stückzahlanteilen als Kenngröße für Abfallanalysen. Die Ermittlung von Stückzahlen in Abfällen ist mit erheblichen methodischen Herausforderungen verbunden. Zusätzlich unterliegen die ermittelten Stückzahlanteile starken Schwankungen. Die Hochrechnung von Stückzahlanteilen auf Basis massenbezogener Relationen erweist sich als ebenso, teilweise sogar stärker schwankungsanfällig. Die Nutzung von Stückzahlanteilen als Kenngröße kann somit nur in absoluten Einzelfällen empfohlen werden.*

1 Einleitung

Am 5. Juni 2019 verabschiedete das Europäische Parlament die Richtlinie (EU) 2019/904 (SUP-RL), um Auswirkungen von Einwegkunststoffprodukten (EWK-Produkten) auf Umwelt und Gesundheit zu verringern. (Europäisches Parlament, 2019) In Deutschland wurde diese Richtlinie durch das im März 2023 in Kraft getretene Einwegkunststofffondsgesetz (EWKFondsG, 2023) sowie die Einwegkunststofffondsverordnung (EWKFondsV, 2023) vom 11. Oktober 2023 in nationales Recht umgesetzt. Im Rahmen der erweiterten Herstellerverantwortung werden Abgaben von Inverkehrbringern von EWK-Produkten erhoben, die zur Finanzierung der Reinigungskosten im öffentlichen Raum dienen. Die ermittelten Abgabesätze basieren auf einem Forschungsprojekt des Umweltbundeamtes (UBA) (Henning Wilts et al., 2022). Neben Daten zu auf den Markt gebrachten EWK-Produkten flossen auch Daten zur Abfallzusammensetzung aus sechs verschiedenen Abfallströmen im öffentlichen Raum in dieses outputbasierte Modell ein. Die EWKFondsV legt die Höhe der Abgabesätze fest, wobei die Aktualität der Abgabesätze alle drei Jahre zu überprüfen ist (EWKFondsV, 2023). Im internationalen Vergleich existieren neben outputbasierten Modellen, wie sie in Deutschland durch das EWKFondsG oder in Österreich durch die Verpackungsverordnung vorgeschrieben sind (Verpackungsverordnung-Novelle 2023, 2023/25.09.2023), auch inputbasierte Ansätze. In den Niederlanden wird beispielsweise ein Modell verwendet, das die Abgabesätze ausschließlich auf die Menge der auf den Markt gebrachten EWK-Produkte bezieht (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022).

Die in Deutschland gewählte Methodik zur Ermittlung von Abgabesätzen zielt auf eine verursachergerechte Bepreisung von Herstellern von EWK-Produkten durch Abbildung realer Reinigungskosten ab. Gleichzeitig steigt der Aufwand für die Erhebung und Kontrolle dieser Abgaben erheblich, da neben Massen- und Volumenanteilen auch Stückzahlanteile berücksichtigt werden können. Die Stückzahlanteile sollen vor allem den Mehraufwand für die manuellen Erfassungssysteme „manueller Straßenkehricht“ und „manuelle Grünflächenreinigung“ abbilden. Für die Ermittlung von Massen- und Volumenanteilen existieren etablierte Methoden, an die sich die Datenerhebung anlehnen kann, etwa die LAGA PN 98 (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) (Federal/State Waste Working Group), 2001) oder der Sachsen-Richtlinie (LfULG

Sachsen, 2014). Zur Bestimmung von Stückzahlen in Abfällen fehlt bislang eine Norm oder standardisierte Methode. Vor diesem Hintergrund untersucht der vorliegende Beitrag die Eignung von Stückzahlen bzw. Stückzahlanteilen als Bewertungsparameter für Abfallanalysen im Kontext des EWKFondsG.

2 Methodik

In einer Auftragsforschung am Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS) wurden zwischen Januar 2024 und September 2025 Probenahmen in Städten und Gemeinden dreier Ortsgrößenklassen in je zwei Jahreszeiten durchgeführt. Ziel war die Entwicklung einer Methode zur Ermittlung von Stückzahlanteilen in manuell erfasstem Straßenkehricht. In gängigen Normen und Richtlinien wird die Feinkornfraktion als eigenständige Fraktion ausschließlich verwogen und als solche in den Massenanteil der Gesamtprobe einbezogen. Für die Ermittlung absoluter Stückzahlen ist diese Vereinfachung jedoch nicht anwendbar, da hierfür auch die Feinkornfraktion (<4 mm) vollständig oder anteilig ausgezählt werden müsste, was die Datenerhebung deutlich aufwendiger macht. Um verschiedene Bebauungsstrukturen abzubilden, wurden die Reinigungsgebiete der ausgewählten Städte analog zu einer früheren Untersuchung (Spies et al., 2023a, 2023b) in die Kategorien Innenstadt (IS), Mischgebiet (MG) und Wohngebiet (WG) unterteilt. Insgesamt wurden 56 Teilproben (à 66 L) von Abfällen der manuellen Straßenreinigung erfasst. Die erfassten Proben wurden anschließend gesiebt, nach einem festgelegten Sortierkatalog sortiert, ausgezählt und verwogen. Der verwendete Sortierkatalog ist in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt. Die Stückzahlen der Stoffgruppen „Organik“ und „Feinkorn“ wurden durch anteilige Auszählung ermittelt. Dazu wurden die Proben mittels Aufkegeln und Vierteln verjüngt. Jeweils zwei Teilproben von 5-10 g in den einzelnen Kornklassen wurden ausgezählt, um anschließend auf die gesamte Probe hochrechnen zu können. Der genaue Arbeitsablauf kann Abbildung 1 entnommen werden:

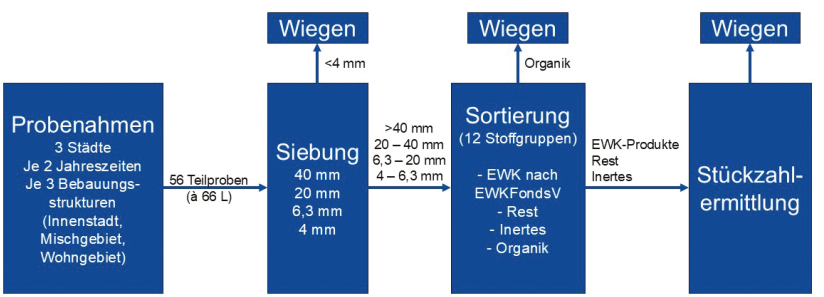


Abbildung 1: Arbeitsablauf der Probenahmen, der angeschlossenen Probenaufbereitung und der anschließenden Analyse

3 Ergebnisse der Stückzahlanalysen

Auf Grundlage der ermittelten Massen und Stückzahlen wurden masse- und stückzahlbasierte Abfallzusammensetzungen für die beprobten Reinigungsgebiete ermittelt. In Abbildung 2 ist beispielhaft die massen- und stückzahlbasierte Zusammensetzung der untersuchten Abfälle einer im Sommer beprobten Mittelstadt (Bebauungsstruktur Mischgebiet) dargestellt. Der untere Balken stellt die massebasierte Abfallzusammensetzung aller 13 untersuchten Stoffgruppen dar, während der mittlere Balken die stückzahlbasierte Zusam-

mensetzung darstellt. Der oberste Balken zeigt die stückbasierte Zusammensetzung unter Ausschluss der Stoffgruppen „Inertes“, „Organik“ und „Feinkorn“. Es wird deutlich, dass die Stückzahlanteile der für das EWKFondsG relevanten EWK-Produkte nur eine untergeordnete Rolle spielen, sobald Stoffgruppen mit erhöhten Feinkornanteilen, wie in diesem Fall „Organik“ und „Feinkorn“, in die Ermittlung von Stückzahlanteilen miteinbezogen werden. Für eine Ermittlung von absoluten Stückzahlen ist die Berücksichtigung dieser Stoffgruppen jedoch essenziell. In der untersuchten Stichprobe ist der Einfluss von Organik und Feinkorn so stark, dass die Stückzahlanteile der EWK-Produkte – mit Ausnahme von „TPF“ und „Tüten- und Folienverpackungen mit Lebensmittelinhalt“ – erst ab der dritten Dezimalstelle nachweisbar sind. Angesichts des enormen zeitlichen Aufwandes Stückzahlen für Stoffgruppen mit hohem Anteil kleiner Kornklassen zu bestimmen, stellt sich die Frage, ob diese auch durch Berechnung mit zuvor ermittelten Stückzahlrelationen berechnet werden können.

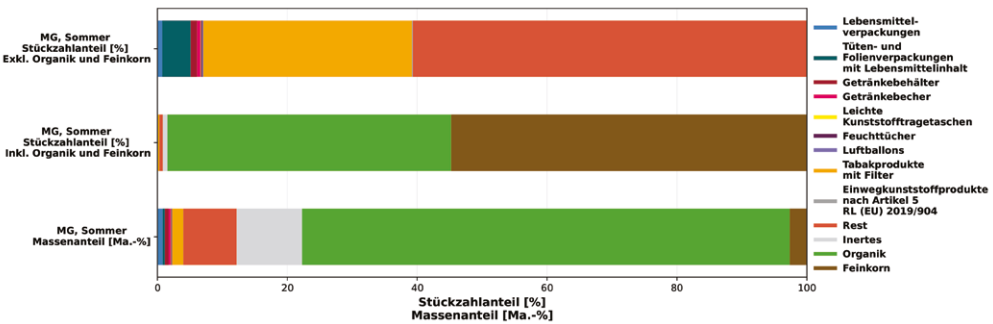


Abbildung 2: Stück- und massebasierte Zusammensetzung aus einer Probenahme einer Mittelstadt im Sommer

Um diese Frage zu beantworten, wurden aus den ermittelten Massen und Stückzahlen der erfassten Teilproben zusätzlich für jede Stoffgruppe (siehe Abbildung 1) Stückzahlrelationen [Stück/100 g] berechnet. Die Schwankungsbreiten der berechneten Stückzahlrelationen sind in Abbildung 3 dargestellt. Es ist zu beachten, dass nicht alle EWK-Produkte in jeder Teilprobe nachgewiesen werden konnten und somit die dargestellten Boxplots nicht alle auf derselben Datenanzahl beruhen. Die Anzahl an Proben, in denen die jeweiligen EWK-Produkte nachgewiesen wurden, ist angegeben (n=x).

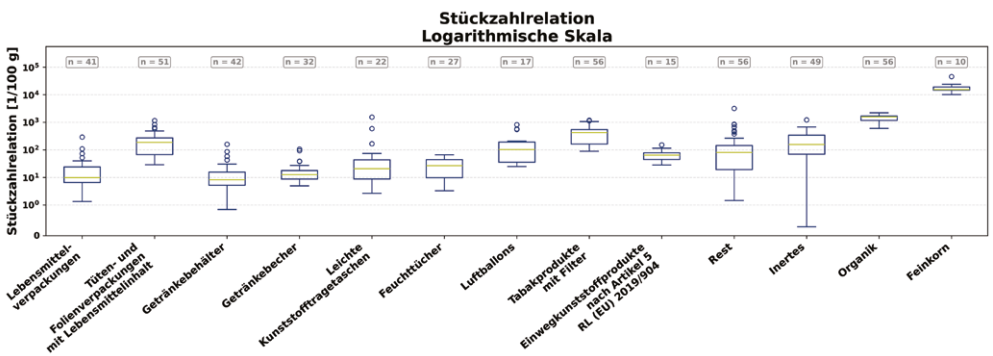


Abbildung 3: Schwankungsbreiten der ermittelten Stückzahlrelationen für die 13 untersuchten Stoffgruppen

Die Daten zeigen, dass die ermittelten Stückzahlrelationen starken Schwankungen unterliegen. Besonders für die EWK-Produkte „Tabakprodukte mit Filter“ (89,6 - 1.185,8 Stück/100 g), „Getränkebehälter“ (0,9 - 159,4 Stück/100 g) und „Inertes“ (0,3 - 1.219,5 Stück/100 g) fallen die starken Schwankungen auf. Auffällig sind ebenfalls die hohen Werte für die Stoffgruppe „Feinkorn“ (10.116,7 - 45.272,2 Stück/100 g), die dazu führen, dass auch kleine Feinkornmassen in hohen berechneten Stückzahlen resultieren. Das führt dazu, dass die Stückzahlanteile der EWK-Produkte stark abnehmen, sobald die absoluten Stückzahlen der Abfälle ermittelt werden (vgl. Abbildung 2).

4 Diskussion – Stückzahlanteile als Kenngröße

Vor dem Hintergrund der methodisch bedingten Unterschiede zwischen der Ermittlung von Massen- und Stückzahlanteilen, insbesondere hinsichtlich der Behandlung der Feingutfraktion zeigt sich eine grundlegende Problematik. Dies ist insbesondere für die Umsetzung der Vorgaben des EWKFondsG relevant, da in der Bemessung von Kostenanteilen für manuell erfassten Straßenkehricht sowohl Massen- als auch Stückzahlanteile herangezogen werden können. Die ermittelten Stückzahlrelationen verdeutlichen zudem, dass Stückzahlen nicht zuverlässig über zuvor bestimmte Umrechnungsfaktoren berechnet werden können, da diese ausgeprägten Schwankungen unterliegen. Infolge dieser Schwankungen sind die berechneten Relationen nur begrenzt übertragbar, was unter anderem auf Einflüsse der Witterung, unterschiedlicher Korngrößen sowie materialbedingter Unterschiede (z.B. Kunststoffe gegenüber Papier) und Anhaftungen von Schmutz zurückzuführen ist. Aufgrund der vorgestellten Herausforderungen bei der Ermittlung von absoluten Stückzahlen und Stückzahlanteilen kann die Nutzung von Stückzahlen als Kenngröße für die Abfallanalyse nicht, oder nur in absoluten Ausnahmefällen, genutzt werden.

Danksagung

Alle Daten stammen aus einer am Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS) durchgeführten Auftragsforschung, die durch die Philip Morris GmbH finanziert wurde, wofür wir herzlich danken. Die Datenerhebung war mit einem erheblichen zeitlichen und personellen Aufwand verbunden, der ohne den engagierten Einsatz unserer studentischen Hilfskräfte nicht hätte realisiert werden können. Danke!

Literatur/Quellen

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (Dezember 2001). LAGA PN 98 - Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG.

Gesetz über den Einwegkunststofffonds (2023).

Verordnung über die Abgabesätze und das Punktesystem des Einwegkunststofffonds 1, 2 (2023).

Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen und bestimmten Warenresten (2023 & i.d.F.v. 25.09.2023).

Europäisches Parlament (2019). Richtlinie (EU) 2019/904 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt.

Henning Wilts et al. (2022). Erarbeitung eines Kostenmodells für die Umsetzung von Artikel 8 Absatz 2 und 3 der EU-Einwegkunststoffrichtlinie.

LfULG Sachsen. (2014). Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen: Sächsische Sortierrichtlinie

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2022). Afwegingskader: Regelgeving kunststofproducten voor eenmalig gebruik. https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/12/16/2022288838-1-bijlage-afwegingskader-verpakkingen-sup-regelgeving

Spies, A. M., Geldmacher, J., García López, C., Pretz, T. & Raulf, K. (2023a). Methodology to quantify single-use plastic products in municipal solid waste Part 1: Development of a sampling methodology. Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, https://doi.org/10.1177/0734242X231190803

Spies, A. M., Geldmacher, J., García López, C., Pretz, T. & Raulf, K. (2023b). Methodology to quantify single-use plastic products in municipal solid waste Part 2: Quantification of tobacco products with filters in Germany. Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, https://doi.org/10.1177/0734242X231200091

Kontakt

Fabian Rüttnauer, M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS), RWTH Aachen
fabian.ruettnauer@ants.rwth-aachen.de

Philipp Schetter

Zirkuläre Nutzung von Kunststoffen aus Elektrofahrzeugen

***Abstract**: Mit dem Übergang zur Elektromobilität befindet sich die Automobilindustrie in einem umfassenden Transformationsprozess. Elektrofahrzeuge (EVs) sind ein zentraler Bestandteil von Klimaschutz- und Dekarbonisierungsstrategien (vgl. Europäisches Parlaments und Rat 2023 & Bundesregierung Deutschland 2023). Gleichzeitig stellen sich in diesem Bereich neue Anforderungen an Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Recyclingfähigkeit (vgl. Europäische Kommission 2023 & Europäische Union 2024). Der Umstieg auf elektrifizierte Antriebe verändert nicht nur den Fahrzeugaufbau, sondern auch die Zusammensetzung der eingesetzten Materialien. Insbesondere Kunststoffe nehmen aufgrund ihrer Leichtbauvorteile, ihrer geringeren Material- und Verarbeitungskosten sowie ihres gestalterischen Potenzials eine zentrale Rolle in der Fahrzeugentwicklung ein. In modernen EVs finden sich zunehmend faserverstärkte und Verbundkunststoffe, die sowohl in funktionalen Bauteilen als auch in Innenraumelementen eingesetzt werden (VDI Wissensforum GmbH, 2014).*

Die Herausforderung besteht zukünftig darin, diese Materialien wieder in den Kreislauf zu bringen. Zurzeit sind sie nach der Fahrzeugverwertung überwiegend in der sogenannten Shredderleichtfraktion (SLF) zu finden. Diese Fraktion umfasst eine Vielzahl heterogener Kunststoffreste, die aufgrund fehlender Sortenreinheit und komplexer Materialverbindungen bisher kaum stofflich verwertet werden können (B.J. Jody & E.J. Daniels 2006). Mit dem steigenden Anteil von EVs ist, wie oben dargestellt, künftig von einem vermehrten Aufkommen solcher Kunststofffraktionen auszugehen. Vor diesem Hintergrund gewinnen neue Strategien zur Demontage, Wiederverwendung und Aufbereitung dieser Materialien zunehmend an Bedeutung. Europäische und nationale Regelwerke, insbesondere die neue Altfahrzeugverordnung, setzen verstärkt auf höhere Recyclingquoten und den Einsatz recycelter Kunststoffe (vgl. Europäische Kommission 2023). Gleichzeitig rücken, durch die Umsetzung der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS), Konzepte wie die R9-Strategien – also Refuse, Rethink, Reduce, ReUse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle und Recover – als systematischer Rahmen zur nachhaltigeren Gestaltung der Produktlebenszyklen und zur Ressourcenschonung in den Fokus der deutschen Bundesregierung (vgl. Bundesregierung Deutschland 2025).

1 Zielsetzung

Die Arbeit zielt darauf ab, ein umfassendes und empirisch fundiertes Bild der Kunststoffströme in EVs zu liefern. Dazu werden technische, wirtschaftliche, ökologische und regulatorische Aspekte integriert betrachtet. Grundlage bilden detaillierte Analysen der Materialzusammensetzung ausgewählter EVs sowie ein Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Aufbauend darauf werden ausgewählte R-Strategien zu spezifischen Fahrzeugkomponenten zugeordnet sowie Bauteile mit hohem Wiederverwendungs-, Aufarbeitungs- oder Recyclingpotenzial identifiziert. Die Kunststoffanteile in der Shredderleichtfraktion werden ebenfalls charakterisiert und bezüglich einer Verwertung eingeordnet. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Einbettung der erzielten Ergebnisse in den aktuellen regulatorischen Rahmen, insbesondere der europäischen Altfahrzeugverordnung, der Ecodesign for Sustainable Products Regulation und dem Kreislaufwirtschaftsgesetz. Auf Grundlage der Analyse soll die Arbeit Fahrzeugherstellern, Demon-

tagebetrieben und politischen Entscheidungsträgern als strategische Bewertungs- und Orientierungshilfe dienen und aufzeigen, welche technischen und organisatorischen Maßnahmen geeignet sind, um Kunststoffkomponenten effizient im Kreislauf zu halten und regulatorische Anforderungen, etwa zu Rezyklateinsatzquoten oder Design-for-Recycling-Vorgaben, umzusetzen.

2 Methodik

Die Methodik der Arbeit basiert auf einem Forschungsansatz, der ingenieurwissenschaftliche, ökonomische, ökologische und rechtliche Perspektiven miteinander verbindet. Grundlage bildet die Anwendung der R-Strategien, welche den gesamten Lebenszyklus von Kunststoffkomponenten von der Vermeidung bis zur stofflichen oder energetischen Verwertung abbilden.

Zu Beginn der Arbeit erfolgte eine Literatursichtung, in der der aktuelle Stand der Forschung zu Kunststoffanwendungen im Fahrzeugbau sowie zu Demontage- und Recyclingstrategien von EVs aufgearbeitet wird. Ergänzend wurden die relevanten regulatorischen Rahmenbedingungen auf europäischer und nationaler Ebene analysiert. Die Literaturanalyse dient der wissenschaftlichen Einordnung des Forschungsvorhabens, der Identifikation bestehender Wissenslücken sowie der methodischen Fundierung der nachfolgenden empirischen Untersuchungen. Darauf aufbauend werden mehrere EVs unterschiedlicher Hersteller vollständig demontiert, um die eingesetzten Materialien, ihre stoffliche Zusammensetzung sowie Konstruktions- und Verbindungsprinzipien systematisch zu erfassen, mit der Literatur abzugleichen und vorhandene Daten zu plausibilisieren bzw. zu ergänzen. Ziel ist es, material- und designbedingte Unterschiede zwischen den Fahrzeugen zu identifizieren und den IST-Zustand aktueller EVs hinsichtlich Materialstruktur, Rückbaubarkeit und Kunststoffverwendung empirisch zu bestimmen. Ergänzend erfolgt ein Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, um Unterschiede im Materialeinsatz, in der Kunststoffvielfalt und im Verwertungspotenzial herauszuarbeiten. Die Ergebnisse dieser Analysen bilden zugleich die Grundlage für die Anwendung der Strategien Refuse und Rethink, indem bewertet wird, welche Materialien oder Konstruktionsweisen künftig vermieden und wie bestehende Designkonzepte im Sinne einer ressourceneffizienten und recyclinggerechten Fahrzeugentwicklung weiterentwickelt werden können. Im nächsten Schritt soll der Materialeinsatz quantitativ bilanziert werden, wobei das gesamte Fahrzeug betrachtet wird, um die relativen Gewichts- und Stoffströme verschiedener Werkstoffgruppen – insbesondere Metalle, Polymere und Verbundwerkstoffe – im Gesamtkontext zu bewerten. Die im Zuge der Demontage gewonnenen Kunststoffkomponenten werden anschließend exemplarisch hinsichtlich Rückbauzeit, Verbindungstechnik, Materialintegrität und Wiederverwendungsfähigkeit (Reuse) bewertet. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Rolle der Demontagetiefe und ihrem Einfluss auf die Zusammensetzung und den Anteil der verbleibenden Shredderleichtfraktion, um geeignete Bauteile für eine direkte Wiederverwendung oder hochwertige stoffliche Verwertung zu identifizieren. Für ausgewählte beschädigte oder gealterte Kunststoffkomponenten werden geeignete Aufarbeitungs- und Wiederherstellungsverfahren (Repair, Refurbish, Remanufacture) untersucht und hinsichtlich ihrer Effizienz mit der Neuteilherstellung verglichen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der stofflichen Rückgewinnung von Kunststoffen (Recycle), insbesondere aus Shredderfraktionen, deren Zusammensetzung, Verunreinigungen und Materialarten untersucht werden. Dabei werden nicht ausschließlich gemischte Fraktionen betrachtet, sondern auch sortenrein gewonnene Kunststoffanteile, sofern diese kein unmittelbares Wiederverwendungspotenzial aufweisen und daher einer stofflichen Verwertung zugeführt werden. Ziel ist es, Recyclingansätze zu entwickeln, die eine möglichst hochwertige stoffliche Verwertung ermöglichen und den Anteil der energetischen Verwertung minimieren.

3 Erste Ergebnisse

Eine erste Auswertung der einschlägigen Literatur zeigte, dass bislang nur wenige aussagekräftige Daten zur Verwendung von Kunststoffen in Elektrofahrzeugen vorliegen. Vor diesem Hintergrund wurde zur Verifizierung und Ergänzung der verfügbaren Informationen eine erste initiale Demontage durchgeführt. Die nachfolgenden Ergebnisse ergeben sich aus der Anwendung der zuvor dargestellten methodischen Vorgehensweise und liefern erste Erkenntnisse zu dem im Rahmen der Demontagearbeiten als Referenzfahrzeug untersuchten Renault Kangoo. Das Gesamtfahrzeug wies eine Masse von 1.408 kg auf, wovon 126,7 kg (rund 9 %) auf kunststoffbasierte Komponenten entfielen. Dieser Mengenanteil liefert erste Anhaltspunkte für die geplante systematische Materialinventarisierung im Promotionsvorhaben. Die gesamte Kunststoffmasse wurde in funktionale Materialkategorien unterteilt. Reine Kunststoffe machten dabei 75,8 % aus und umfassten insbesondere großvolumige Interieur- und Exterieurbauteile. Ein weiterer wesentlicher Anteil entfiel auf Verbundmaterialien. Hier dominierte der Autositz als exemplarisches Bauteil, der in der Kategorie „Verbundmaterial“ erfasst wurde und 17,8 % der zugeordneten Kunststoffmasse ausmachte. Kleinere Anteile entfielen auf Kunststoff-Metall-, Kunststoff-Textil- sowie Kunststoff-Kabel-Kombinationen. Zusätzlich konnten 2,6 % der Masse rein metallischen Komponenten zugeordnet werden, die im Zuge der Feindemontage von den Kunststoffbauteilen getrennt wurden.

Tabelle 1: Materialkategorien der Kunststoffkomponenten (Renault Kangoo)

Kategorie	**Anteil an der Kunststoffmasse**
Reiner Kunststoff	75,78 %
Verbundmaterialien	17,80 %
Reines Metall	2,61 %
Kunststoff + Metall	2,06 %
Kunststoff + Textil	1,60 %
Kunststoff + Kabel	0,08 %
Kunststoff + Kunstleder	0,07 %
Gesamt	**100,00%**

Die detaillierte Auswertung der Kunststoffarten, die über die Kennzeichnungen auf den jeweiligen Kunststoffteilen erfolgte, zeigte, dass insbesondere Polyolefine wie Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) einen hohen Anteil einnehmen. Gleichzeitig wiesen die Verbunde einen Anteil von 32,1 % auf, wobei sich allein der Autositz auf 18,3 % der Gesamtkunststoffmasse belief. Der Anteil der Bauteile ohne eindeutige Materialkennzeichnung betrug 25,8 %, sodass hierfür weiterführende Untersuchungen erforderlich sind, um eine belastbare Zuordnung zu spezifischen Kunststofffraktionen vornehmen zu können.

Tabelle 2: Übersicht der identifizierten Kunststoffarten (Renault Kangoo)

Material	**Anteil an der Gesamtkunststoffmasse**
ABS	0,41 %
ABS + PC	0,12 %
ASA + ABS	0,07 %
EPDM	0,08 %
PA 6 GK 20 GF 10	0,35 %
PA 6 mit GF-Anteil	0,63 %
PA 66	0,09 %
PA 66 SI	0,23 %
PA 66 MD 15	0,43 %
PA 66 mit GF-Anteil	0,13 %
PBT + ASA GF 30	0,05 %
PBT + PBT GF 15	0,10 %
PC + ABS	0,12 %
PE	8,34 %
PE + EPDM MD15	0,12 %
PE + EPDM TD 25	0,42 %
PE-HD	0,34 %
PE mit MD-Anteil	6,59 %
PE TD 20	1,12 %
PETP + EPDM	0,07 %
POM	0,97 %
PP	6,76 %
PP + EPDM	0,08 %
PP GF30 + EPDM	0,35 %
PP GFL 40 + PA 66	3,27 %
PP HC	0,24 %
PP MD 20	0,09 %
PP MD 20 + SEBS	0,80 %
PP mit GF-Anteil	2,79 %
PP mit TD-Anteil	0,97 %
PPE + PA 66	3,03 %
PS	0,46 %
PUR GF 25	0,96 %
UP CF 20	1,46 %
Verbunde (min. 3 unterschiedlichen Materialien)	32,12 %
Keine Kennzeichnung	25,84 %
Gesamt	**100,00 %**

4 Ausblick

Im weiteren Projektverlauf werden zusätzliche Elektrofahrzeugmodelle demontiert, um die Datengrundlage zu verifizieren sowie zu erweitern und die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Die erfassten Kunststoffkomponenten werden materialanalytisch charakterisiert und hinsichtlich geeigneter Verwertungswege bewertet. Dabei werden sowohl Potenziale der Wiederverwendung als auch der stofflichen Verwertung berücksichtigt. Dieser Ansatz erlaubt eine differenzierte Zuordnung der Kunststoffbauteile zu geeigneten Verwertungsoptionen und bildet die Grundlage für die Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Kreislaufführung von Kunststoffen aus Elektrofahrzeugen.

Literatur/Quellen

B. J. Jody; E. J. Daniels (2006): End-of-Life Vehicle Recycling: The State of the Art of Resource Recovery from Shredder Residue. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory (Ed.). Argonne, Illinois (USA). Online verfügbar unter: https://publications.anl.gov/anlpubs/2007/02/58559.pdf, zuletzt geprüft am 05.01.2026

Bundesregierung Deutschland (2023): Klimaschutzprogramm 2023 der Bundesregierung. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/klimaschutz/20231004-klimaschutzprogramm-der-bundesregierung.pdf?blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 15.12.2025

Bundesregierung Deutschland (2025): Transformation gemeinsam gerecht gestalten - Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Weiterentwicklung 2025. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bundesumweltministerium.de/themen/nachhaltigkeit/strategie-und-umsetzung/nachhaltigkeitsstrategie, zuletzt geprüft am 05.01.2026

Europäische Union (2024): Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte - 13.06.2024 (Amtsblatt der Europäischen Union ABl. L 1781/1). Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401781, zuletzt geprüft am 15.12.2025

Europäische Kommission (2023): Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates über Anforderungen an die kreislauforientierte Konstruktion von Fahrzeugen und über die Entsorgung von Altfahrzeugen, zur Änderung der Verordnungen (EU) 2018/858 und (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinien 2000/53/EG und 2005/64/EG. Brüssel. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52023PC0451, zuletzt geprüft am 05.01.2025

Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union (2023): Verordnung zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO_2-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und neue leichte Nutzfahrzeuge im Einklang mit den ehrgeizigeren Klimazielen der Union - 19.04.2023 (Amtsblatt der Europäischen Union L 110/5). Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0851, zuletzt geprüft am 15.12.2025

VDI Wissensforum GmbH (Ed.) (2014): Kunststoffe im Automobilbau. Düsseldorf, VDI Verlag GmbH. ISBN 978-3-18-234333-2

Kontakt

M. Sc. Philipp Schetter, wissenschaftlicher Mitarbeiter
FH Münster, IWARU - Arbeitsgruppe Ressourcen
Tel.-Nr. 0251 83-65176
E-Mail: p.schetter@fh-muenster.de
Homepage: https://www.fh-muenster.de/de/iwaru

Karin Schinner, Hannah Weber, Gerald Koinig, Alexia Tischberger-Aldrian

Quantifizierung von Elastan mit unterschiedlichen Charakterisierungsmethoden

***Abstract**: Trotz der steigenden Mengen an Textilabfällen, bei sinkender Qualität und immer komplexer werdender Zusammensetzung der Textilien, basiert die Textilsortierung in Europa noch zu einem Großteil auf händischer Sortierung und nur etwa 1 % der Alttextilien werden wieder zu neuer Kleidung verarbeitet. Beim Ausbau auf eine automatisierte Textilsortierung stellen vor allem Mischtextilien mit geringen Anteilen an Elastan die herkömmlichen Technologien wie Nahinfrarotspektroskopie (NIR) vor große Herausforderungen. Elastan ist in einer Vielzahl an Kleidungsstücken in jeweils kleinen Mengen vorhanden, bleibt für die Sensoren in der Sortierung oft unsichtbar, führt aber im Faserrecycling zu vielen Problemen. Um mit der bereits industriell etablierten und vergleichsweise günstigen NIR-Technologie in Zukunft zuverlässig Textilien sortieren zu können, wurde untersucht, ob eine zusätzliche Kategorisierung, wie die Art des Kleidungsstücks, bessere Quantifizierungsmodelle für Elastan ermöglichen. Da Kleidungstücke einer Art häufig eine ähnliche textile Struktur und Oberflächenbeschaffenheit aufweisen, können die Spektren gezielt mit Spektren der gleichen Kleidungskategorie verglichen werden. So konnte bei Bademode aus Polyamid und Elastan ein Modell entwickelt werden, das den Elastan-Gehalt anhand der NIR-Spektren eines Handheld Gerätes mit einem RMSEC von 1,74 und einem R2 Wert von 0,86 (PLS-Modell mit 4 Faktoren) vorhersagen kann.*

1 Einleitung

Die Textilindustrie steht zunehmend im Fokus der europäischen Kreislaufwirtschaftsstrategien, da sie sowohl ökologisch als auch ressourcenökonomisch zu den problematischsten Sektoren zählt. Allein durch den jährlichen Textilkonsum entstehen pro EU-Bürger:in etwa 270 kg CO_2-Emissionen und etwa 11 kg an Textilabfällen (European Comission 2022; Europäisches Parlament 2024).

Der Trend zu „Fast Fashion“ verstärkt diesen Überkonsum und führt zu stetig wachsenden Mengen an Textilabfällen, bei gleichzeitig geringer werdender Qualität. Der Anteil an wiederverwendbarer Ware sinkt dabei, aber der potenziell geeignete Anteil für Recycling steigt. Aktuell werden nur etwa 1 % der Textilabfälle wieder zu neuer Kleidung verarbeitet, aber wenn die Kreislaufwirtschaftsziele der EU erreicht werden sollen, muss das Faserrecycling in Zukunft einen erheblich größeren Beitrag dazu leisten. (Europäisches Parlament 2024; Boschmeier et al. 2023; Nørup et al. 2019)

Eine wesentliche Herausforderung im Textilrecycling stellt die zunehmende Verbreitung von Mischtextilien dar. Besonders problematisch ist dabei der Einsatz von Elastan (Boschmeier et al. 2023). Die Polyurethanfasern nehmen mit einem Marktanteil von etwa 1 % zwar nur eine geringe Menge der weltweiten Faserproduktion ein, besitzen jedoch eine zentrale Rolle in der Textilindustrie, da sie häufig in geringen Anteilen als Beimischung in Mischtextilien verwendet werden. (Textile Exchange 2025)

Aufgrund der hohen thermischen und chemischen Stabilität führen Elastan-Fasern jedoch in mechanischen und chemischen Recyclingverfahren zu erheblichen Problemen wie Filterverstopfungen oder Qualitätsminderung der Recyclingware. Eine verlässliche Detektion, präzise Quantifizierungsmethoden und selektive Abtrennverfahren für Elastan sind daher für eine gut funktionierende Kreislaufwirtschaft im Textilbereich entscheidend. (Boschmeier et al. 2023; Choudhury et al. 2024)

Bei der Textilsortierung ist zurzeit noch die händische Sortierung weit verbreitet, aber in Zukunft wird die Textilsortierung zunehmend auf automatisierten Technologien basieren, um materialspezifisch und mit höherem Durchsatz sortieren zu können. Die derzeit wichtigste Technologie, die auch schon industriell eingesetzt wird, ist die Nahinfrarotspektroskopie (NIR). Für die herkömmliche NIR-Sortierung sind allerdings geringe Anteile an Elastan in Mischtextilien oft unsichtbar. Die Hauptfasern absorbieren häufig im selben Wellenlängenbereich wie Elastan und die Elastan-Fasern sind zudem häufig von anderen Fasern ummantelt oder so in das Gewebe integriert, dass sie an der Oberfläche nicht zu sehen sind. Das führt dazu, dass bei geringen Elastan-Anteilen oft nur die Hauptfaser erkannt wird. (Boschmeier et al. 2023; Cura et al. 2021; Tischberger-Aldrian et al. 2024)

Im Bereich Textilsortierung und Quantifizierung von Elastan werden zwar eine Reihe von alternativen Technologien erforscht, wie Raman-Spektroskopie (Tsai und Yuan 2024) oder RFID-Tags, jedoch sind diese Technologien entweder noch nicht ausgereift, können Elastan in Textilien nicht verlässlich erkennen oder sind wirtschaftlich ungünstig.

Ein Ziel dieser Masterarbeit war zu untersuchen, ob mit herkömmlicher Nahinfrarot-Technologie in verschiedenen Wellenlängenbereichen eine Quantifizierung von Elastan möglich ist, wenn bestimmte zusätzliche Informationen vorhanden sind. Die Hypothese war, dass bestimmte Textilien wie zum Beispiel Bademoden eine ähnliche Faserstruktur aufweisen, aus denselben Hauptmaterialien bestehen und ähnliche Verarbeitung und Oberflächenbeschaffenheit besitzen. Dadurch können die Spektren von Bademoden mit verschiedenen Elastan-Anteilen besser miteinander verglichen werden. So könnte in Zukunft eine KI-basierte Objekterkennung die Art der Textilien erkennen und dann die aufgenommenen NIR-Spektren gezielt mit den Spektren der relevanten Kategorie vergleichen, um den Elastan-Gehalt besser abschätzen zu können. Durch diese Methode könnte die bereits etablierte Sortiertechnologie an die erschwerenden Umstände bei der Textilsortierung angepasst werden, ohne völlig andere, teure Sensorik einsetzen zu müssen. Um dies zu testen, wurden im Rahmen der Masterarbeit eine Reihe von Analysen durchgeführt, um die Textilstruktur und Zusammensetzung der Proben zu untersuchen und ein Modell zur Quantifizierung von Elastan mittels NIR-Spektren zu erstellen.

2 Methodik

Für die Analysen wurden Proben aus den drei Kategorien Jeans aus Baumwolle, Sportkleidung aus Polyester und Badebekleidung aus Polyamid mit verschieden Anteilen an Elastan gewählt. Die Auswahl dieser drei Kategorien und der Proben basierte auf einer umfassenden Recherche zur Materialzusammensetzung von verschieden Kleidungskategorien auf Webseiten beliebter Modeketten. Diese drei Kategorien bestehen häufig aus jeweils einem Hauptmaterial mit verschiedenen Anteilen an Elastan und sind optisch gut zu erkennen und von anderen Kleidungsarten abzugrenzen.

Bei allen Proben wurden Materialspezifikationen vom Etikett und optische Auffälligkeiten notiert sowie die textile Struktur und Verarbeitung der Elastan-Fasern mithilfe eines digitalen Lichtmikroskops untersucht. Zusätzlich wurde nasschemisch nach ÖNORM EN ISO 1833-20 der Elastan-Gehalt bestimmt und eine CHN-Elementaranalyse durchgeführt und die Ergebnisse mit den Angaben auf den Etiketten verglichen.

Es wurden sowohl mit einem Handheld NIR-Gerät, das im Wellenlängenbereich 1596–2396 nm arbeitet, als auch am Sensorstand des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, bei dem der Sensor einen Wellenlängenbereich von 911–1677 nm abdeckt, Spektren für jede Probe aufgenommen und verglichen.

3 Auswertung und Ergebnisse

Da die feinen Unterschiede im Verlauf der Spektren mit freiem Auge schwierig zu erkennen waren und neben dem Elastangehalt andere Einflussfaktoren bestanden, wurden PLS-Modelle erstellt, mit denen der Elastangehalt von Proben anhand der NIR-Spektren berechnet wurde. Für die Erstellung der PLS-Modelle wurden für den vorliegenden Beitrag die ersten Ableitungen der NIR-Spektren des Handheld Gerätes verwendet. Für jede Kategorie wurden Modelle mit drei, vier und fünf latenten Variablen erstellt und verglichen. Es wurde festgestellt das die Qualität der Modelle jedoch nicht für alle drei Kategorien gleich gut ist. Je nach Komplexität (3 bis 5 Variablen) der PLS-Modelle erreichte man bei Jeans RMSEC Werte von 1,1 bis 0,9 und ein R^2 von 0,5 bis 0,67. Bei Sport wurden Werte zwischen 3,3 und 2,4 für RMSEC und R^2 -Werte von 0,5 bis 0,7 erreicht. Bei den Bademode-Proben lagen die RMSEC-Werte zwischen 2 und 1,6 und R^2 zwischen 0,8 und 0,9. Der RMSEC Wert (Root Mean Square Error) war demnach zwar bei allen Modellen niedrig, was auf eine hohe Vorhersagegenauigkeit hinweist, da geringere durchschnittliche Vorhersagefehler auftreten, aber das R^2 war bei der Bademode deutlich besser als bei der Kategorie Jeans. Während bei der Bademode aus Polyamid und Elastan ein PLS-Modell mit 4 latenten Variablen bereits ein R^2 von 0,86 aufweist, waren die Ergebnisse bei den Jeans selbst bei höherer Variablen-Anzahl nicht so vielversprechend. Wie zu erwarten war, ist die Quantifizierung von Elastan bei sehr kleinen Anteilen (unter 5%) mithilfe von NIR-Technologien schwierig. In Abbildung 1 ist das PLS-Modell für die Badebekleidungsproben zu sehen. Es wird gezeigt, wie akkurat das Modell auf Grundlage der NIR-Spektren den Elastan-Gehalt der Proben berechnen kann, also wie genau die errechneten Werte mit den Elastan-Anteilen laut Etikett übereinstimmen.

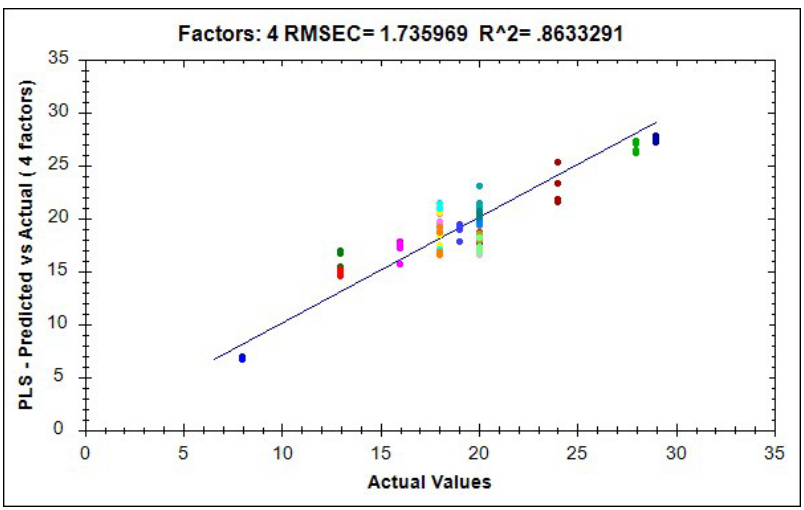


Abbildung 1: PLS-Modell Badebekleidung

Die Ergebnisse zeigen in Summe das Potential auf, um mit erweiterten Informationsdatenbanken und objektspezifischen Zusatzinformationen die Nahinfrarot-Technologie in Zukunft für die Textilsortierung hinsichtlich der Elastan-Quantifizierung nutzen zu können. Bei sehr geringen Anteilen an Elastan muss jedoch weiterhin mit größeren Fehlern bei der Quantifizierung von Elastan gerechnet werden.

Danksagung

Dieser Beitrag wird als Teil des Forschungsprojekts „StraTex“ (FO999917957) von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft gefördert.

Literatur/Quellen

Boschmeier, Emanuel; Archodoulaki, Vasiliki-Maria; Schwaighofer, Andreas; Lendl, Bernhard; Ipsmiller, Wolfgang; Bartl, Andreas (2023b): New separation process for elastane from polyester/elastane and polyamide/elastane textile waste. In: Resources, Conservation and Recycling 198, S. 107215. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107215.

Choudhury, Khaliquzzaman; Tsianou, Marina; Alexandridis, Paschalis (2024): Recycling of Blended Fabrics for a Circular Economy of Textiles: Separation of Cotton, Polyester, and Elastane Fibers. In: Sustainability 16 (14). DOI: 10.3390/su16146206.

Cura, Kirsti; Rintala, Niko; Kamppuri, Taina; Saarimäki, Eetta; Heikkilä, Pirjo (2021): Textile Recognition and Sorting for Recycling at an Automated Line Using Near Infrared Spectroscopy. In: Recycling 6 (1). DOI: 10.3390/recycling6010011.

Europäisches Parlament (2024): Umweltauswirkungen von Textilproduktion und -abfällen. Online verfügbar unter https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20201208STO93327/umweltauswirkungen-von-textilproduktion-und-abfallen-infografik.

European Comission (2022): EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles. Hg. v. European Comission. Online verfügbar unter https://environment.ec.europa.eu/publications/textiles-strategy_en.

Nørup, Nynne; Pihl, Kaj; Damgaard, Anders; Scheutz, Charlotte (2019): Evaluation of a European textile sorting centre: Material flow analysis and life cycle inventory. In: Resources, Conservation and Recycling 143, S. 310–319. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.01.010.

Textile Exchange (2025): Materials Market Report 2025. Hg. v. Textile Exchange. Online verfügbar unter https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2025/.

Tischberger-Aldrian, Alexia; Stipanovic, Hana; Kuhn, Nikolai; Bäck, Tanja; Schwartz, Daniel; Koinig, Gerald (2024): Automatisierte Textilsortierung – Status quo, Herausforderungen und Perspektiven. In: Österr Wasser- und Abfallw 76 (1-2), S. 63–79. DOI: 10.1007/s00506-023-01004-5.

Tsai, Pei-Fen; Yuan, Shyan-Ming (2024): Using Infrared Raman Spectroscopy with Machine Learning and Deep Learning as an Automatic Textile-Sorting Technology for Waste Textiles. In: Sensors (Basel, Switzerland) 25 (1). DOI: 10.3390/s25010057.

Kontakt

Hannah Weber (Wissenschaftliche Mitarbeiterin)
Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW), Montanuniversität Leoben
Tel.-Nr. +43 660 / 51 79 09 0
E-Mail: hannah.weber@unileoben.ac.at
Homepage: https://www.avaw-unileoben.at/de/

Annalena Secci

Rechtliche Unsicherheiten beim Recycling medizinischer Einwegprodukte in Praxen und Kliniken – Analyse und anwendungsorientierte Gestaltung aus rechtswissenschaftlicher Sicht

***Abstract**: Der Beitrag untersucht die rechtlichen Unsicherheiten und Herausforderungen beim Recycling medizinischer Einwegprodukte in Kliniken und Praxen mit besonderem Fokus auf das Abfallrecht. Im Mittelpunkt stehen die abfallrechtlichen Vorgaben sowie die praktische Anwendung und Zuordnung von Abfallschlüsseln. Es werden rechtliche Risiken fehlerhafter Abfallzuordnung, aktuelle Herausforderungen in der Umsetzung sowie Reformbedarfe und praxisorientierte Lösungsansätze dargestellt.*

1 Einleitung, Anlass und Ziel der Arbeit

Insbesondere das Recycling von medizinischen Einwegprodukten und deren Integration in die Kreislaufwirtschaft sind, wie sich im Folgenden zeigen wird, mit vielfältigen (rechtlichen) Unsicherheiten und Herausforderungen verbunden. Neben den umweltrechtlichen Vorgaben wie dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) sind auch Infektionsschutz- und Arbeitsschutzvorgaben zu beachten. Der vorliegende Beitrag beleuchtet die einschlägigen rechtlichen Rahmenbedingungen und zeigt praxisorientierte Lösungsansätze auf. Ziel ist es, die Kreislaufwirtschaft im medizinischen Bereich rechtskonform zu ermöglichen und dabei sowohl Umwelt- als auch Infektionsschutz- und Arbeitsschutzstandards zu wahren. Der Fokus der Analyse liegt auf dem Abfallrecht, da die relevanten rechtlichen Fragestellungen chronologisch an der Entstehung und Sammlung medizinischer Einwegprodukte ansetzen und sich insbesondere im Kontext der Abfallentsorgung manifestieren.

2 Rechtsgrundlagen des Abfallrechts

Das Abfallrecht ist in den verschiedenen Ebenen des Rechts vielschichtig geregelt. Neben dem europäischen Abfallrecht gilt es das deutsche Abfallrecht zu beachten. Es umfasst bundesrechtliche Regelungen, landesrechtliche Vorschriften sowie Satzungen der kommunalen Entsorgungsträger.[1] Von deutschen Rechtsanwendenden ist zuvorderst das KrWG, das Leitgesetz des deutschen Abfallrechts,[2] welches durch verschiedene Gesetze und Rechtsverordnungen ergänzt wird,[3] zu betrachten. Zweck des KrWG ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen (§ 1 Abs. 1 KrWG). Die Vorschriften des KrWG gelten für die Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen sowie die

1 *Beckmann*, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht, Einführung in das Kreislaufwirtschaftsrecht, Rn. 54.
2 *Beckmann*, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht, Einführung in das Kreislaufwirtschaftsrecht, Rn. 12.
3 *Beckmann*, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht, Einführung in das Kreislaufwirtschaftsrecht, Rn. 12.

sonstigen Maßnahmen der Abfallbewirtschaftung (§ 2 Abs. 1 Nrn. 1-4 KrWG). § 6 KrWG legt eine Abfallhierarchie fest (§ 6 Abs. 1 Nrn. 1-5 KrWG). Diese Abfallhierarchie ist auch von Praxen und Kliniken einzuhalten.

3 Abfallschlüssel und Zuordnungsprobleme in Kliniken und Praxen

Eine zentrale Rolle bei der Einordnung medizinischer Abfälle spielt die AVV. Sie gilt gem. § 1 Nrn. 1 f. AVV für die Bezeichnung sowie die Einstufung von Abfällen nach ihrer Gefährlichkeit. In der Anlage der AVV findet sich das Abfallverzeichnis mit den verschiedenen Kapiteln und Abfallschlüsseln. Diese sind durch Vorgaben der Entscheidung der Kommission 2000/532/EG europäisch harmonisiert. Für Praxen und Kliniken ist wohl vor allem Kapitel 18, welches sich auf Abfälle aus der humanmedizinischen oder tierärztlichen Versorgung und Forschung (ohne Küchen- und Restaurantabfälle, die nicht aus der unmittelbaren Krankenpflege stammen) bezieht, relevant. Eine große Relevanz haben hier vor allem die beiden Abfallschlüssel 18 01 03*, Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht besondere Anforderungen gestellt werden sowie 18 01 04, Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden (z.B. Wund- und Gipsverbände, Wäsche, Einwegkleidung, Windeln). Abfälle aus beiden Schlüsseln können Stand heute grundsätzlich nur thermisch verwertet und dürfen in der Regel nicht getrennt werden. Es stellt sich die Frage, wie die rechtssichere und zugleich praxisnahe Zuordnung medizinischer Einwegprodukte zu den entsprechenden Abfallschlüsseln erfolgen kann und welche Unsicherheiten und Herausforderungen für die Kreislaufwirtschaft im Gesundheitswesen daraus resultieren.

Die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) gibt in ihrer Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes (LAGA M 18) verschiedene Hinweise zur Einstufung von Abfällen aus verschiedenen Einrichtungen des Gesundheitsdienstes.[4] Die rechtmäßige Bezeichnung und Einstufung der Abfälle liegt in der Verantwortung des Abfallerzeugers.[5] Unter bestimmten Voraussetzungen können in Kliniken und Praxen anfallende Abfälle anderen Abfallschlüsseln zugeordnet werden. Die LAGA M 18 stellt fest, dass „an der Anfallstelle getrennt erfasste und nicht mit Blut, Sekreten oder Exkreten kontaminierte Abfälle (z.B. Papier, Zeitschriften, Verpackungen usw.) und Abfälle, die nicht aus der direkten Behandlung von Patienten stammen“, nicht unter den Abfallschlüssel 18 01 04 fallen und „einem spezielleren Abfallschlüssel zuzuordnen“ sind.[6] Beispielhaft wird hierfür der Abfallschlüssel 15 01 XX[7] genannt. Verpackungen, die die soeben genannten Voraussetzungen erfüllen, können somit unter anderem unter den Verpackungen umfassenden Abfallschlüssel 15 01 XX fallen. Die damit möglich stoffliche Verwertung ist mit Blick auf die Abfallhierarchie aus § 6 KrWG vorzugswürdig (§ 6 Abs. 1 Nrn. 4 f. KrWG). In Betracht kommt wohl auch eine Zuordnung der Abfälle zum Abfallschlüssel 20 0X XX, zu denken ist hier beispielsweise an gemischte Siedlungsabfälle (20 03 01)[8]. Mit Blick auf Siedlungsabfälle ist die GewAbfV zu beachten (vgl. § 1 Abs. 1 Nr. 1 GewAbfV). Insgesamt sollten Kliniken und Praxen insofern prüfen, ob Abfälle, die vorerst scheinbar unter den Abfallschlüssel 18 01 04 fallen, zugunsten einer vorzugswürdigen stofflichen Verwertung nicht einem anderen Abfallschlüssel zugeordnet werden können.

Die rechtlichen Vorgaben zur Abfalltrennung gewinnen insbesondere auch dann an Bedeutung, wenn in Praxen und Kliniken Unsicherheiten oder Fehler bei der Zuordnung auftreten. Es ist zu überlegen, was

4 LAGA (Hrsg.), o.A., Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes, S. 3.
5 LAGA (Hrsg.), o.A., Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes, S. 25.
6 LAGA (Hrsg.), o.A., Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes, S. 10.
7 LAGA (Hrsg.), o.A., Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes, S. 10.
8 LAGA (Hrsg.), o.A., Vollzugshilfe zur Entsorgung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes, S. 20.

passiert, wenn Abfälle, welche dem Schlüssel 18 01 03* zuzuordnen sind, mit anderen Abfällen vermischt werden. Gem. § 9a Abs. 1 KrWG ist die Vermischung einschließlich Verdünnung gefährlicher Abfälle mit anderen Kategorien von gefährlichen Abfällen oder mit anderen Abfällen, Stoffen oder Materialien unzulässig. Das Vermischen von gefährlichen Abfällen mit gefährlichen Abfällen anderer Abfallarten[9] sowie mit nicht gefährlichen Abfällen ist unzulässig.[10] Wer vorsätzlich oder fahrlässig entgegen § 9a Abs. 1 KrWG gefährliche Abfälle vermischt, handelt ordnungswidrig (§ 69 Abs. 1 Nr. 1 KrWG). Demgegenüber widerspräche wohl auch eine Praxis, Abfälle vorsorglich dem Abfallschlüssel 18 01 04 einzustufen, obwohl sie objektiv unter Abfallschlüssel 15 oder 20 fallen, dem Grundsatz der Abfallhierarchie aus § 6 KrWG. Gem. § 62 KrWG kann die zuständige Behörde im Einzelfall die erforderlichen Anordnungen zur Durchführung des KrWG und der auf Grund des KrWG erlassenen Rechtsverordnungen treffen. Durch § 62 KrWG werden die nach Landesrecht zuständigen Behörden ermächtigt, die abfallrechtlichen Pflichten durchzusetzen.[11] Neben den rechtlichen Folgen führt die Überdeklaration wohl auch zu höheren Entsorgungskosten und einer Verringerung der stofflichen Verwertungsquote. Die versehentliche Einstufung von Abfällen, die objektiv unter AS 18 01 04 fallen, als Verpackungs- oder Siedlungsabfall, birgt gleichwohl auch Risiken. Zur tatsächlichen Häufigkeit und praktischen Auswirkungen solcher fehlerhaften Zuordnungen besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Relevanz sowie Folgen in der Praxis besser bewerten zu können.

4 Lösungsansätze und Reformbedarf

Im Ergebnis vorangehender Rechtsanalyse und dem Abgleich mit Praxisberichten zeichnet sich eine gewisse Konkurrenz der Umsetzungs- und Regulierungssimplizität mit der Rechts- und Compliance-Sicherheit ab. Trotz grundsätzlich bestehender Typisierung und Vollzugsunterstützung durch die LAGA M 18 bestehen offenbar Anwendungs- und Umsetzungsvorbehalte und Unsicherheiten. Ein erster sinnvoller Schritt für mehr Klarheit und Sicherheit können Prozessanpassungen im Anwendungskontext sein. Hierfür wäre es zunächst hilfreich, wenn genau zwischen den verschiedenen Abfallarten differenziert wird. Dabei könnte praktisch gesprochen z.B. ein einheitliches Farbsystem der verschiedenen Abfallbehältnisse ein erster Lösungsansatz sein. So könnte zunächst eine Änderung auf Prozessebene erfolgen, bevor eine Änderung auf regulatorischer Ebene erfolgen muss. Darüber hinaus könnten auch Klarstellungen im untergesetzlichen Bereich zu mehr Sicherheit im Umgang mit Abfällen im medizinischen Kontext beitragen. Eine solche Klarstellung könnte z.B. im Rahmen der Überarbeitung der LAGA M 18 erfolgen. Wünschenswert wäre hier, dass die Ausführungen zu dem Abfallschlüssel 18 01 04 noch weiter konkretisiert werden. Beispielsweise indem der Grundsatz unzulässiger Trennung mit Erlaubnisvorbehalt in eine Erlaubnis der Trennung unter Nachweis der Arbeitssicherheit gewandelt wird. Darüber hinaus kann mittelbar an eine Anpassung des Kapitel 18 beziehungsweise des Abfallschlüssels 18 01 04 in der AVV gedacht werden. Die Überschrift des Kapitel 18 der AVV suggeriert, dass Abfälle aus der humanmedizinischen und tierärztlichen Versorgung grundsätzlich unter Kapitel 18 fallen und lediglich Küchen- und Restaurantabfälle, die nicht aus der unmittelbaren Krankenpflege stammen, ausgenommen sind. Es stellt sich die Frage, warum nicht sämtliche Abfälle, die nicht aus der unmittelbaren Krankenpflege stammen, ausgenommen werden. Eine Klarstellung wäre wünschenswert.

Überdies erscheint auch die Überschrift des Abfallschlüssels 18 01 04 mit Blick auf das vorliegende Praxisproblem unglücklich gewählt zu sein. Sie suggeriert, dass sämtliche solcher „Abfälle, an deren Samm-

9 *Beckmann*, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht, § 9a KrWG Rn. 6.
10 *Beckmann*, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht, § 9a KrWG Rn. 9.
11 *Beckmann*, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht, § 62 KrWG Rn. 2.

lung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden“, unter den Abfallschlüssel 18 01 04 fallen. Die LAGA M 18 stellt jedoch, wie bereits erläutert, klar, dass Abfälle auch anderen Abfallschlüsseln zugeordnet werden können. Hier wäre es wohl möglicherweise hilfreich, wenn unter Abfallschlüssel 18 01 04 eine Klarstellung erfolgen würde. Insgesamt kann wohl an eine Reform des Kapitel 18 im Gesamten gedacht werden. So stellt sich beispielsweise die Frage der Notwendigkeit des Abfallschlüssels 18 01 04. Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden, werden in privaten Haushalten im Hausmüll entsorgt. Vor diesem Hintergrund wäre zu diskutieren, inwieweit der Abfallschlüssel 18 01 04 für solche Abfälle tatsächlich noch sachgerecht und notwendig ist. Ein vermittelnder Lösungsansatz könnte auch sein, den Schlüssel 18 01 04 zu differenzeren (z.B. „-a“ und „-b“), um bespielsweise Trockenabfälle einer strofflichen Verwertbarkeit grundsätzlich zuzuführen.

Dabei besteht ferner auch zukünftig Forschungsbedarf, wenn beispielsweise materialtechnisch gebotene Grenzwerte, etwa für in der LAGA genannte „größere Mengen von Körperflüssigkeiten“ wissenschaftlich zu bestimmen sind.

5 Fazit und Ausblick

Insgesamt ist eine saubere und differenzierte Abfalltrennung erforderlich, um Recyclingquoten und die Ziele des KrWG zu erfüllen. Wie sich gezeigt hat, setzt die rechtssichere Verwertung medizinischer Einwegprodukte die konsequente Anwendung der abfallrechtlichen Vorgaben voraus. Die bestehenden Unsicherheiten scheinen allerdings weniger aus unklaren übergesetzlichen Regelungen zu resultieren, sondern vielmehr aus Herausforderungen in deren praktischen Anwendung und Umsetzung. Um die Ziele der Kreislaufwirtschaft zu erreichen, bedarf es klarer, verständlicher Anwendungsvorgaben und praxisorientierter Prozesse. Der vorliegende Beitrag legt den Fokus auf die abfallrechtlichen Aspekte der Verwertung medizinischer Einwegprodukte. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass auch andere rechtliche und regulatorische Perspektiven in den Blick genommen werden sollten. So etwa die Vorgaben der Medizinprodukteverordnung, insbesondere Art. 17 MDR zu Einmalprodukten, insoweit diese möglicherweise aufbereitet werden sollen. Diese weiteren rechtlichen Fragestellungen werden im Rahmen des weiteren Verlaufs des Forschungsprojekts MEiK – Medizinische Einmalgebrauchsprodukte in der Kreislaufwirtschaft[12] vom vunk-Institut für Verbraucherschutz und nachhaltigen Konsum an der Hochschule Pforzheim derzeit noch vertieft bearbeitet.

Literatur/Quellen

Beckmann, Martin / Durner, Wolfgang / Mann, Thomas / Röckinghausen, Marc, Umweltrecht, Kommentar, 108. EL. München 2025, zitiert als: Bearbeiter, in: Landmann/Rohmer, Umweltrecht.

HS PF (Hrsg.), o.A., MEiK – Medizinische Einmalgebrauchsprodukte in der Kreislaufwirtschaft, online abrufbar unter: https://www.hs-pforzheim.de/vunk/meik, zuletzt abgerufen am 05.01.2026.

LAGA (Hrsg.), o.A., Mitteilung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 18: Vollzugshilfe zur Einrichtung von Abfällen aus Einrichtungen des Gesundheitsdienstes, Überarbeitung: Stand Juni 2021, online abrufbar unter: https://www.laga-online.de/documents/laga-m-18_stand_2021-06-23_1626849905.pdf, zuletzt abgerufen am 05.01.2026.

12 HS PF (Hrsg.), o.A., MEiK – Medizinische Einmalgebrauchsprodukte in der Kreislaufwirtschaft.

Kontakt

Annalena Secci, LL.M., wissenschaftliche Mitarbeiterin
vunk-Institut für Verbraucherforschung und nachhaltigen Konsum an der Hochschule Pforzheim
Tel.-Nr.: +49 7231 / 28-6493
E-Mail: annalena.secci@hs-pforzheim.de
Homepage: https://www.hs-pforzheim.de/vunk

Maik Siegel

Anaerobe Abwasserbehandlung mithilfe des phototrophen Bakteriums *Rhodopseudomonas palustris*

***Abstract**: In herkömmlichen aeroben Behandlungsanlagen wird viel Energie für die Belüftung und die Handhabung großer Mengen aktiver Biomasse verbraucht, während Treibhausgase direkt in die Umwelt abgegeben werden. Die anaerobe Abwasserbehandlung hingegen ist unabhängig von aufwendiger Belüftung, erzeugt wenig aktive Biomasse und hat das Potenzial, die Dekontamination von Abwasser mit der kontrollierten Erzeugung von Biogas zu kombinieren. Die meisten anaeroben Behandlungsverfahren sind jedoch nicht in der Lage, eine ausreichende Schadstoffentfernung zu erreichen, und erfordern eine aerobe Nachbehandlung in konventionellen Behandlungssystemen. Schnell wachsende phototrophe Organismen wie Rhodopseudomonas palustris können prinzipiell unter anaeroben, beleuchteten Bedingungen die Nährstoffentfernung in einem rein anaeroben Abwasserbehandlungssystem ermöglichen. In dieser Arbeit wurde zunächst ein kontinuierlich betriebener Festbett-Reaktor als Fermenter mit ausgefaultem Klärschlamm und synthetischem Abwasser angefahren. Daraufhin wurde durch Beimpfen des Reaktors mit R. palustris Reinkultur die Anreicherung des Bakteriums unter phototrophen anaeroben Bedingungen untersucht. Gleichzeitig wurden die Raten der CSB- und NH4-Entfrachtung des synthetischen Abwassers sowie die täglichen Biogasparameter bestimmt und der Einfluss des R. palustris-Inokulums im Vergleich zum reinen Klärschlamm-Mikrobiom beurteilt. Die Biogas-Bildung sowie die Methan-Ausbeute wurden durch die Co-Kultur von R. palustris nicht beeinflusst. Die CSB- und NH4-Abbauraten wurden durch die Anreicherung von R. palustris leicht erhöht. Die metagenomische Analyse des Fermenter-Mikrobioms zeigte eine deutliche Anreicherung auf dem Trägermaterial des Festbetts sowohl von R. palustris als auch methanogenen Archaeen. Die Endkonzentrationen für CSB und NH4-N lagen unter den untersuchten Bedingungen jedoch oberhalb der gesetzlichen Einleitgrenzwerte.*

1 Einleitung

Obwohl die Vergärung von Klärschlamm wertvolles Biogas erzeugt, bleibt die Schlammbehandlung ein erhebliches betriebliches und wirtschaftliches Problem für konventionelle Kläranlagen (Gebreeyessus & Jenicek, 2016). Daher ist die anaerobe Behandlung von Abwasser wünschenswert, da dadurch mehrere kostspielige Schritte umgangen werden können (Aiyuk et al., 2006). Die anaerobe Abwasserbehandlung bietet mehrere Vorteile, wie z. B. eine geringere Schlammproduktion, niedrigere Betriebskosten sowie eine flexible und einfache Installation, hat jedoch den großen Nachteil, dass anaerobe Abwasserbehandlungssysteme mit den derzeit verfügbaren Verfahren eine konventionelle Nachbehandlung erfordern, um die gesetzlichen Einleitungsstandards zu erfüllen, da sie nicht effektiv genug sind, um alle bedenklichen Schadstoffe in zufriedenstellendem Maße zu entfernen (Seghezzo et al., 1998), (Sikosana et al., 2019). Insbesondere Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor werden in rein anaeroben Systemen nicht ausreichend aus dem Abwasser entfernt, da sie hauptsächlich durch assimilatives Wachstum aufgenommen werden, das bei den anaeroben Mikroorganismen, die Biogas produzieren, nur langsam voranschreitet. Daher bietet die Nutzung schnell wachsender phototropher Organismen unter anaeroben, beleuchteten Bedingungen die Möglichkeit, Nährstoffe in die Biomasse phototropher Bakterien zu überführen und damit die Nährstoffent-

fernung in einem rein anaeroben Abwasserbehandlungssystem zu ermöglichen. Der entstehende Schlamm kann ebenfalls vergoren werden, um Nährstoffe und Energie in Form von Biogas zurückzugewinnen (Hülsen et al., 2014). Von diesen phototrophen Organismen, die natürlicherweise in allen Stufen der Kläranlage vorkommen, stellt die Gattung *Rhodopseudomonas* die Mehrheit dar (Siefert et al., 1978). *Rhodopseudomonas palustris* verfügt über einen vielfältigen und flexiblen Stoffwechsel, was es für den Abbau komplexer organischer Stoffe interessant macht (Brown et al., 2022).

Ziel dieser Arbeit war es, den potenziellen Nutzen von *R. palustris* im Zusammenhang mit der anaeroben Abwasserbehandlung zur Entfernung von organischem Kohlenstoff sowie Nährstoffen aus synthetischem Abwasser zu untersuchen. Weiter sollte der Einfluss auf die Biogasproduktion in einem kombinierten anaeroben Vergärungsprozess untersucht werden. Weiterhin wurde die mögliche Konkurrenz mit den für den Vergärungsprozess essenziellen methanogenen Archaeen durch metagenomische Analysen des Reaktor-Mikrobioms untersucht.

2 Methodik

2.1 Abwasserbehandlung und Biogaserzeugung im anaeroben Festbett-Reaktor mithilfe *R. palustris* unter konstanter LED-Beleuchtung

Ein 20 L Aufstrom-Reaktor mit 5 L eingesetztem Festbett wurde als Fermenter unter mesophilen Bedingungen (35°C) betrieben. Die Anlaufphase mit ausgefaultem Klärschlamm und abgedunkeltem Reaktor wurde für 56 Tage betrieben (Tag 0-56). Die Versuchsphase nach Inokulation mit der *R. palustris* Reinkultur und konstanter LED-Beleuchtung belief sich auf die 33 darauffolgenden Tage (Tag 56-89). Es wurden jeweils 2 LED-Leuchten mit blauem Licht (ca. 450 nm) und zwei Nahinfrarot (NIR)-Leuchten (805 nm) verwendet. Der Reaktor wurde mit täglichen Raumbelastungen von 2 g CSB und 60 mg NH4-N pro Liter gefüttert. Biogasparameter wurden konstant überwacht, während alle sieben Tage eine chemische Analyse des Reaktor-Ablaufs unternommen wurde, um die Abbauraten zu bestimmen. Die Verweilzeit betrug 11 Tage.

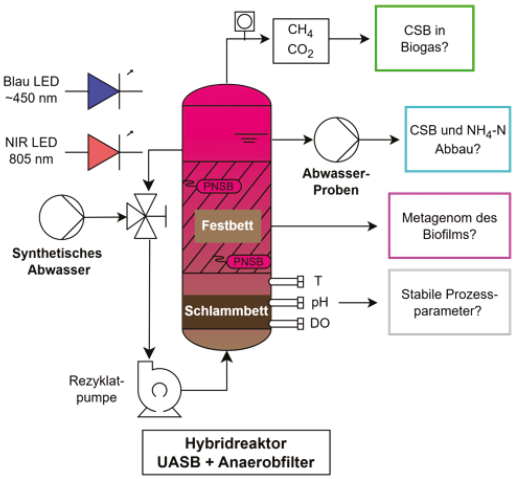


Abb. 1: Reaktor-Konzept

2.2 Metagenomische Analyse des Reaktor-Mikrobioms

Jeweils zu Beginn der Anlauf- und Versuchsphase sowie zum Ende der Versuchsphase wurden Proben des Reaktorinhalts und vom Trägermaterial des Festbetts entnommen, für eine folgende DNA-Extraktion. Die extrahierte DNA wurde für die metagenomische Sequenzierung des 16 S rRNA-Gens verwendet, um das Reaktor-Mikrobiom zu bestimmen.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Abwasserbehandlung

Die Abbauraten für CSB lagen in der Anlaufphase bei 90-95 %, in der Versuchsphase wurde ein minimaler Anstieg um 1-2% Prozentpunkte auf ca. 97 % beobachet. Die NH_4-N Abbauraten lagen in der Anlaufphase zwischen 26-48 % und erreichten während der Testphase Werte zwischen 46-66 %. Beide Endkonzentrationen lagen jedoch in den wöchentlichen Proben oberhalb der gesetzlichen Einleitgrenzwerte von 100-200 mg/L CSB und 20-50 mg/L NH_4-N, die zumindest eine anaerobe Vorbehandlung erfüllen sollte (AbwV, 2004).

Tab. 1: Ergebnisse der Analytik des Reaktor-Ablaufs

Ergebnisse	Anlaufphase (Tag 0-56)	Versuchsphase (Tag 56-89)
Abbau CSB	90-95 %	93-97 %
Abbau NH_4-N	26-48 %	46-66 %
Biogasproduktion	12-13 L/Tag, 55% CH_4	12-13 L/Tag, 55% CH_4

Die Biogasproduktion wurde durch die Inokulation und Beleuchtung in der Versuchsphase im Vergleich zur Anlaufphase nicht beeinflusst. Das legt nahe, dass *R. palustris* trotz seiner Eigenschaft organische Säuren und H_2 zu metabolisieren keine Verringerung der Methanisierung im gemischten Fermenter bewirkt haben dürfte.

3.2 Ergebnisse der Sequenzierung

Die metagenomische Analyse des Reaktor-Mikrobioms hat gezeigt, dass *R. palustris* zu Beginn der Versuchsphase mit ca. 0,13 % relativer Häufigkeit vertreten war und zum Ende der Versuchsphase bis zu 5,01% relative Häufigkeit auf dem LED-beleuchteten Festbett angereichert wurde.

Die Innenseite des Festbetts wurde weniger beleuchtet und die Anreicherung von *R. palustris* erreichte lediglich 0,19 % relative Häufigkeit. Die für den Vergärungsprozess essenziellen Methanogenen der Gattung *Methanosaeta* haben sowohl auf der Licht-abgewandten Innenseite, als auch der beleuchteten Außenseite des Festbetts von anfänglich 0,22 % im Klärschlamm zu 9,10 - 9,15 % relative Häufigkeit zugenommen. Das legt nahe, dass die Anreicherung der Methanogenen in Anwesenheit von *R. palustris* nicht beeinträchtigt wurde.

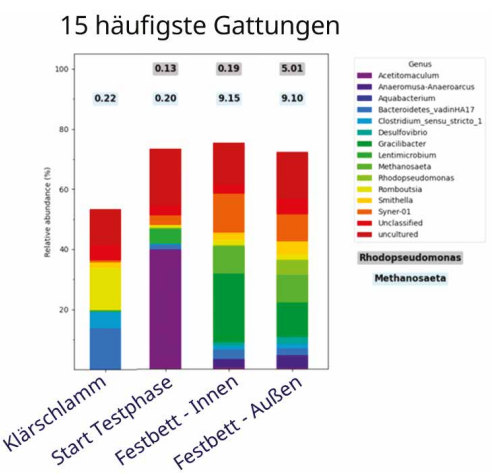


Abb. 2: Reaktor-Mikrobiom; 15 häufigste Gattungen dargestellt

4 Ausblick

Die Ergebnisse unterstützen eine weitere Untersuchung zur kombinierten Kultivierung von phototrophen Bakterien in anaeroben Reaktoren zur Abwasserbehandlung. Allerdings müssen einige Optimierungen zur Beleuchtung im Reaktor-Innenraum durch beispielsweise integrierte Seitenlichtfasern ergänzt werden, um das Wachstum der phototrophen Bakterien zu stärken. Außerdem birgt die Fähigkeit zur Kultivierung von *R. palustris* in Biogas-Systemen auch Potenzial sich den komplexen Stoffwechsel von *R. palustris* für sonst schwer abbaubare Substrate zu Nutze zu machen.

Danksagung

Die Ergebnisse entstanden im Rahmen meiner Masterarbeit am Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft für das Projekt „ALENO“, welches durch das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) gefördert wurde.

Literatur/Quellen

Aiyuk, S., Forrez, I., Lieven, D. K., Van Haandel, A., & Verstraete, W. (2006). Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates—A review. Bioresource Technology, 97(17), 2225–2241.

Brown, B., Wilkins, M., & Saha, R. (2022). Rhodopseudomonas palustris: A biotechnology chassis. Biotechnology Advances, 60, 108001.

Bundesministerium der Justiz Deutschland. (2004). Verordnung ¨uber Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV). Bundesgesetzblatt, BGBl Part 1(28), 1108.

Gebreeyessus, G., & Jenicek, P. (2016). Thermophilic versus Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge: A Comparative Review. Bioengineering, 3(2), 15.183.

Hülsen, T., Batstone, D. J., & Keller, J. (2014). Phototrophic bacteria for nutrient recovery from domestic wastewater. Water Research, 50, 18–26.

Seghezzo, L., Zeeman, G., Van Lier, J. B., Hamelers, H., & Lettinga, G. (1998). A review: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. Bioresource Technology, 65(3), 175–190.

Siefert, E., Irgens, R. L., & Pfennig, N. (1978). Phototrophic purple and green bacteria in a sewage treatment plant. Appl Environ Microbiol, 35(1), 38–44.

Sikosana, M. L., Sikhwivhilu, K., Moutloali, R., & Madyira, D. M. (2019). Municipal wastewater treatment technologies: A review. Procedia Manufacturing, 35, 1018–1024.

Kontakt
M.Sc., Maik Siegel, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Technische Universität Dresden / Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft
Forum für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V.
Tel.-Nr.: +49 176 73 555 152
E-Mail: maik.siegel@mailbox.tu-dresden.de
Homepage: https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/iak/forum

Souphaphone Soudachanh, Stefan Salhofer

Transitioning Plastic Waste Management in Laos: Circular Solutions and Environmental Implications

***Abstract**: Plastic leakage and inadequate waste management pose growing environmental challenges in Laos. This study quantifies plastic packaging flows in Laos using a trade-based material flow analysis and assesses the environmental implications of alternative waste management strategies through a simplified life cycle assessment focusing on global warming potential. Plastic packaging consumption in 2023 is estimated at approximately 75 kt, equivalent to 10 kg/cap/year. Four scenarios are evaluated: S1 Business as usual, S2 ban on open burning and open dumping, S3 NPAP 2023, and S4 Mandatory Extended Producer Responsibility (EPR). Results show that S1 generates 164,790 t CO_2-eq (21.5 kg CO_2-eq per capita), while S2 reduces emissions by 31%. S3 with voluntary EPR achieves a 40% reduction, whereas mandatory EPR delivers the largest reduction (63%) compared to S1. The findings underscore the importance of regulatory enforcement, upstream plastic reduction and infrastructure development to enable effective circular plastic waste management in Laos.*

1 Introduction

Plastic leakage into the aquatic environment has emerged as a major global environmental concern. It is estimated that between 4.8 and 12.7 million tonnes (Mt) of plastic entered the ocean in 2010 (Jambeck et al., 2015), while approximately 19-23 Mt of plastic is currently leaked annually into rivers, lakes and the ocean globally (Borrelle et al., 2020). More recent estimates by (Meijer et al., 2021) indicate that over 1000 rivers account for nearly 80% of global riverine plastic pollution, with a significant proportion located in the Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) region. Despite rapid economic growth and rising plastic consumption, waste management systems across ASEAN member states remain at early or transitional stages of development. These systems are often characterised by inadequate collection coverage, limited sanitary capacity, minimal waste-to-energy (WtE) infrastructure, and a heavy reliance on informal recycling sectors (Soudachanh et al., 2024).

In response, the European Union's Plastic strategy under the Circular Economy (CE) Action Plan has become a global reference for plastic life-cycle interventions, including eco-design requirements, recycled-content mandates, and an extended producer responsibility (EPR) scheme. EPR plays a critical role in shifting responsibility for post-consumer plastic waste to producers, thereby incentivising improvements in waste collection, efficient recycling, and product design. Inspired by this approach, several ASEAN countries, such as Indonesia, the Philippines, Singapore and Vietnam, are advancing in implementing EPR (Kojima & Suwarno, 2025).

In contrast, Laos remains at an early stage of CE and EPR implementation. Although plastic waste has recently become a national development priority, attracting increased donor and development partner support, policy design and implementation remain constrained by limited data on plastic consumption. Waste flows remain inconsistent and scarce, posing challenges for evidence-based policy aligned with CE principles. Furthermore, a voluntary EPR framework was only recently outlined in the National Plastic Action Plan (NPAP). To address this gap, this study estimates plastic packaging flows in Laos using international trade data and evaluates their environmental implications under four waste management scenarios. By

quantifying material flows and assessing the potential impacts of integrating CE measures, particularly EPR, this paper aims to provide a data-driven foundation to support the development of effective plastic waste management policies in Laos.

2 Methodology

2.1 Plastic and Plastic Packaging Flows

Plastic flows in Laos were quantified using a trade-based material flow approach, based on United Nations Comtrade import-export data for the period 2023, under selected HS codes, focusing on plastics (chapter 39) and packaging bags (HS 630533). This trade-based method is common in global and regional waste flow studies (Baldé, 2022; Salhofer et al., 2023; UNCTAD, 2020) and calculated using the following formula:

Apparent consumption: Domestic production + Imports – Exports.

Plastic flows were first assigned by product groups namely 1) Plastics in primary forms; 2) Intermediate forms of plastic; 3) Final manufactured of plastics goods; 4) Plastic waste and 5) Plastic Packaging. HS codes were further sorted by polymer type (LDPE, HDPE, PP, PET, PS, PVC, others and not specify) by its description and applied global averages to those unspecified (Plastic Europe, 2022).

Plastic packaging was selected for detailed analysis because of its short lifespan (<1 year), enabling apparent consumption to approximate annual plastic packaging waste generation. Therefore, plastic packaging flows were identified using the relevant HS codes, with additional allocations from primary plastics based on global end-use shares. Additionally, the polymer composition of unspecified packaging products was estimated using literature-based assumptions.

2.2 Simplified Life Cycle Assessment

The scenario modelling for this study applies a simplified life cycle assessment to quantify and compare the environmental implications of plastic packaging waste management in Laos, with the aim of informing policy discussion, using Global Warming Potential (GWP), expressed as kg CO2-eq. Emission factors for plastic production and treatment were sourced from the Ecoinvent database and the US EPA Waste Reduction Model v18. When plastic-specific polymer values were unavailable, mixed plastic GWP values were used.

The functional unit is defined as 1 kg of plastic packaging waste generated in Laos and managed under specific scenarios. The waste management scenarios considered include open burning, open dumping, landfilling and recycling, reflecting the most recent practices and policy-relevant practices in Laos. Transport-related emissions are excluded from the system boundary due to data limitations.

Therefore, the scenarios are designed as follows:

- S1 Business as Usual reflects the current MSW management in Vientiane Capital, Laos (Noudeng et al., 2024). Waste treatment shares comprise open burning (27%), open dumping (27%), landfilling (38%), and recycling (8%), representing existing disposal behaviour and limited formal recycling capacity.
- S2 Ban on open burning (OB) and open dumping (OD), assumed waste collection service and regulatory prohibition of inadequate disposal practices. Therefore, open burning and open dumping decreased to 5% each, with most diverted waste assumed to be sent to landfill (75%), and a modest increase in recycling (15%).

- S3 NPAP 2030 reflects on the objectives of the National Plastics Action Plan (NPAP 2024-2030) (MONRE, 2024). In addition to improved waste management, this scenario incorporates upstream plastic reduction, reflecting restrictions on selected single-use plastic products, and a voluntary Extended Producer Responsibility (EPR) initiative. Under this scenario, a 31.6% reduction in plastic bags (HS code 392 321), based on empirical evidence from the EU plastic bag directive, is applied. Open burning and dumping are each limited to 5%, landfilling increases to 70%, and recycling increases to 20%.
- S4 Mandatory EPR represents the implementation of mandatory EPR for plastic packaging. As in S3, 31.6% upstream reduction is applied, as prevention incentives embedded in EPR schemes. For the remaining waste, open burning and open dumping are eliminated. Recycling increases to 40% aligned with the average plastic packaging recycling rate observed in EU member states following EPR implementation (Eurostat, 2021) and the remaining 60% of waste is landfilled.

3 Result

3.1 Plastic and plastic packaging flows

Figure 1 represents the plastic consumption in Laos (2023) by product group and polymer type. Plastic in primary forms constituted the largest share of plastic placed on the market, totalling 98 kt, reflecting the strong reliance on imported resins for domestic conversion and manufacturing. This was followed by intermediate forms of plastics (44 kt), net packaging (without primary plastic allocation) at 31 kt and final manufactured plastic goods at 15 kt. Approximately 118 ktof plastic waste remained in the country in the same year.

The trade data analysis shows that a substantial proportion of plastics were classified as “other polymers” for 98kt. Among the identified types, PVC accounted for the largest share (19 kt), followed by PP (15 kt), LDPE (13 kt), PE, PS, and HDPE (around 11 kt each), while PET represented the smallest share at 8.5 kt.

The plastic packaging quantities shown in Fig. 1 represent net packaging flows identified directly from relevant HS Codes and account for 17% of total apparent plastic consumption. To capture the full picture of plastic packaging, 44% of primary plastics were also allocated to packaging (Plastic Europe, 2020), bringing the 2023 total packaging to 75kt (10kg/cap/year), or roughly 40% of overall consumption. At the polymer level, LDPE dominated at 19.7 kt, followed by PP (15.8kt), PET (12.6kt), PE (8.1kt) and others (7.5kt).

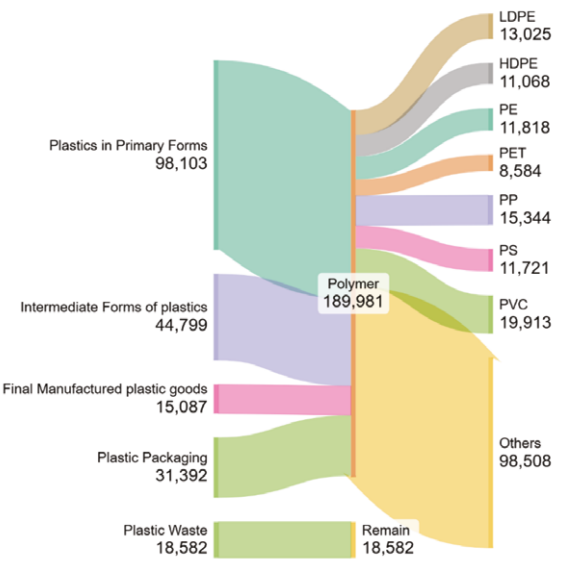


Figure 1: Apparent consumption of plastics by group and polymer types (t/year) in Laos for 2023.

3.2 Environmental Implications

Figure 2 compares the GWP results of four plastic packaging waste management scenarios. Under S1 Business as Usual, current practices, dominated by open burning, open dumping, and landfilling, generate the highest emissions (164,790 t CO_2-eq, 21.5 kg CO_2-eq per capita). Eliminating open burning and dumping in S2 reduces emissions by 31% (14.9 kg CO_2-eq per capita), but increases landfilling, which limits material recovery. The S3 NPAP 2030, which introduces upstream reduction and voluntary EPR, achieved a 40% reduction (12.9 kg CO_2-eq per capita), with only marginal improvements over S2. S4 Mandatory EPR delivers the largest reduction, at 63% (8 kg CO_2-eq per capita), compared to S1. However, even under S4, 60% of plastic packaging waste is landfilled, highlighting the need for complementary measures beyond EPR.

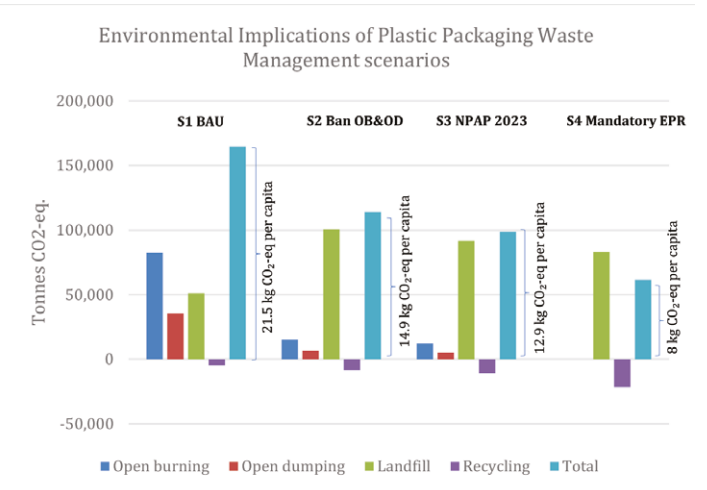


Figure 2 Environmental Implications of Plastic Packaging Waste Management Scenarios

These findings highlight infrastructure bottlenecks and the need for upstream plastic-reduction measures, including product design and a reuse system, to reduce packaging waste at the source. WtE and RDF may address non-recyclable fractions but should be treated as residual options, implemented only after prevention and recycling, and under strict environmental safeguards. While voluntary EPR provides an important transition pathway, mandatory EPR is necessary to achieve consistent enforcement and meaningful system-wide impacts.

Literatur/Quellen

Baldé, K. (2022). *Methodology and practical guidance to estimate plastic waste generation* (Tackling Plastic Pollution Through Strengthened Implementation of the BRS Conventions, Issue.

Eurostat. (2021). *Recycling rate of plastic packaging waste in EU 2021*

Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Marine Pollution*, *347*(6223).

Kojima, M., & Suwarno, A. S. (2025). Extended Producer Responsibility on Plastics in Southeast Asian Countries.

Meijer, L. J. J., van Emmerik, T., van der Ent, R., Schmidt, C., & Lebreton, L. (2021). More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Sci Adv*, *7*(18). https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803

Noudeng, V., Pheakdey, D. V., Minh, T. T. N., & Xuan, T. D. (2024). Municipal Solid Waste Management in Laos: Comparative Analysis of Environmental Impact, Practices, and Technologies with ASEAN Regions and Japan. *Environments*, *11*(8). https://doi.org/10.3390/environments11080170

Plastic Europe. (2022). Plastic the facts 2022.

Salhofer, S., Soudachanh, S., Jandric, A., Darasouk, A., Chansomphou, V., & Latthachak, P. (2023). *E-waste Management in Laos: Country Report*.

Soudachanh, S., Campitelli, A., & Salhofer, S. (2024). Identifying Priorities for the Development of Waste Management Systems in ASEAN Cities. *Waste*, *2*(1), 102-121. https://doi.org/10.3390/waste2010006

UNCTAD. (2020). Global trade in plastics: insights from the first life-cycle trade database.

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

Lina Staffa, Sabrina Scheele, Lukas Benecke, Chokri Cherif, Roman Maletz, Christian Prescher, Tobias Hatzfeld, Lilian Krause, Ralf Bosse, Stefan Kreuzer, Dominik Segiet, Alexander Wiefel, Niklas Bäumer, Steffen Müller-Probandt

Zirkuläre nachhaltige technische Textilien aus Polypropylen für den Transportbereich (zPP)

***Abstract**: Technische Textilien aus Polypropylen (PP) werden derzeit überwiegend thermisch verwertet. Ansätze für die stoffliche Verwertung sind kaum etabliert. Das Projektteam von zPP hat sich zum Ziel gesetzt, innovative, zirkuläre Lösungen für technische PP-Textilien im Transportsektor zu entwickeln. Der Fokus liegt auf der Entwicklung neuer Technologien und eines zirkulären Designs. Durch Einstoffsysteme, minimierte Materialkomplexität und die Berücksichtigung von Recyclingoptionen soll eine ressourcenschonende Produktion ermöglicht werden. Zudem soll die technische Machbarkeit einer hochwertigen Kreislaufführung des Rohstoffs über mehrere Lebenszyklen nachgewiesen werden und neue Vliesstoffe auf Basis des rezyklierten PP mit minimaler Materialdegradation der mechanischen Eigenschaften realisiert werden. Ein digitales Prozessmodell wird eingesetzt, um den Lebenszyklus der Textilien entlang der gesamten Wertschöpfungskette abzubilden. Ergänzend liefern ökonomische und ökologische Analysen eine fundierte Bewertung der Nachhaltigkeit der entwickelten Produkte. Die anschließende Skalierung der erarbeiteten Prozesse zur Herstellung kreislauffähiger PP-Textilien leistet einen Beitrag zur Etablierung einer zirkulären Textilindustrie.*

1 Einleitung

Technische Textilien aus Polypropylen (PP) finden Anwendung in zahlreichen Industriebereichen wie der Automobilindustrie, dem Bauwesen und der Medizintechnik (Kunststoffe, o.J.). Weltweit werden jährlich rund 3 Mio. t PP-Fasern produziert, wovon etwa 92 % energetisch verwertet oder deponiert werden. Lediglich 8 % werden stofflich recycelt (zPP, o.J.).

Die geringe Wiederverwertungsquote verstärkt ökologische Belastungen wie Ressourcenknappheit, Treibhausgasemissionen und Mikroplastikfreisetzung sowie ökonomische Herausforderungen wie Lieferketteninstabilität und Rohstoffverknappung (EEA, 2019). Fehlende Sammelinfrastrukturen sowie unzureichende Designstrategien zur Wiederverwendung verhindern bislang geschlossene Stoffkreisläufe.

Das Projekt zPP adressiert diese Herausforderungen durch die Entwicklung kreislauffähiger PP-Textilien für den Transportbereich am Beispiel von Carcovern für den Neuwagentransport (Abb. 1). Exemplarisch wird der Produktlebenszyklus von der Entwicklung über die Nutzung hin zu Rückführung und Verwertung ganzheitlich betrachtet. Hierfür arbeitet ein Projektkonsortium mit Experten aus den Bereichen Faser- und Textiltechnologie, Recycling und (digitaler) Prozessoptimierung zusammen (BMFTR, 2025).

Abb. 1: Fullbody-Carcover [ITM, 2025]

Die gewonnenen Ergebnisse sollen auf weitere PP-Textilien sowie perspektivisch auf andere Polymersysteme übertragbar sein, um langfristig zur Etablierung einer zirkulären Textilwirtschaft beizutragen (BMFTR, 2025).

2 Methodik

Die Entwicklung zirkulärer technischer PP-Textilien erfolgt, wie in Abb. 2 dargestellt, über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg. Als exemplarischer Anwendungsfall dienen Carcover. Hierbei handelt es sich um PP-Vliesabdeckungen, die zum Schutz von Neuwagen während Transport und Logistikprozessen eingesetzt werden.

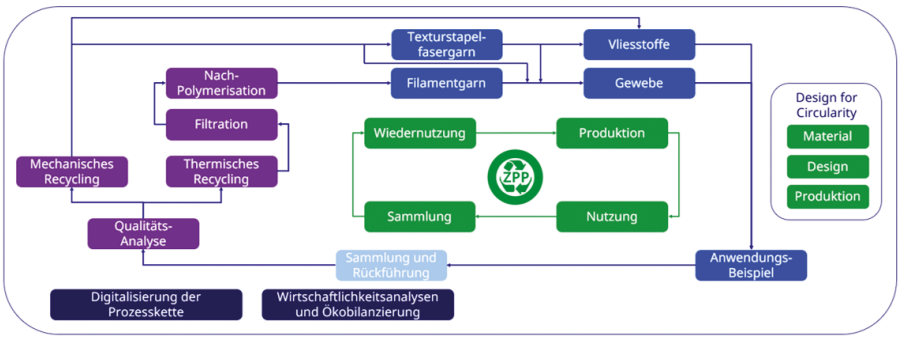


Abb. 2: Entwicklung zirkulärer technischer PP-Textilien über den gesamten Produktlebenszyklus [Staffa nach ITM, 2025]

Zentraler Aspekt ist der Aufbau eines effizienten Sammel- und Rückführungssystems, das die bedarfsgerechte Verfügbarkeit gebrauchter PP-Textilien (z.B. Carcover) sicherstellt und die Grundlage für einen geschlossenen Materialkreislauf in der Praxis schafft. Die Konzeptionierung dieses Systems erfolgt in strukturiertem Austausch mit Akteuren entlang des gesamten Produktlebenszyklus.

Auf Basis einer systematischen Qualitätsanalyse unter Berücksichtigung der stofflichen Zusammensetzung sowie der Materialeigenschaften erfolgt die Charakterisierung des erfassten Stoffstroms.

Die generierten Erkenntnisse dienen der Prozess- und Technologieentwicklung von Verfahren zur Herstellung qualitativ hochwertigen PP-Rezyklats (zPP) sowie von spezialisierten Spinntechnologien zur Weiterverarbeitung des PP-Rezyklats zu zPP-Fasern.

Die Entwicklung modifizierter Verfahren soll die Verarbeitung zu zPP-Geweben ermöglichen.

Parallel wird die Herstellung hochwertiger zPP-Vliesstoffe verfolgt, um die Diversität der Anwendungsbeispiele zu erweitern.

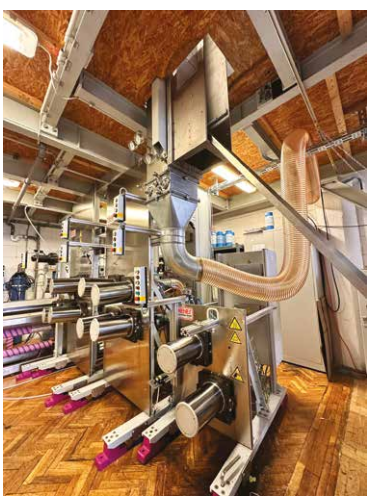


Abb. 3: Schmelzspinnanlage der Firma DIENES Apparatebau GmbH [ITM, 2025]

Bei der Gestaltung neuer Produkte aus den zPP-Geweben oder zPP-Vliesen wird dem Prinzip des *Design4Circularity* folgend bei Materialauswahl, Produktion und Design die Kreislaufführung der Produkte berücksichtigt. Der Fokus des zirkulären Designs liegt auf Einstofflösungen und minimierter Materialkomplexität.

Ein digitales Framework zur Erfassung und Analyse von Prozess-, Material- und Produktdaten soll eine datenbasierte Prozessoptimierung ermöglichen.

Basierend auf Ökobilanzierung und Materialflusskostenrechnung erfolgt eine ökonomisch-ökologische Nachhaltigkeitsbewertung der gesamten zPP-Prozesskette. Die ökologische Betrachtung fokussiert die Ressourcenbewertung und die Identifikation zentraler Umweltressourcen.

Die entwickelten Recycling- und Herstellungsprozesse werden anschließend für den industriellen Maßstab skaliert, um eine effiziente Kreislaufführung in der Praxis sicherzustellen.

3 Zwischenergebnisse und Ausblick

Bislang fehlt es an etablierten flächendeckenden Sammel- und Rücknahmesystemen für PP-Produkte. In der Praxis werden die Carcover überwiegend über den Gewerbeabfall entsorgt und anschließend einer thermischen Verwertung zugeführt. Bestehende Sammel- und Verwertungsaktivitäten beschränken sich auf heterogen gestaltete Einzellösungen.

Die dezentrale Struktur des Automobilhandels erschwert die Etablierung eines übergreifenden Sammel- und Rücknahmesystems und erfordert stattdessen anwendungsfallspezifische Lösungen. Das Projekt zPP erarbeitet ein beispielhaftes Rücknahmesystem, das als Vorlage für weitere Anwendungsfälle in der Automobilindustrie sowie in anderen Industriezweigen dienen soll.

Die Untersuchung der stofflichen Zusammensetzung der Carcover zeigte abhängig von der Art des Covers zahlreiche Zusatzkomponenten wie Sichtfenster, Reißverschlüsse und Gummizüge aus anderen Materialien sowie Verunreinigungen, unter anderem mit Polyethylen (PE).

Nach manueller Separation der Zusatzkomponenten, Verpressen des PP-Vlieses zu Platten, Zerkleinerung mittels Schneidmühle und anschließender Regranulierung konnten erste Cover erfolgreich rezykliert werden. Mit dem hergestellten zPP-Granulat wurden erste Schmelzspinnversuche erfolgreich durchgeführt. Weiterentwicklungen des Prozesses hinsichtlich der Vermeidung von Schwankungen der Filamentdurchmesser, beispielsweise durch eine nachgelagerte Verstreckung, oder von thermooxidativer Degradation des Materials im Prozess werden aktuell untersucht.

Zukünftige Arbeiten sollen sich auf die Verbesserung der Faser- und Vliesqualität, insbesondere hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, die Etablierung effizienter Compoundierverfahren sowie die Ausweitung der Anwendungstests konzentrieren.

Die vorliegenden Erkenntnisse zeigen, dass die stoffliche Verwertung von Carcovern und anderen technischen PP-Textilien grundsätzlich möglich ist. Zugleich wird der Bedarf weiterer Untersuchungen zur präzisen Bestimmung der Materialzusammensetzung sowie zur qualitativen Steigerung der Aufbereitungs- und Verarbeitungsergebnisse deutlich.

Entscheidend ist dabei die genaue Materialcharakterisierung vor dem Hintergrund der PE-Verunreinigungen, die Verbesserung der Prozessstabilität beim Spinnen und der anschließenden Verfestigung, sowie die Maximierung der mechanischen Faser- und Vlieseigenschaften.

Insgesamt wird deutlich, dass eine erfolgreiche zirkuläre Nutzung technischer Textilien nur durch eine enge Verzahnung von *Design4Circularity*, detaillierter Materialanalyse und systemischer Betrachtung erreicht werden kann.

Danksagung

Das Projekt *zPP* wird im Rahmen des BMFTR-Forschungskonzeptes „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ mit dem Förderkennzeichen 033R402A gefördert.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
FONA Forschung für Nachhaltigkeit
zirkuläre Textilien
Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Zirkuläre nachhaltige Textilien: Entwicklung ganzheitlicher, praxisreifer Lösungen zur Kreislaufschließung in der Textilbranche

Projektkonsortium:
Sabrina Scheele, Lukas Benecke, Chokri Cherif: Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik ITM, TU Dresden
Lina Staffa, Roman Maletz: Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft IAK, TU Dresden
Dominik Segiet: Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH
Steffen Müller-Probandt: Dienes Apparatebau GmbH
Stefan Kreuzer: Sandler AG
Lilian Krause, Ralf Bosse: Schmitz Textiles GmbH + Co. KG
Alexander Wiefel, Niklas Bäumer: HolyPoly GmbH
Christian Prescher: Strucnamics Engineering GmbH
Tobias Hatzfeld: United Nations University – Institute for Integrated Management of Material Fluxes and of Resources UNU-FLORES

Quellen

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt BMFTR (2025): zPP: Zirkuläre, nachhaltige technische Textilien aus Polypropylen für den Transportbereich

European Environment Agency EEA (2019): Textiles in Europe’s circular economy, https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/textiles-in-europes-circular-economy (Abgerufen: 10.05.2024)

Kunststoffe (o.J.): Polypropylen (PP), https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polypropylen-pp-264406 (Abgerufen: 22.12.2025)

zPP (o.J.): Zirkuläre nachhaltige technische Textilien aus Polypropylen für den Transportbereich https://zirkulaere-textilien.de/zPP (Abgerufen am 22.12.2025)

Kontakt

M. Sc., Lina Staffa, wissenschaftliche Mitarbeiterin
Technische Universität Dresden, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft
Tel.-Nr.: +49 351 463 44137
E-Mail: lina.staffa@tu-dresden.de
Homepage: https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/iak/forschung/forschungsprojekte/zpp

Paul Steiner, Jörg Woidasky

End-of-life Wind turbine blade waste quantification for Europe 2025–2040

***Abstract**: Wind energy is central in achieving the European Union's climate neutrality in 2050. With the continued expansion of wind power capacity, the amount of wind turbines reaching their end of life will increase substantially in the coming decades. In particular, wind turbine blades made from glass and carbon fiber reinforced plastics (GFRP and CFRP) pose a significant recycling challenge, as sustainable and industrially established recycling solutions are still lacking. The objective of this study is to develop a robust forecast of wind turbine blade waste generation in Europe up to 2040. As part of the European research project REWIND, a dynamic lifetime approach is applied that accounts for increasing service lives of modern wind turbines, in contrast to previous studies assuming fixed operational lifetimes. The model is based on comprehensive turbine data from the German "Marktstammdatenregister" and the database "The Wind Power", complemented by literature data and expert input from industry. Key parameters include commissioning year, installed capacity, and the distinction between onshore and offshore turbines. The results show a temporal shift of waste generation towards later years, particularly after 2030. Glass fibers dominate the overall material flow, while the share of carbon fibers will increase significantly due to the growing deployment of larger turbine types. The findings underline the urgent need to advance recycling and recovery technologies for GFRP and CFRP materials in order to manage future waste streams effectively and support the transition towards a circular wind energy sector in Europe.*

1 Introduction

Wind energy is a key instrument for reducing greenhouse gas emissions from electricity generation and for achieving the European Union's target of climate neutrality by 2050 (European Commission, 2023). Supported by policy initiatives such as the European Green Deal and REPowerEU, wind power capacity in Europe has expanded rapidly in recent years (European Commission, 2023). By 2024, total installed wind capacity reached approximately 285 GW, accounting for around 19.5 % of electricity consumption in the EU-27 and the United Kingdom (Constanzo & Brindley, 2024).

Further capacity growth is expected until 2030; however, a substantial share of the existing wind energy plant fleet will reach the end of its service life during this period. Between 2025 and 2030, approximately 227 GW of wind capacity are projected to be decommissioned, of which about 101 GW will be permanently retired and 126 GW repowered (Costanzo, Brindley, & Tardieu, 2025). While most wind turbine components can be recycled, wind turbine blades (WTB) remain a challenge due to their fiber-reinforced polymer composition (GFRP and CFRP), for which environmentally sustainable recycling solutions are still under development (Beauson, Laurent, Rudolph, & Pagh Jensen, 2022).

The relevance of this challenge is expected to increase further, as the European composite market continues to grow (grandviewresearch, 2023). Reliable forecasts of future WTB waste streams therefore require robust assumptions regarding turbine lifetimes and material composition. Most existing studies assume fixed operational lifetimes of approximately 20 years, following IEC 61400-1, which may lead to an overestimation of near-term blade waste volumes (DIN EN IEC 61400-1, 2019; Hassing & Søren, 2001;

Liu & Barlow, 2017; Volk, Stallkamp, Herbst, & Schultmann, 2021). More recent studies indicate increasing turbine lifetimes, with empirical and stochastic approaches suggesting average service lives of 25 to nearly 30 years or more (Bech Abrahamsen et al., 2024; Delaney et al., 2023; Lefeuvre, Garnier, Jacquemin, Pillain, & Sonnemann, 2019; Wiser & Bolinger, 2019).

Wind turbine blades are complex composite structures designed to combine low weight with high mechanical strength. Glass fibers dominate blade production, while carbon fibers are increasingly used in larger turbines above 2 MW to reduce weight and increase stiffness (Hau, 2016; Kühne et al., 2022; Lefeuvre et al., 2019).

2 Methodology

2.1 Databases and data processing

The estimation of wind turbine blade material flows is based on turbine capacity, commissioning year, operational status, and onshore or offshore location. Two main data sources were used: the German Marktstammdatenregister (MaStR) and the European database “The Wind Power” (accessed January 2025). The MaStR provides mandatory, operator-reported data at the single-turbine level and is considered very reliable (Bundesnetzagentur, 2024). The Wind Power database aggregates data from multiple sources and is primarily structured at the wind farm level, requiring additional data processing (The WindPower, 2025).

To improve data completeness, wind farm datasets were disaggregated into individual turbine data where necessary, and missing information was supplemented through targeted desk research using publicly available reports and press releases. After data enhancement, more than 98 % of European wind turbines could be identified with sufficient data for further analysis.

2.2 Assumptions on turbine service life

For onshore wind turbines, service life assumptions were derived from decommissioned turbines recorded in the MaStR. The data indicate an increasing operational lifetime, exceeding the commonly assumed fixed lifetime of 20 years. To ensure a conservative projection, lifetime trends reported by Wiser and Bolinger (2019) were adopted for future forecasts.

For offshore wind turbines, empirical end-of-life data are scarce. Therefore, service life assumptions are based on available decommissioning records and literature values, indicating average lifetimes of around 25 years. A similar lifetime development trend as for onshore turbines was assumed (Fig. 1).

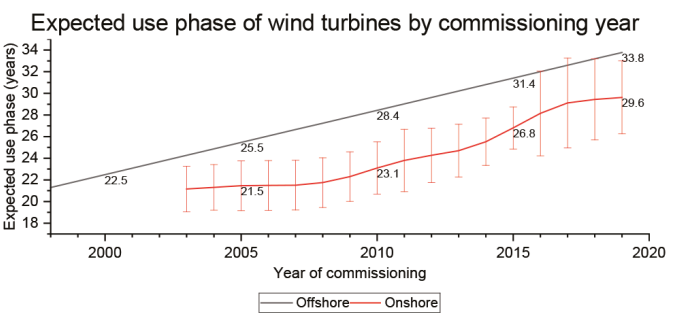


Figure 1: Expected service life of onshore and offshore wind turbines by commissioning year.

2.3 WTB waste forecasting approach

Annual WTB waste generation until 2040 is calculated by combining turbine commissioning dates with projected service lifetimes. Blade mass is derived from turbine capacity, and material composition is assigned based on turbine size, distinguishing between turbines below and above 2 MW, with carbon fiber usage assumed for larger turbines commissioned after 2010 (Lefeuvre et al., 2019). To avoid discontinuities in the time series, decommissioning is distributed evenly within each year.

Table 1: Turbine blade mass across rated capacity classes.

Turbine rated capacity (MW)	Total specific blade mass (kg/kW)
≤1	8.43
1-1.5	12.37
1.5-2	13.34
2-5	12.75
≥5	13

3 Results

3.1 Age structure of the European wind turbine fleet

As of January 2025, approximately 113,000 wind turbines are in operation in Europe, comprising 106,877 onshore and 6,461 offshore units. Germany accounts for 29,766 onshore and 1,637 offshore turbines, while the remaining European countries include 77,111 onshore and 4,824 offshore turbines with available turbine count data.

The onshore fleet is dominated by turbines commissioned between 2000 and 2017, with a peak around 2009, indicating an advanced average age. Offshore installations are younger, with most turbines commissioned after 2009 and a peak around 2015, and are primarily located in the United Kingdom, followed by Germany and Denmark. These distributions indicate increasing decommissioning and repowering relevance for onshore turbines, while offshore capacity continues to expand.

3.2 Wind turbine blade inventory in operational use

The total mass of wind turbine blades in operation in Europe is approximately 3.18 million tons, of which 2.74 million tons originate from onshore turbines and 0.44 million tons from offshore turbines. Onshore blade mass is concentrated in turbines with rated capacities between 1.5 and 5 MW, while offshore blade mass is dominated by turbines of 5 MW and above.

Blade mass is unevenly distributed across Europe. The highest onshore inventories are found in Germany, followed by Spain, France, and Sweden. Offshore blade mass is concentrated in a small number of countries, with the United Kingdom holding the largest share, followed by Germany and the Netherlands.

3.3 End-of-life wind turbine blade waste forecast until 2040

Annual end-of-life wind turbine blade waste remains largely stable until 2040. An elevated value in 2025 results from the allocation of accumulated blade masses from turbines exceeding their assumed service life by the end of 2024. Excluding this effect, onshore blade waste ranges between 50,000 and 110,000 tons

per year, with maximum in 2028, 2032, and 2037. Offshore waste volumes are substantially lower and show intermittent peaks linked to clustered wind farm decommissioning (Figure 2).

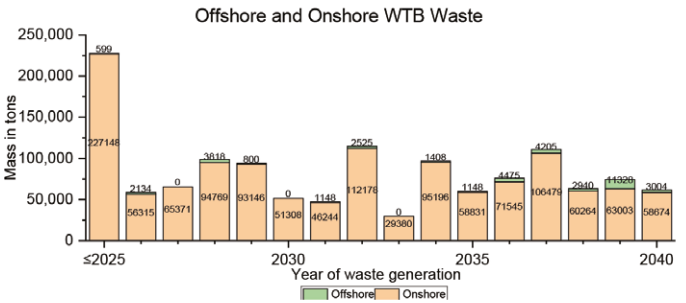


Figure 2: The distribution of offshore and onshore wind turbine blade waste by mass over time.

From 2038 onwards, both onshore and offshore waste volumes decrease, with onshore waste converging toward approximately 60,000 tons per year and offshore waste falling below 3,000 tons per year.
Material-specific projections show that glass fiber and resin dominate throughout the period, while carbon fiber waste increases from 2033 onward, exceeding 5,000 tons per year from 2036 and remaining above this level in subsequent years.

Acknowledgements

Support of this research as part of the he REWIND is gratefully acknowledged. This project is funded by the Horizon Europe Program under the grant agreement No 101147226.

References

Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D. P., & Pagh Jensen, J. (2022). The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *155*, 111847. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111847

Bech Abrahamsen, A., Beauson, J., Wilhelm Lund, K., Skov Madsen, E., Philipp Rudolph, D., & Pagh Jensen, J. (2024). Method for estimating the future annual mass of decommissioned wind turbine blade material in Denmark. *Wind Energy*, *27*(2), 165–178. https://doi.org/10.1002/we.2882

Bundesnetzagentur. (2024). Zielsetzung des Marktstammdatenregister. Daten für die Energiewende. Retrieved from Www.marktstammdatenregister.de website: https://www.marktstammdatenregister.de/MaStRHilfe/subpages/GrundlagenZielsetzung.html.

Constanzo, G., & Brindley, G. (2024). *Wind energy in Europe. 2023 Statistics and the outlook for 2024-2030.* WindEurope. Retrieved from https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2023-statistics-and-the-outlook-for-2024-2030/

Costanzo, G., Brindley, G., & Tardieu, P. (2025). *Wind energy in Europe: 2024 Statistics and the outlook for 2025-2030*. WindEurope. Retrieved from https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2024-statistics-and-the-outlook-for-2025-2030/

Delaney, E. L., Leahy, P. G., McKinley, J. M., Gentry, T. R., Nagle, A. J., Elberling, J., & Bank, L. C. (2023). Sustainability Implications of Current Approaches to End-of-Life of Wind Turbine Blades—A Review. *Sustainability*, *15*(16), 12557. https://doi.org/10.3390/su151612557

DIN EN IEC 61400-1. (2019). *DIN EN IEC 61400-1*. VDE.

European Commission. (2023). EU wind energy. Retrieved October 24, 2024, from Europa.eu website: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/eu-wind-energy_en. Available online at https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/eu-wind-energy_en,

grandviewresearch. (2023). *Europe Composites Market Size & Trends* (No. GVR-2-68038-994-4; p. 125). Grand View Research. Retrieved from Grand View Research website: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/europe-composites-market

Hassing, H., & Søren, V. (2001). *Life cycle assessment for wind turbines*. EWEA. Retrieved from https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20903079

Hau, E. (2016). *Windkraftanlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53154-9

Kühne, C., Stapf, D., Holz, P., Baumann, W., Mülhopt, S., Wexler, M., … Beckmann, M. (2022). *Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter: Abschlussbericht [Kurztitel: Aufbereitung von Rotorblättern]* [PDF]. Umweltbundesamt (UBA). https://doi.org/10.5445/IR/1000151175

Lefeuvre, A., Garnier, S., Jacquemin, L., Pillain, B., & Sonnemann, G. (2019). Anticipating in-use stocks of carbon fibre reinforced polymers and related waste generated by the wind power sector until 2050. *Resources, Conservation and Recycling*, *141*, 30–39. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.008

Liu, P., & Barlow, C. Y. (2017). Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*, *62*, 229–240. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007

The WindPower. (2025, April). About. Retrieved from Thewindpower.net website: https://www.thewindpower.net/about_en.php

Volk, R., Stallkamp, C., Herbst, M., & Schultmann, F. (2021). Regional rotor blade waste quantification in Germany until 2040. *Resources, Conservation and Recycling*, *172*, 105667. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105667

Wiser, R., & Bolinger, M. (2019). *Benchmarking Anticipated Wind Project Lifetimes: Results from a Survey of U.S. Wind Industry Professionals*. Berkeley Lab. Retrieved from https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/wind_useful_life_report.pdf

Contact

Paul Steiner, Scientific Researcher
Hochschule Pforzheim
E-Mail: Paul.steiner@hs-pforzheim.de
Homepage: www.hs-pforzheim.de

Ronja Strobel, André Rückert, Christoph Melzer

Durchführung einer modellgestützten Szenarioanalyse zu verschiedenen Verwertungswegen von Gerätebatterien in Kambodscha

***Abstract**: Der zunehmende Einsatz von Geräte- und Lithium-Ionen-Batterien stellt Kambodscha aufgrund fehlender Recyclinginfrastrukturen vor erhebliche ökologische Herausforderungen. Unsachgemäße Entsorgung führt zu Umwelt- und Gesundheitsrisiken, während in anderen asiatischen Ländern bereits etablierte Rücknahme- und Recyclingsysteme existieren. Vor diesem Hintergrund untersucht diese Arbeit, inwieweit technische Strategien zur Rücknahme, Verwertung und umweltgerechten Behandlung von Altbatterien auf den kambodschanischen Kontext übertragbar sind und zur Reduktion ökologischer Auswirkungen beitragen können. Methodisch basiert die Untersuchung auf einer modellgestützten Szenarioanalyse. Es werden ein Referenz-, ein realistisches sowie ein Best-Case-Szenario entwickelt, welche unterschiedliche Entwicklungsstufen der Verwertung von Altbatterien abbilden. Eine zentrale Einflussgröße stellt dabei die Sammelmenge dar, die in allen Szenarien systematisch variiert wird. Die ökologische Bewertung erfolgt mithilfe einer Multi-Kriterien-Analyse mit Fokus auf Materialrückgewinnung, Abfallaufkommen, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen.*

1 Einleitung

Die Entsorgung gebrauchter Batterien stellt weltweit eine komplexe und zunehmend relevante Herausforderung dar. Mit dem steigenden Gebrauch elektronischer Geräte und einem damit verbundenen wachsenden Aufkommen an Altbatterien steigt nicht nur das Abfallaufkommen, sondern auch der Bedarf an sicheren, nachhaltigen und wirtschaftlich tragfähigen Verwertungswegen. Im asiatischen Raum wurden in den letzten Jahren bereits umfangreiche strategische Ansätze entwickelt, um das Recycling von Gerätebatterien effizient und nachhaltig zu gestalten. Länder wie Japan, Südkorea und China haben bereits fortschrittliche Recycling-Technologien etabliert und setzen auf innovative Ansätze, um wertvolle Rohstoffe aus Altbatterien zurückzugewinnen (Endo et al. 2024). Auch in Kambodscha nimmt der Einsatz von Gerätebatterien infolge des wirtschaftlichen Wachstums und der fortschreitenden Elektrifizierung kontinuierlich zu, während geeignete Recyclinginfrastrukturen bislang nicht existieren (Battpro Projekt 2025). Dies führt im Land teilweise zu unsachgemäßer Entsorgung auf ungesicherten Deponien, wodurch Schadstoffe wie Schwermetalle in die Umwelt gelangen und erhebliche Risiken für Gesundheit, Wasserressourcen und Ökosysteme entstehen (Karnchanawong und Limpiteeprakan 2009). Zusätzlich erhöht der zunehmende Anteil von Lithium-Ionen-Batterien im Abfallstrom die Brandgefahr entlang der gesamten Entsorgungskette (Mrozik et al. 2021). Vor diesem Hintergrund gewinnt die Entwicklung und Bewertung technisch umsetzbarer sowie ökologisch und ökonomisch nachhaltiger Strategien zur Rückgewinnung und Verwertung von Batteriematerialien zunehmend an Bedeutung.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, verschiedene technische Ansätze zur Verwertung beziehungsweise umweltgerechten Behandlung von Altbatterien in Kambodscha mittels einer modellgestützten Szenarioanalyse zu analysieren und hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen zu bewerten. Folgende Forschungsfragen sollen

damit beantwortet werden: Inwiefern lassen sich die ökologischen Auswirkungen im Umgang mit Altbatterien in Kambodscha mittels verschiedenen Rücknahme-, Recycling- und Entsorgungsstrategien minimieren? Und inwieweit lassen sich existierende Recycling- und Verwertungssysteme auf den kambodschanischen Kontext übertragen und technisch umsetzen?

Die Ergebnisse der Studie und die entwickelten Szenarien dienen als Grundlage für einen länderspezifischen Plan und Empfehlungen, die als Ergebnis des BATTPRO-Projektes dem Umweltministerium von Kambodscha vorgelegt werden, damit diese über die Umsetzung potenzieller Lösungen wie zum Beispiel der Einführung eines Systems zur Übernahme der Herstellerverantwortung für Gerätebatterien entscheiden können. Außerdem kann das entwickelte Modell und die ausgearbeitete Bewertungsmethode auch als Grundlage für Betrachtungen und Empfehlungen von möglichen Verwertungssystemen in anderen Ländern mit ähnlichen Voraussetzungen wie Kambodscha dienen.

Die Masterarbeit wird im Rahmen des BATTPRO-Projektes (engl.: Battery Takeback Professionalization to Support Environmental Protection in Cambodia and Thailand) durchgeführt. Das Projekt wird von der ECOLOGICON GmbH und der Stiftung GRS im Konsortium umgesetzt und vom Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) im Rahmen der Exportinitiative Umweltschutz gefördert.

2 Methodik

Die Arbeit ist in drei inhaltliche Schwerpunkte unterteilt: den Modellaufbau, die Szenarienentwicklung und die ökologische Bewertung. Als Basis der vorliegenden Untersuchung dient eine im Zuge des BATTPRO-Projektes durchgeführte umfassende Analyse des Batteriesektors in Kambodscha, insbesondere der anfallenden Mengen sowie bestehender Rücknahme- bzw. Verbleibstrukturen (Battpro Projekt 2025).

2.1 Modellaufbau: Prozess und Kennzahlenauswahl

Die Auswahl und Parametrisierung der Modellprozesse erfolgten auf Basis eines Vergleichs relevanter Studien und verwendeter Kennzahlen. Die Studienanalyse bietet einen Überblick über Veröffentlichungen zur Modellierung von Batterieverwertungs- und Recyclingsystemen. Die betrachteten Studien und Reviewartikel aus den Jahren 2019 bis 2025 stammen aus den USA, Asien, Europa und Australien und decken damit eine breite geografische Varietät ab. Die betrachteten Prozesse umfassen vor allem Recyclingtechnologien wie Pyrometallurgie, Hydrometallurgie und direktes Recycling (Wang et al. 2025; Kamath et al. 2023; Xará et al. 2014). Ergänzend werden Vorbehandlungsprozesse wie Demontage und Schreddern (Pang et al. 2025), die Sammlung (Xará et al. 2014; Kamath et al. 2023; Dunn et al. 2022) und teilweise Sortierung (Xará et al. 2014) berücksichtigt. Einige Studien integrieren Second-Use-Phasen (Kamath et al. 2023; Dunn et al. 2022) und die Nutzungsphase (Dunn et al. 2022; Pratap et al. 2024), andere modellieren den Export von Batterien ins Ausland (Xará et al. 2014).

Basierend auf den Prozessen der ausgewählten Studien und der aktuellen Situation in Kambodscha wurde die zu untersuchende Modellübersicht erstellt, wie in Abbildung 1 dargestellt.

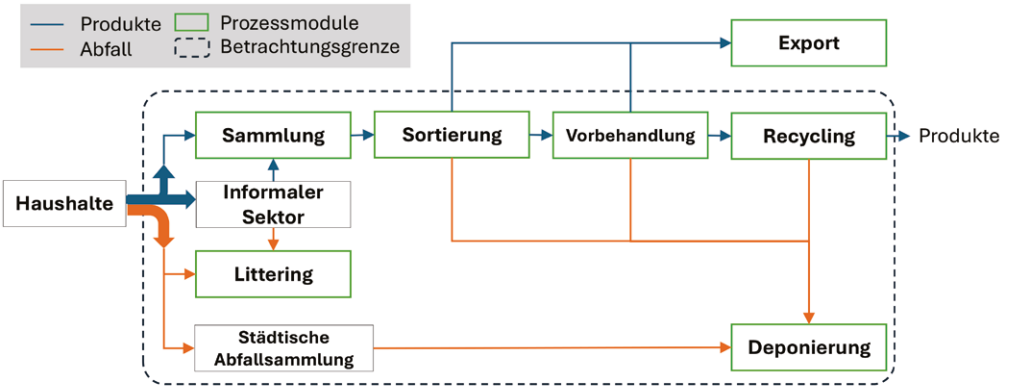


Abbildung 1: Übersicht des Modellaufbaus des betrachteten Batterieverwertungssystems in Kambodscha (eigene Darstellung)

2.2 Szenarienentwicklung

Zur Entwicklung praxisnaher Umsetzungsoptionen wurden die Szenarien auf Grundlage eines Workshops mit kambodschanischen Stakeholdern erarbeitet. Im Rahmen des Workshops wurden zentrale Herausforderungen sowie potenzielle Lösungsansätze entlang des Verwertungsweges von Batterien, einschließlich Sammlung, Sortierung, Vorbehandlung, Recycling und Export diskutiert.

Die Szenarioanalyse fokussiert sich auf den Zeitraum eines Jahres in 10 Jahren. Als Grundlage dienen drei Szenarien: (1) ein Referenzszenario, das die Fortschreibung der aktuellen Situation ohne zusätzliche politische oder wirtschaftliche Eingriffe abbildet, (2) ein realistisches Szenario, das auf unter gegebenen zeitlichen und finanziellen Rahmenbedingungen umsetzbaren Investitionen basiert und eine pragmatische Entwicklung darstellt, sowie (3) ein Best-Case-Szenario, das ein Zielbild mit hoher Zirkularität und einer umfassend ausgebauten nationalen Recyclinginfrastruktur beschreibt.

Da sich die Menge der gesammelten und verwertbaren Altbatterien in der Diskussion als entscheidender Einflussfaktor für die wirtschaftliche Tragfähigkeit der Szenarien herausgestellt hat, wird diese Größe in allen drei Szenarien systematisch variiert. Hierzu werden drei Sammelstufen betrachtet: eine aktuelle Sammelmenge, eine mittlere Sammelmenge mit realistischer Erreichbarkeit innerhalb von zehn Jahren sowie eine ambitionierte Ziel-Sammelmenge.

2.3 Bewertungsmethode

Für die Untersuchung wurde eine Bewertung angelehnt an die Multi-Kriterien-Analyse gewählt, da sie eine flexible Gewichtung verschiedener Kriterien erlaubt (Sahoo, 2023). Für die Auswahl der Kriterien hat man sich an Multi-Kriterien-Ansätzen aus aktuellen wissenschaftlichen Studien zur Bewertung von Batterie-Recyclingsystemen orientiert.

Für die Untersuchung wurden Studien aus den Jahren 2020 bis 2025 betrachtet, die Multi-Kriterien-Ansätze zur Bewertung von Batterierecycling-Systemen anwenden. Aus diesen Studien wurden die verwendeten Kriterien extrahiert und thematisch gruppiert. Die Analyse ergab folgende Hauptgruppen: Materialrückgewinnung, Abfallaufkommen und Deponierung, Abwasseraufkommen, Energieverbrauch, Treibhausgas- und andere Emissionen, Verwendung von (giftigen) Hilfsstoffen, Wasserverbrauch, Einhaltung

von Vorschriften und Richtlinien sowie die Nutzung grüner Technologien. (Chakraborty und Saha 2022; Lu et al. 2024; Wang et al. 2025; Wang et al. 2020; Zafaranlouei et al. 2023)

Aufgrund des Umfangs der Kriterien wurde der Fokus auf die am häufigsten vertretenen Gruppen gelegt: Materialrückgewinnung, Abfallaufkommen, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen. Für Materialrückgewinnung, Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen-Gruppen wurden die relevanten Werte für die einzelnen Prozessmodule aus weiteren Studien recherchiert und übernommen.

Eine besondere Herausforderung stellt die Bewertung von Umweltschäden dar, die durch Littering oder Deponierung entstehen können. Hierbei spielt das Auslaufen von Batterien und die dabei austretenden Schwermetallen eine zentrale Rolle (Karnchanawong und Limpiteeprakan 2009). Diese Risiken sollen in der Kategorie „Abfallaufkommen“ berücksichtigt werden, indem die Menge an Deponierung und unsachgemäßer Entsorgung (Littering) erfasst wird. Die Bewertung erfolgt anhand der Frage, inwieweit die betrachteten Szenarien diese Mengen im Vergleich zur aktuellen Situation reduzieren und so die damit verbundenen Umweltrisiken minimieren können.

Danksagung

Durchführung der Masterarbeit unter Betreuung der ECOLOGICON GmbH unter Projektleitung von André Rückert und der Stiftung GRS unter Projektleitung von Christoph Melzer. Wissenschaftliche Begleitung durch die Leibniz Universität Hannover, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik.

Literatur/Quellen

Battpro Projekt (2025): Material Flow Model Report - Cambodia. Nicht veröffentlichte Studie. Hg. v. ECOLOGICON GmbH und Stiftung GRS

Chakraborty, Sayanta; Saha, Apu Kumar (2022): Selection of optimal lithium ion battery recycling process: A multi-criteria group decision making approach. In: Journal of Energy Storage 55.

Dunn, Jessica; Kendall, Alissa; Slattery, Margaret (2022): Electric vehicle lithium-ion battery recycled content standards for the US – targets, costs, and environmental impacts. Resources, Conservation and Recycling 185.

Endo, Chie; Kaufmann, Tanja; Schmuch, Richard; Thielmann, Axel (2024): Benchmarking International Battery Policies. A cross analysis of international public battery strategies focusing on Germany, EU, USA, South Korea, Japan and China. Hg. v. Fraunhofer ISI. Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Kamath, Dipti; Moore, Sharlissa; Arsenault, Renata; Anctil, Annick (2023): A system dynamics model for end-of-life management of electric vehicle batteries in the US: Comparing the cost, carbon, and material requirements of remanufacturing and recycling. Resources, Conservation and Recycling 196.

Karnchanawong, Somjai; Limpiteeprakan, Pawena (2009): Evaluation of heavy metal leaching from spent household batteries disposed in municipal solid waste. Waste management (New York, N.Y.) 29

Lu, Qiang; Zhou, Jia-le; Zhou, Xin-yue; Guo, Rong; Yu, Yi-fei; Hu, Zhuang et al. (2024): Evaluation of optimal waste lithium-ion battery recycling technology driven by multiple factors. Journal of Energy Storage 86.

Mrozik, Wojciech; Rajaeifar, Mohammad Ali; Heidrich, Oliver; Christensen, Paul (2021): Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. Energy Environ. Sci. 14

Pang, Dongjie; Wang, Haoyu; Zeng, Yimin; Han, Xue; Zheng, Ying (2025): Sustainable Recycling of Lithium-Ion Battery Cathodes: Life Cycle Assessment, Technologies, and Economic Insights. Nanomaterials (Basel, Switzerland) 15.

Pratap, Bhanu; Mohan, T. KrishnaV.; Amit, R. K.; Venugopal, Shankar (2024): Evaluating circular economy strategies for raw material recovery from end-of-life lithium-ion batteries: A system dynamics model. Sustainable Production and Consumption 50, S. 191–204.

Sahoo, Sushil Kumar; Goswami, Shankha Shubhra (2023): A Comprehensive Review of Multiple Criteria Decision-Making (MCDM) Methods: Advancements, Applications, and Future Directions. Decision Making Advances 1, S. 25–48.

Wang, Chia-Nan; Nhieu, Nhat-Luong; Wang, Yen-Hui (2025): Evaluating Sustainable Battery Recycling Technologies Using a Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Approach. Batteries 11 (8)

Wang, Wei; He, Yi; Zhang, Deyuan; Wu, Yufeng; Pan, Dean (2020): Multi-Criteria Evaluation of Best Available Treatment Technology for Waste Lead-Acid Battery: The Case of China. Sustainability 12.

Xará, Susana; Almeida, Manuel Fonseca; Costa, Carlos (2014): Life cycle assessment of alternatives for recycling abroad alkaline batteries from Portugal. Int J Life Cycle Assess 19 (7).

Zafaranlouei, Nafiseh; Ghoushchi, Saeid Jafarzadeh; Haseli, Gholamreza (2023): Assessment of sustainable waste management alternatives using the extensions of the base criterion method and combined compromise solution based on the fuzzy Z-numbers. Environmental science and pollution research international 30.

Kontakt

Ronja Strobel (Studentin)
Leibniz Universität Hannover / Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
E-Mail: ronja.strobel@stud.uni-hannover.de

Anton Vielsack, Jim Magiera, Simon Eberle, Lena-Marie Hupperich, Sven Ditzel, Jessica Hövel, Max Riedel, Anne-Kathrin Cassier-Woidasky, Jörg Woidasky

Charakterisierung infektiöser medizinischer Abfälle mittels Röntgenbildgebung: Ein methodischer Ansatz zur Unterstützung zukünftiger Recycling- und Kreislaufstrategien

***Abstract**: Infektiöse medizinische Abfälle (Abfallschlüssel 18 01 03*) stellen besondere Anforderungen an Arbeitsschutz, Logistik und Entsorgung. Direkte Untersuchungen der Abfallinhalte sind durch blickdichte Behälter und regulatorische Vorgaben praktisch unmöglich, so dass nur begrenzte Informationen zur stofflichen und produktspezifischen Zusammensetzung vorliegen. Ziel dieser Arbeit ist die Darstellung einer Methodik zur Analyse infektiöser Abfälle mittels Röntgenscans und Machine Learning (ML)-gestützter Auswertung. Dazu wurden knapp 10.000 Abfallbehälter aus Krankenhäusern, Laboren sowie Reha- und Vorsorgeeinrichtungen fotografisch, gewichts- und röntgenbildgebend erfasst und automatisiert klassifiziert. Insgesamt konnten 6.179 Datensätze vollständig analysiert werden. Die vorgestellte Methodik bildet eine Grundlage für repräsentative Untersuchungen als Basis einer künftigen stofflichen Verwertung infektiöser medizinischer Abfälle.*

1 Einleitung

In Deutschland fallen jährlich rund 425.400 Mg Abfälle speziell aus dem Humangesundheitswesen an, die der Abfallgruppe 18 01 zugeordnet sind (Statistisches Bundesamt 2022). Von dieser Gesamtmenge werden etwa 329.925 Mg unmittelbar in Krankenhäusern generiert (Vielsack et al. 2025). Innerhalb dieses Spektrums kommt der Abfallart 18 01 03*, dem infektiösen medizinischen Abfall, besondere Bedeutung zu. Mit einer jährlichen Menge von etwa 10.100 Mg entspricht dieser Abfallstrom zwar lediglich rund 2,4 % der gesamten jährlichen Masse der Abfallgruppe 18 01 in Deutschland, stellt jedoch aufgrund seines Infektionspotenzials erhebliche Anforderungen an Arbeitsschutz, Logistik und Entsorgungsprozesse. Die strenge Regulierung – insbesondere durch den EAK bzw. die AVV, die LAGA M18 sowie die TRBA 250 – führt zu einer weitreichenden Standardisierung der Erfassung, Sammlung und Behandlung dieses Abfalls. Großteils einheitliche, nicht wieder zu öffnende und blickdichte Behältersysteme (30, 50, 60 l) gewährleisten hierbei ein hohes Maß an Sicherheit, verhindern jedoch zugleich eine direkte, zerstörungsfreie Untersuchung des Abfallinhalts.

Neben der grundsätzlichen Untersagung manueller Abfallanalysen resultiert auch dadurch ein grundlegender Mangel an Informationen zur stofflichen und produktspezifischen Zusammensetzung dieses Abfallstroms. Solche Daten sind jedoch erforderlich, um das bislang unerschlossene Potenzial einer zukünftigen stofflichen Kreislaufführung infektiöser medizinischer Abfälle zu bewerten. Derzeit werden sie gemäß den Anforderungen der LAGA M18 ausschließlich einer thermischen Behandlung zugeführt. Verfügbare Datenquellen – sowohl amtliche Abfallstatistiken (Statistisches Bundesamt 2022) als auch direkte Erhebungen bei Krankenhäusern (Vielsack et al. 2025) – beschränken sich auf aggregierte Massenströme und erlauben keine Beschreibung der stofflichen Zusammensetzung. Auch der internationale Forschungsstand weist kaum belastbare Erkenntnisse zur Materialzusammensetzung dieser Abfallart auf.

Gleichzeitig führt die strikte Regulierung zu einem vergleichsweise homogenen und gut dokumentierten Abfallstrom, der sich als Modell-Abfallstrom für systematische Untersuchungen und damit auch zur Methodenentwicklung besonders eignet, die potenziell auf mengenmäßig relevantere medizinische Abfälle, deren stoffliche Zusammensetzung ebenfalls weitgehend unbekannt ist wie die Abfallart 18 01 04. übertragbar sind. Für solche Aufgaben wurde der Einsatz bildgebender Verfahren – insbesondere radiographischer Methoden – als vielversprechender Ansatz für eine zerstörungs- und risikofreie Charakterisierung infektiöser Abfälle identifiziert (Feld et al. 2023). Trotz der zunehmenden Relevanz bildgebender Verfahren in der Abfallforschung, etwa in der Störstoffdetektion (Ueda et al. 2024) oder der mineralogischen Analyse (Bussey et al. 2024), existieren bislang keine systematischen Untersuchungen zur Anwendung von Röntgenscans medizinischer Abfälle. Die vorliegende Studie adressiert diese vorgestellte Forschungslücke mit einer Methodik zur zerstörungs- und risikofreien Untersuchung infektiöser medizinischer Abfälle. Hierbei werden Röntgenscans in Kombination mit ML-gestützten Auswertungsverfahren zur Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung und zur Bewertung des Potenzials einer zukünftigen stofflichen Verwertung eingesetzt.

2 Methodik

2.1 Datenaufnahme

Für die praktischen Untersuchungen wurden blickdichte, farbige 30-l, 50-l und 60-l Abfallbehälter mit infektiösem Abfall (Abfallschlüssel 18 01 03*) aus der Regelentsorgung des deutschen Gesundheitssektors genutzt. Die Erfassung erfolgte bei einem Entsorgungsunternehmen, das bundesweit anfallende infektiöse Abfälle annimmt und behandelt. Der Versuchsaufbau (siehe Abbildung 1) zielte auf die Erfassung der Behältermasse, der Anfallstellen-Kennzeichnung (Art des Abfallerzeugers) und des Behälterinhalts. Er bestand aus einer integrierten Rollenbahnwaage zur Gewichtserfassung sowie einer Aufnahmeeinheit mit drei Kameras (Perspektiven oben, vorne, seitlich), um den Adressaufkleber der jeweiligen Herkunftseinrichtung zu erfassen, sowie der Röntgenanlage Typ HI-SCAN 100100T (Smiths Detection). Dieser „Kofferscanner“

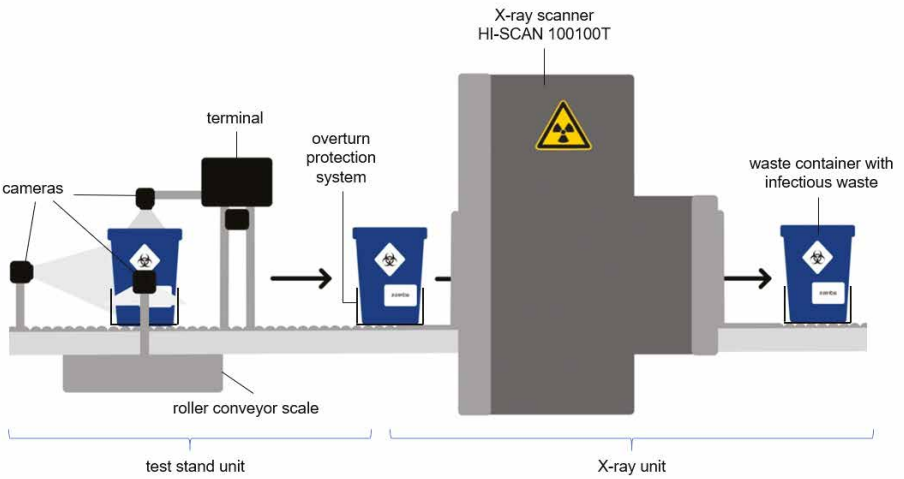


Abbildung 1: Versuchsaufbau (Vielsack et al., eingereicht am 04.02.2026)

erzeugte pro Behälter zwei um 80° versetzte Röntgenbilder. Um die behördlich geforderte aufrechte Positionierung der Behälter sicherzustellen, wurden für alle drei Behältergrößen spezielle Umsturzsicherungen konstruiert. Im Ergebnis wurden so eine Massenangabe, drei Außenaufnahmen und zwei Röntgenbilder pro Behälter erzeugt. Die Stichprobe wurde über jede vierte Anlieferungseinheit an 16 Einsatztagen innerhalb von jeweils achtstündigen Schichten gezogen. Zur Synchronisation der Datensätze wurde alle 30 Minuten ein Kalibrierbehälter durch den Aufbau geführt.

2.2 Datenauswertung

Die initiale visuelle Analyse der Röntgenaufnahmen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit einer Pflegewissenschaftlerin mit umfangreicher praktischer Erfahrung im Krankenhausbetrieb. Auf Grundlage dieser Sichtung wurden neben den vier behälter- bzw. größenbezogenen Klassen (30-l, 50-l, 60-l sowie Kalibrierbehälter) acht inhaltsbezogene Klassen definiert. Die farbliche Darstellung der Röntgenbilder – orange für leichte und organische Materialien, grün für mittelschwere Elemente bzw. Materialien wie PVC, Glas oder Leichtmetalle und blau für schwere Elemente bzw. Metalle – erleichterte die Identifikation der Materialien.

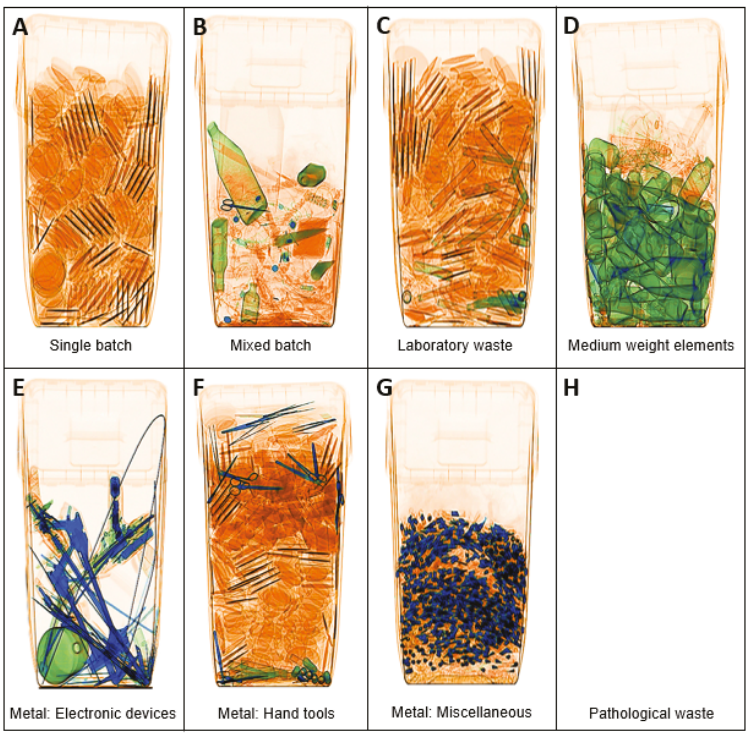


Abbildung 2: Inhaltsklassen der 180103-Abfallbehälter-Analyse (vgl. Vielsack et al., eingereicht am 04.02.2026)*

Die inhaltlichen Kategorien (siehe Abbildung 2) umfassten homogene Inhalte („Single batch“), stark gemischte Inhalte („Mixed batch“), Laborabfälle, mittelschwere Elemente bzw. Materialien, elektronische Geräte, metallische Handinstrumente sowie sonstige Metallobjekte. Pathologische Abfälle (aus ethischen Gründen

in Abbildung 2 nicht dargestellt) wurden zwar gelabelt, aber aufgrund ihres sehr geringen Anteils (<1% der gelabelten Behälter) aus der weiteren Analyse ausgeschlossen. Insgesamt wurden 1.531 Datensätze annotiert. Die Klassifikation diente der strukturierten Aufbereitung der Bilddaten und bildete die Grundlage für das Training eines ML-Modells, das die automatische Erkennung bzw. Klassifizierung der Behälterinhalte ermöglicht, jedoch hier nicht weiter spezifiziert wird. Zur Validierung der Adressaufkleber und Zuordnung der Herkunftseinrichtungen wurden offizielle Daten des Statistischen Bundesamtes für Krankenhäuser sowie Präventions- und Rehaeinrichtungen (Statistisches Bundesamt 2023) und manuell recherchierte Adressen von über 400 medizinischen Laboren als Referenzquellen genutzt. Auf dieser Basis wurden die Behälter so weit wie möglich den Kategorien Universitätskliniken, Allgemeinkrankenhäuser, sonstige Krankenhäuser, medizinische Labore sowie Reha- und Vorsorgeeinrichtungen zugeordnet.

Ergebnis-Übersicht

Insgesamt konnten 6.179 valide Datensätze (ohne Kalibrierbehälter) für eine weitergehende Auswertung bereitgestellt werden. Die Gesamtmasse dieser Behälter beträgt 58,7 Mg, was etwa 0,6 % der jährlichen Abfallmenge des Abfallstroms 18 01 03* in Deutschland entspricht und somit eine robuste Basis für Aussagen zur Abfallcharakterisierung darstellt. Das durchschnittliche Behältergewicht liegt bei 9,22 kg, der Median bei 9,51 kg; die Häufigkeitsverteilung zeigt einen deutlichen Peak bei etwa 10 kg, während Behältergewichte über 20 kg nur sporadisch vorkommen. Innerhalb der zugeordneten Datensätze traten unterschiedliche Erkennungsprobleme auf: In 431 Fällen wurden keine Adressaufkleber erkannt, in 594 Fällen kein Text auf dem Aufkleber, und 2.794 Datensätze ließen sich nicht mit den Referenzdatenbanken verknüpfen. Von den 2.360 erfolgreich zugeordneten Behältern stammten 1.372 von 185 Krankenhäusern (davon 960 Allgemeinkrankenhäuser, 331 Universitätskliniken, 81 sonstige Kliniken; ca. 10 % aller deutschen Krankenhäuser), 30 von Reha- und Vorsorgeeinrichtungen und 958 von 45 medizinischen Laboren. Eine detaillierte Auswertung der Behälterinhalte kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorgestellt wird, sondern ist Gegenstand zukünftiger Veröffentlichungen.

Danksagung

Die Autoren danken dem Industriepartner für die Unterstützung des Praxistests. Besonderer Dank gilt Herrn Simon Eberle von der HS Pforzheim für die Entwicklung und den Aufbau des Prüfstands sowie Frau Lena-Marie Hupperich von der htw Saar für die visuelle Voranalyse der Inhalte der Abfallbehälter. Die Studie wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) unter dem Förderkennzeichen 03EI5020A gefördert.

Literatur/Quellen

Bussey, John; Weber, Marc; Cenda, Dan Mihai; Faure, Bertrand; Barton, Scott; Moreau, Liane; McCloy, John (2024): Laboratory-based correlated X-ray imaging and scattering of inhomogeneous glass-ceramics. In: Materials Letters 369, S. 136688. DOI: 10.1016/j.matlet.2024.136688.

Statistisches Bundesamt (2022): Data retrieval: Waste disposal: Germany, years (2022), waste types. 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 23.10.2025.

Statistisches Bundesamt (2023): Directory of hospitals and preventative care or rehabilitation facilities in Germany, zuletzt aktualisiert am 31.12.2023, zuletzt geprüft am 14.11.2025.

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.

Ueda, Takao; Fukusawa, Hideaki; Nakagawa, Yukimi; Nagano, Kazuya; Sunahara, Naoki; Yamada, Hiroshi et al. (2024): Automatic high-speed smartphone disassembly system. In: Journal of Cleaner Production 434, S. 139928. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139928.

Vielsack, Anton; Galler, Viola; Cassier-Woidasky, Anne-Kathrin; Zecha, Franziska; Woidasky, Jörg (2025): Healthcare Waste in German Hospitals: A Nationwide Benchmark Study. In: Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy (accepted: 18.11.2025).

Kontakt

Anton Vielsack (wissenschaftlicher Mitarbeiter)
HS Pforzheim
E-Mail: anton.vielsack@hs-pforzheim.de

Ben Willlecke

Analyse der Abfallzusammensetzung und der kommunalen Abfallwirtschaft in Musanze, Ruanda

***Abstract**: Als Teil einer Zusammenarbeit zwischen der ruandischen Hochschule INES Ruhengeri und Ingenieure ohne Grenzen e.V. behandelt diese Arbeit die Abfallbewirtschaftung des Bezirk Musanze im Norden Ruandas, geprägt von Urbanisierung und wirtschaftlichem Aufschwung. Untersuchungen im Stadtgebiet, Befragungen von relevanten Akteuren und Analysen von Abfallproben bilden die Grundlage für die Bestandsaufnahme des Abfallwirtschaftssystems, wobei besonders die lokalen Praktiken der Sammlung, dem Recycling und der Entsorgung von Abfällen betrachtet wurden. Eine skizzierte Materialflussanalyse schätzt das Abfallaufkommen auf 125 Tonnen pro Tag, von denen laut Zensus knapp 20% gesammelt und auf der Müllhalde in Cyuve entsorgt werden. Eine manuelle Sortieranalyse und eine bildgestützte visuelle Analyse ergaben einen organischen Anteil der Siedlungsabfälle von über 70%, was die Bedeutung der Kompostierung für das Abfallmanagement unterstreicht und signifikante Deponiegasemissionen verursacht (jedoch hauptsächlich aus biogenen Kohlenstoffquellen). Die Studie formuliert Ansätze zum Deponiemanagement, plädiert für eine getrennte Sammlung organischer Abfälle und schlägt weitere Untersuchungen mit der Distriktverwaltung, INES Ruhengeri und Ingenieure ohne Grenzen vor.*

Abbildung 1 – Offene Müllhalde in Cyuve, Musanze mit Blick nach Süden auf ein Sammelfahrzeug

1 Einleitung

Der Distrikt Musanze im Norden Ruandas liegt im gemäßigten tropischen Hochlandklima auf rund 2.200 m üNN und weist einen mittleren Jahresniederschlag von ca. 1.400 mm auf. Im Jahr 2024 zählte der Distrikt rund 495.000 Einwohner, wovon 49 % im urbanen Raum leben. Die hohe Bevölkerungsdichte (ca. 700 Einw./km² ländlich, 2.300 Einw./km² urban) und die fortschreitende Urbanisierung stellen die kommunale Abfallwirtschaft vor erhebliche Herausforderungen. Während die städtische Abfallsammlung nur 18,8 % der Haushalte bedient, entsorgen und verwerten Haushalte im ländlichen Raum ihre überwiegend organischen Abfälle durch häusliche Kompostierung, als Futter für Nutztiere oder auf eigenem Grund. Parallel dazu existiert ein informeller Sektor, der verwertbare Kunststoffe (v. a. PET und Hartplastik) für den nationalen und grenzüberschreitenden Markt sammelt (National Institute of Statistics of Rwanda, 2023).

Ruanda erlebt seit 2002, acht Jahre nach Ende des Völkermords, eine rasante Urbanisierung und großen wirtschaftlichen Aufschwung, aber die Abfallwirtschaftskapazitäten haben mit dem wachsenden

Abfallaufkommen nicht Schritt gehalten. Ziel des Forschungsprojekts ist daher, die Zusammensetzung, Stoffströme und Entsorgungspraktiken in Musanze zu erfassen und im Kontext nationaler Strategien für eine nachhaltige kommunale Abfallwirtschaft zu analysieren.

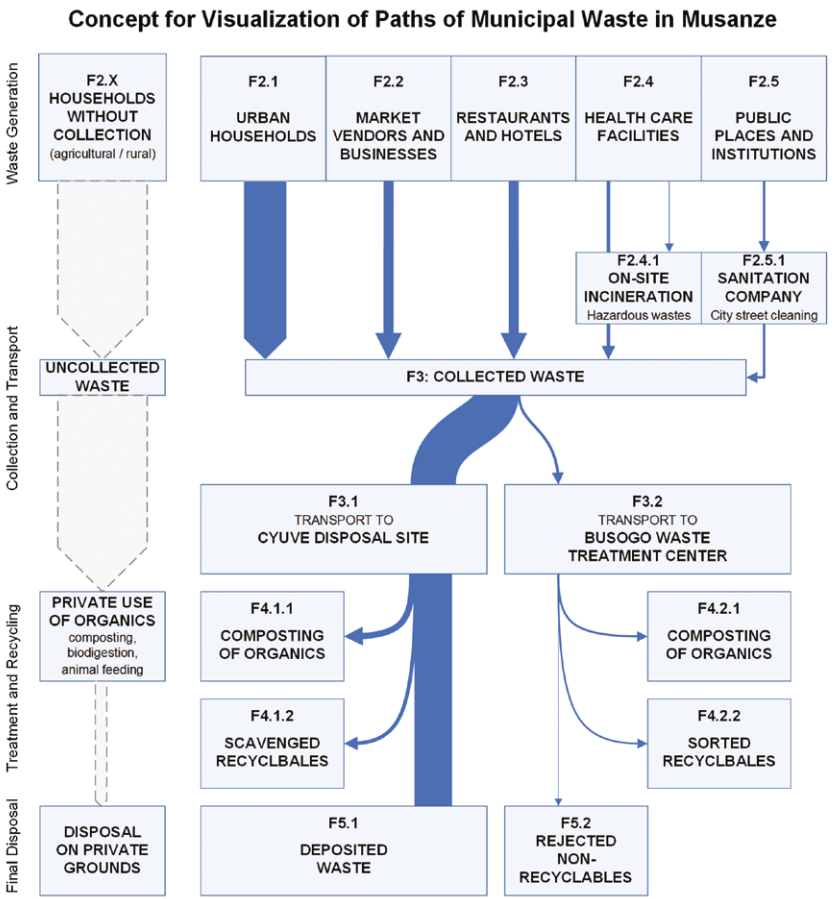


Abbildung 2: Skizzierte Stoffstromanalyse der Abfälle in Musanze

2 Methodik

Die Erhebung erfolgte im Rahmen eines Forschungsprojekts des INES Ruhengeri in Zusammenarbeit mit Ingenieure ohne Grenzen e.V. und lokalen Behörden. Im Februar 2024 wurden über 23 Tage Datenerhebungen zu Abfallmengen, -zusammensetzung und -management durchgeführt. Methodische Ansätze umfassten qualitative Interviews mit Behörden und Unternehmen, die Erstellung einer Stakeholder-Kartierung sowie eine explorative Materialflussanalyse zur Quantifizierung der Stoffströme im Distrikt. Auf der offe-

nen Müllhalde in Cyuve im Osten Musanzes wurden Proben gemischter Haushalts- und Gewerbeabfälle manuell sortiert und gewogen. Zusätzlich wurden Kompostierungsbetriebe, Sortieranlagen und informelle Wertstoffsammelstellen besucht, um den Weg von organischen und recycelbaren Fraktionen nachzuvollziehen. Parallel erfolgte eine visuelle und fotoanalytische Auswertung zur Bestimmung der prozentualen Flächenanteile je Abfallfraktion. Satellitenbilder aus dem Zeitraum 2010 bis 2024 gaben Aufschluss über die Entwicklung der Abfallentsorgung auf der Cyuve Müllhalde.

3 Ergebnisse

Das geschätzte tägliche Abfallaufkommen im urbanen Musanze beträgt etwa 125 Mg, entsprechend rund 0,5 kg pro Einwohner und Tag. Davon werden im Durchschnitt sechs LKW-Ladungen (ca. 22 Mg) pro Tag durch Personal der MZ Company Ltd. zur offenen Müllhalde in Cyuve transportiert. Haushalte entrichten je nach Volumen monatlich etwa 1.000 bis 2.000 RWF, Gewerbebetriebe bis zu 10.000 RWF Gebühren für die Sammlung. Die Müllhalde, auf einer Fläche von ca. 9.000 m² und mit einem seit 2011 angesammelten Abfallvolumen von schätzungsweise 30.000 m³, emittiert jährlich signifikante Mengen an Methan, jedoch überwiegend aus biogenen Kohlenstoffquellen. Ohne Oberflächenabdeckung gelangen Sickerwässer ungehindert in das benachbarte Feuchtgebiet und stellen Umwelt- und Gesundheitsrisiken dar. Informelle Müllsammler ohne Schutzausrüstung, die wiederverwertbare Materialien sammeln und weiterverkaufen, sowie Tiere, die sich von Lebensmittelabfällen ernähren, sind potenziellen Schadstoffen und Krankheitserregern ausgesetzt. Eine von 36 wöchentlichen Fahrzeugladungen wird vom Unternehmen Recycl'Africa angenommen, das im westlichen Sektor von Busogo manuelle Abfallsortierung und Kompostierung betreibt. Gemischte Abfälle werden in wiederverwertbare Fraktionen sortiert und verkauft, sobald sich ein Abnehmer findet – während organische Abfälle in offenen, durch manuelles Umschichten belüftete Kompostmieten (2 x 2 x 0,5 Meter) über ca. 12 Wochen rotten.

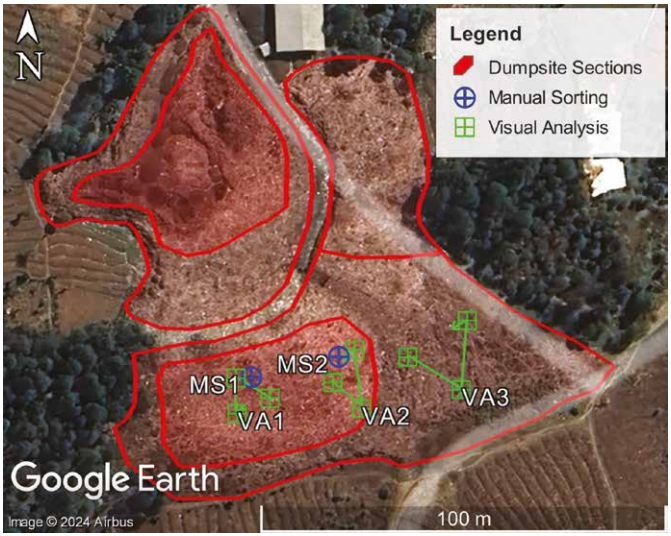


Abbildung 3: Satellitenbild der Cyuve Müllhalde und Kartierung der Probenahmestellen

Die Sortieranalyse von Mischproben aus frischen, sowie bereits rottenden Ablagerungen aus der Cyuve Müllhalde ergab einen organischen Massenanteil von über 70% im kommunalen Abfall, sowie 7% Papier und Karton, 6% Kunststoffe sowie kleinere Anteile (< 2%) an Metall, Glas und Textilien. Diese Zusammensetzung, wenn auch aus sehr geringem Stichprobenvolumen, bestätigt Befunde aus der Hauptstadt Kigali (Isugi et al., 2016; Kabera et al., 2019; Republic of Rwanda, 2022) und unterstreicht das erhebliche Potenzial zur stofflichen und biologischen Verwertung organischer Abfälle bei getrennter Erfassung und Sammlung. 2024 veröffentlichte das Waste Wise Cities Programm der Vereinten Nationen außerdem eine eigene Analyse des Abfallaufkommens in Musanze, deren Ergebnisse weitgehend übereinstimmen (UN Habitat, 2024). Zur Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft in Musanze werden systematische Datenerhebungen, die Qualitätssicherung von Kompost als Sekundärrohstoff sowie die Integration der gewonnenen Erkenntnisse in Bildung und Forschung – etwa im geplanten „Circular Economy“ Seminar am INES-Ruhengeri – empfohlen. Die Verbesserung der Datenbasis zur Abfallwirtschaft muss das Ziel weiterer Forschungen sein, um den Weg in Richtung einer nachhaltigen integrierten Abfallwirtschaft zu ebnen und die ehrgeizigen Ziele der ruandischen Regierung zu erreichen.

Danksagung

Unterstützt und betreut wurde diese Arbeit von Prof. Dr. Iris Steinberg und Julia Mohr sowie vor Ort von Dr. Felicien Sebahire und Eva-Christine Uwamariya und der Hochschule Darmstadt bei der Finanzierung des Forschungsaufenthalts. Die anhaltende Kooperation zwischen INES-Ruhengeri und Ingenieure ohne Grenzen e.V. ist maßgeblich Dr. Mireille Biraro und Dr. Bernd Hense zu verdanken.

Literatur/Quellen

Isugi, J. and Niu, D. (2016) *Research on Landfill and Composting Guidelines in Kigali City, Rwanda Based on China’s Experience*, International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering, vol. 94, DOI: 10.7763/IPCBEE

Kabera, T., Wilson, D. C. and Nishimwe, H. (2019) *Benchmarking performance of solid waste management and recycling systems in East Africa: Comparing Kigali Rwanda with other major cities*, Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, vol. 37, pp. 58–72

National Institute of Statistics of Rwanda (2023) *Fifth Rwanda Population and Housing Census: District Profile: Musanze*

Republic of Rwanda (2022) *National Greenhouse gas Inventory: Report to the United Na-tions Framework Convention on Climate Change*

UN Habitat (2024) *Waste Wise Cities Tool in Musanze, Rwanda*

Kontakt
Ben Willlecke, Student M.Sc. Environmental Engineering
Dänemarks Technische Universität (zuvor Hochschule Darmstadt)
ben.willecke@ingenieure-ohne-grenzen.org

Franziska Zecha

Transparente Stoffströme medizinischer Einwegprodukte im Krankenhaus – Grundlage für ökologische Optimierung und Kreislaufwirtschaft

***Abstract**: Der Gesundheitssektor verursacht erhebliche Treibhausgasemissionen, wobei Einweg-Medizinprodukte einen wesentlichen Beitrag leisten. Die Studie stellt ein konzeptionelles Modell zur Erfassung und Bewertung der Umweltwirkungen dieser Produkte in Krankenhäusern vor. Grundlage ist ein Materialflussmodell, das Beschaffungsdaten und Laboranalysen kombiniert und Ökobilanzen auf Produkt-, Dienstleistungs- und Organisationsebene ermöglicht. Szenarioanalysen zeigen Wechselwirkungen und Zielkonflikte zwischen Umweltwirkungen auf und bilden eine Basis für Strategien der Kreislaufwirtschaft im Gesundheitswesen.*

1 Einleitung

Der Gesundheitssektor trägt erheblich zu den globalen Treibhausgasemissionen bei. In Deutschland entfallen etwa 5 % der nationalen Emissionen auf diesen Bereich (Lenzen et al., 2020). Ein wesentlicher Anteil dieser Emissionen entsteht durch die Nutzung medizinischer Einwegprodukte, deren Einsatz seit den 1970er Jahren stetig zunimmt und während der COVID-19-Pandemie einen Höhepunkt erreichte (Olabi et al., 2024). Rund 90 % der im Gesundheitswesen anfallenden Medizinprodukte sind Einwegartikel, die zu etwa 70 % aus Kunststoffen bestehen (Sousa et al., 2021). Häufige Einwegartikel sind beispielsweise die persönliche Schutzausrüstung, besonders die Handschuhe, sowie Inkontinenzartikel in der Pflege. Diese werden nach Gebrauch entsorgt und verursachen erhebliche Umweltbelastungen wie Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemissionen.

Trotz der hohen ökologischen Relevanz werden in der Krankenhausabfallwirtschaft bislang primär Hygiene, Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsaspekte berücksichtigt. Umwelt- und Kreislaufgesichtspunkte bleiben weitgehend unberücksichtigt. Zur Entwicklung wirksamer Maßnahmen zur Emissions- und Abfallreduktion ist jedoch ein detailliertes Verständnis der zugrundeliegenden Stoffströme erforderlich. Ein solches Verständnis fehlt derzeit, da bislang lediglich eine Untersuchung auf Krankenhausebene vorliegt, die sich auf sieben Produktgruppen beschränkt und keine Differenzierung nach Einsatzbereichen vornimmt (Ivanović et al., 2022).

Ziel der Arbeit ist es, die Produkt- und Materialströme medizinischer Einwegprodukte in Krankenhäusern systematisch zu erfassen, um ihre Umweltauswirkungen zu bewerten und Optimierungspotenziale aufzuzeigen.

2 Methoden

Dafür werden Krankenhaus-Einkaufsdaten auf Fachbereichsebene analysiert und mit Praktikern ergänzt, um Anfallorte, Sortierung und Entsorgungswege zu identifizieren. Auf dieser Basis soll ein umfassendes Stoffstrommodell entwickelt werden, das den Lebensweg der Einwegprodukte von der Beschaffung bis zur

Entsorgung abbildet. Im nächsten Schritt erfolgt dann eine ökobilanzielle Bewertung der ermittelten Stoffströme nach ISO 14040/44 (International Organization for Standardization, 2006a, 2006b), um wesentliche Umweltwirkungstreiber zu identifizieren.

Durch die Analyse entsteht erstmals ein transparentes Stoffstrombild eines Krankenhauses, das die bislang bestehende „Black Box“ zwischen Beschaffung und Entsorgung auflöst. Die Ergebnisse leisten einen Beitrag zur Reduktion der Umweltbelastung medizinischer Einwegprodukte und bilden eine Grundlage für zukünftige Strategien zur Kreislaufwirtschaft im Gesundheitswesen.

Die nachfolgenden Kapitel stellen den aktuellen Stand der methodischen Umsetzung und Modellkonzeption dar.

3 Konzeptioneller Stand und methodische Umsetzung

Da die Laboruntersuchungen noch andauern, werden im Folgenden die bisherigen Ergebnisse zur Strukturierung und Datenerhebung dargestellt.

3.1 Struktur des Stoffstrommodells und Datengenerierung

Im ersten Arbeitsschritt wurde eine grundlegende Struktur für das Stoffstrommodell entwickelt, in der die ermittelten Material- und Produktströme systematisch abgebildet werden sollen. Diese Struktur dient als Rahmen, um sämtliche relevanten Flüsse konsistent zu erfassen und darzustellen.

Die Modellstruktur wurde in enger Abstimmung mit drei kooperierenden Krankenhäusern erarbeitet, die als Projektpartner und Datenlieferanten fungieren. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass das Modell sowohl die organisationsspezifischen Abläufe als auch die unterschiedlichen Fachbereiche realitätsnah abbildet. Die Datengrundlage erfolgt auf Stations- bzw. Bereichsebene, wodurch ein hohes Maß an Detaillierung erreicht und ein präzises Stoffstrombild des jeweiligen Krankenhauses erzeugt werden kann.

Neben der Zuordnung der Produkte zu den jeweiligen Krankenhausbereichen wird dokumentiert, in welche Entsorgungsbehälter die Materialien typischerweise gelangen (wie Spitz- oder Nassabwurf) und welche Entsorgungswege sich daraus ergeben. Damit ermöglicht das Modell die Nachverfolgung des gesamten Lebensweges der Einwegprodukte innerhalb des Krankenhauses.

Darüber hinaus wird das Stoffstrommodell so konzipiert, dass es als Grundlage für ökobilanzielle Bewertungen auf drei Ebenen dienen kann: Produkt-, Dienstleistungs- und Organisationsebene. Insbesondere die Abbildung der Dienstleistungsebene erfordert eine gesonderte Modelllogik, da hier komplexe medizinische Prozesse und abrechnungsrelevante Faktoren berücksichtigt werden müssen. Zur Quantifizierung des Materialeinsatzes pro erbrachte medizinische Leistung werden Parameter aus der Krankenhauspraxis herangezogen, darunter OPS-Schlüssel, Verweildauer, Pflegepersonaluntergrenzen (PpUG) und Pflegepersonalregelung (PPR). OPS-Schlüssel erfassen Art und Anzahl medizinischer Prozeduren und erlauben eine Zuordnung des Verbrauchsmaterials pro Eingriff. Die Verweildauer spiegelt den zeitlich bedingten Materialverbrauch wider, während PpUG und PPR die Pflegeintensität und den Personalbedarf abbilden, welche indirekt den Materialeinsatz beeinflussen. Diese Parameter werden als Eingangsgrößen in das Modell übernommen, um den durchschnittlichen Materialverbrauch pro Patienten bzw. Leistung realistisch zu berechnen.

Das resultierende Stoffstrommodell soll somit in der Lage sein, je nach Analyseziel ökobilanzielle Bewertungen für einzelne Produkte, medizinische Dienstleistungen oder ganze Organisationseinheiten zu generieren und dadurch eine fundierte Grundlage für ökologische Optimierungsstrategien im Krankenhausbetrieb zu schaffen.

3.2 Methodik der Laboruntersuchungen

Da die Materialzusammensetzung vieler Einwegprodukte herstellerseitig nicht vollständig offengelegt ist, bilden die Laboruntersuchungen eine zentrale Grundlage für die Modellierung der Stoffströme. Für die Untersuchungen wurde eine repräsentative Auswahl von rund 90 % der im Beschaffungsvolumen enthaltenen Produkte getroffen. Die Produkte wurden in ihre Einzelkomponenten zerlegt und nach Materialarten strukturiert. Soweit die Komponenten trennbar waren, wurde der Materialeinsatz pro Komponente erfasst, um die Masse der verwendeten Materialien exakt zu quantifizieren. Jedes Modul erhielt eine eindeutige Kennzeichnung und wurde in separaten Druckbeuteln gelagert, um eine eindeutige Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten. Anschließend erfolgte die materialanalytische Untersuchung.

Zur materialanalytischen Untersuchung kamen die ATR-FTIR-Spektroskopie (Attenuated Total Reflection Fourier-Transform Infrared Spectroscopy) sowie die Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie (RFA) zum Einsatz. Die ATR-FTIR-Spektroskopie dient der Identifikation von Polymerarten und Additiven auf Basis charakteristischer Infrarotspektren (Stuart, 2004), während die RFA eine Bestimmung der elementaren Zusammensetzung metallischer Legierungen ermöglicht (Beckhoff et al., 2006). Die Kombination beider Verfahren gewährleistet eine umfassende Charakterisierung sowohl polymerer als auch metallischer Komponenten.

Die erhobenen Analysedaten wurden anschließend tabellarisch zusammengeführt, auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft und falls erforderlich durch einen manuellen Spektrenvergleich verifiziert. Dadurch konnte die Zuverlässigkeit der Materialidentifikation sichergestellt und eine belastbare Datengrundlage für die nachfolgende ökobilanzielle Bewertung geschaffen werden.

3.3 Ökobilanzielle Bewertung

Die ökobilanzielle Bewertung der ermittelten Stoffströme erfolgt auf Grundlage marktbasierter Emissionsfaktoren für Materialien und Entsorgungsprozesse. Die erforderlichen Datensätze werden überwiegend aus der Datenbank ecoinvent (Version 3.11) entnommen.

Das zuvor entwickelte Stoffstrommodell wird in der Software Umberto 11 abgebildet, um Material- und Energieflüsse in ihrer Gesamtheit erfassen und bilanzieren zu können. Auf dieser Basis können die wesentlichen Umweltwirkungstreiber entlang des Lebensweges medizinischer Einwegprodukte identifiziert werden. Die Bewertung erfolgt gemäß den Normen ISO 14040 und 14044 und umfasst die Wirkungskategorien Klimawandel (Global Warming Potential 100) und Ressourcenverbrauch (Abiotic depletion potential for non-fossil resources).

3.4 Entwicklung und Konzeption von Szenarien

Zur Identifikation von Optimierungspotenzialen werden auf Grundlage des Stoffstrommodells Szenarien entwickelt, die verschiedene Ansätze zur ökologischen und kreislaufwirtschaftlichen Verbesserung untersuchen. Dabei werden insbesondere Maßnahmen zur Materialsubstitution, Mehrwegnutzung, Recyclingfähigkeit sowie Optimierungen in der Entsorgungslogistik betrachtet.

In die Szenarien fließen zusätzlich krankenhausspezifische Verbrauchsdaten ein, darunter Energie- und Wasserverbräuche. Durch die Kombination dieser Daten mit den modellierten Materialflüssen können ökologische Auswirkungen unterschiedlicher Strategien quantitativ abgeschätzt und miteinander verglichen werden.

Das Stoffstrommodell ermöglicht hierbei eine ganzheitliche Systembetrachtung, bei der Wechselwirkungen zwischen einzelnen Prozessen und Wirkungskategorien berücksichtigt werden.

So werden bei der Untersuchung einzelner Maßnahmen auch Zielkonflikten und Effektverschiebungen zwischen verschiedenen Umweltwirkungen, beispielsweise zwischen Klimawandel und Ressourcenverbrauch, berücksichtigt.

Das Ziel der Szenarienentwicklung besteht somit darin, nicht nur punktuelle Verbesserungen zu identifizieren, sondern ein umfassendes Verständnis der Systemzusammenhänge zu schaffen. Dadurch lassen sich Strategien entwickeln, die eine tatsächliche ökologische Gesamtentlastung des Krankenhausbetriebs ermöglichen und als Grundlage für nachhaltige Entscheidungsprozesse dienen.

4 Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt einen konzeptionellen und methodischen Zwischenstand dar. Das entwickelte Stoffstrommodell bildet die Grundlage für eine künftig ganzheitliche ökologische Bewertung medizinischer Produkte und Behandlungen im Krankenhaus. In einem nächsten Projektschritt werden die laufenden Laboranalysen abgeschlossen und die ermittelten Materialdaten vollständig in das Modell integriert. Auf dieser Basis wird eine detaillierte ökobilanzielle Bewertung der wichtigsten Produktgruppen ermöglicht, durch die zentrale Umweltwirkungstreiber präzise identifiziert werden können.

Anschließend werden Szenarien zur ökologischen Optimierung entwickelt, die unter anderem Materialsubstitution, Mehrwegnutzung, verbesserte Recyclingfähigkeit sowie Anpassungen in der Entsorgungslogistik untersuchen. Durch die Verknüpfung der Stoffstromdaten mit krankenhausspezifischen Energie- und Leistungsdaten entsteht ein umfassendes Bild des Ressourcenverbrauchs und der Umweltwirkungen entlang medizinischer Prozesse.

Die Integration der erhobenen Daten in ein automatisiertes, dynamisches Modell zur bereichsspezifischen visuellen Abbildung der Produkt- und Materialströme innerhalb des Krankenhauses stellt derzeit eine methodische Herausforderung dar, insbesondere hinsichtlich der geeigneten Modellierungslogik und der Auswahl entsprechender Softwarelösungen.

In diesem Modell soll auch die Integration von Behandlungspfaden in das Modell ermöglicht werden, um die Bilanzierung auch auf Dienstleistungs- und Organisationsebene darzustellen. Hierzu werden Abrechnungsstrukturen wie Pflegepersonaluntergrenzen (PpUG) und Pflegepersonalregelung (PPR) berücksichtigt und gemeinsam mit Krankenhäusern praktisch erprobt.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten sollen zeigen, wie das Modell gezielt zur Identifikation ökologischer Hotspots und zur Ableitung von Maßnahmen zur Reduktion von Umweltwirkungen eingesetzt werden kann. Perspektivisch lässt sich der Ansatz weiterentwickeln, um über standardisierte Produktinformationen oder digitale Schnittstellen eine breitere Anwendung in der Praxis zu ermöglichen.

Langfristig kann der modellbasierte Ansatz dazu beitragen, Strategien der Kreislaufwirtschaft im Gesundheitswesen zu unterstützen und die Umweltperformance von Krankenhäusern messbar zu verbessern. Damit leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zur ökologischen Transformation des Krankenhausbetriebs.

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

Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., Wolff, H., 2006. Handbook of practical X-ray fluorescence analysis. Springer, Berlin.

International Organization for Standardization, 2006a. ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.

International Organization for Standardization, 2006b. ISO 14044 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.

Ivanović, T., Meisel, H.-J., Som, C., Nowack, B., 2022. Material flow analysis of single-use plastics in healthcare: A case study of a surgical hospital in Germany. Resources, Conservation and Recycling 185, 106425. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106425

Lenzen, M., Malik, A., Li, M., Fry, J., Weisz, H., Pichler, P.-P., Chaves, L.S.M., Capon, A., Pencheon, D., 2020. The environmental footprint of health care: a global assessment. The Lancet Planetary Health 4, e271–e279. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30121-2

Olabi, A.G., Shehata, N., Obaideen, K., Sayed, E.T., Mahmoud, M., AlMallahi, M.N., Abdelkareem, M.A., 2024. COVID-19: Medical Waste Management, Impact on Sustainable Development Goals, and Bibliometric Analysis. Chemical Engineering & Technology 47, 4–19. https://doi.org/10.1002/ceat.202300046

Sousa, A.C., Veiga, A., Maurício, A.C., Lopes, M.A., Santos, J.D., Neto, B., 2021. Assessment of the environmental impacts of medical devices: a review. Environ Dev Sustain 23, 9641–9666. https://doi.org/10.1007/s10668-020-01086-1

Stuart, B.H., 2004. Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications, 1st ed, Analytical Techniques in the Sciences. Wiley. https://doi.org/10.1002/0470011149

Kontakt

Franziska Zecha, wissenschaftliche Mitarbeiterin
Hochschule Pforzheim
E-Mail: franziska.zecha@hs-pforzheim.de
Tel.: 07231/28-6122
www.hs-pforzheim.de

ISBN 978-3-99106-187-8