



**RESSOURCEN  
NEU  
DENKEN.**

Deutsche Gesellschaft für  
Abfallwirtschaft e.V.

12. WISSENSCHAFTSKONGRESS

## **Abfall- und Ressourcenwirtschaft**

am 9. und 10. März 2023  
an der Technischen Universität Hamburg

In Zusammenarbeit mit dem  
CREM Institute – Circular I Resource I Engineering I Management der  
Technischen Universität Hamburg



*innsbruck university press*





Deutsche Gesellschaft für  
Abfallwirtschaft e.V.

Tagungsband

## 12. WISSENSCHAFTSKONGRESS

am 9. und 10. März 2023

an der Technischen Universität Hamburg

Präsentiert von:



**STADTREINIGUNG.HAMBURG**

In Zusammenarbeit mit







## 12. WISSENSCHAFTSKONGRESS

### **Abfall- und Ressourcenwirtschaft**

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

## Wissenschaftliche Organisation

Prof. Dr.-Ing. Anke Bockreis (Univ. Innsbruck)  
Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich (TU Dortmund)  
Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme (FH Münster)  
Prof. Dr.-Ing. Martin Kranert (Univ. Stuttgart)  
Prof. Dr. Mario Mockler (OTH Amberg-Weiden)  
Prof. Dr. mont. Michael Nelles (Univ. Rostock/DBFZ Leipzig)  
Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker (RWTH Aachen)  
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rettenberger (HS Trier)  
Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter (TU Berlin)

Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V.  
DGAW  
Nieritzweg 23  
14165 Berlin  
Tel.: 030.84 59 14 77  
E-Mail: [info@dgaw.de](mailto:info@dgaw.de)  
[www.DGAW.de](http://www.DGAW.de)

© *innsbruck* university press, 2023  
Universität Innsbruck  
1. Auflage  
Alle Rechte vorbehalten.  
[www.uibk.ac.at/iup](http://www.uibk.ac.at/iup)  
ISBN 978-3-99106-095-6  
DOI 10.15203/99106-095-6

Der Kongress wird unterstützt von:



**STADTREINIGUNG.HAMBURG**



CIRCULAR | RESOURCE  
ENGINEERING | MANAGEMENT



**eew**

Energy from Waste



**STORK**  
UNTERNEHMENSGRUPPE



## Beirat:

Prof. Dr. Christian Abendroth (B TU Cottbus-Senftenberg)  
Prof. Dr. rer. pol. Heinz Georg Baum (HS Fulda)  
Prof. Dipl.-Ing. Frank Baur (HTW des Saarlandes)  
Prof. Dr.-Ing. Burkhard Berninger (OTH Amberg-Weiden)  
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Bernd Bilitewski (Intecus GmbH)  
Prof. Dr.-Ing. Carla Cimattoribus (HS Esslingen)  
Prof. Dr.-Ing. Joachim Dach (HS Konstanz)  
Prof. Dr.-Ing. habil. Christina Dornack (TU Dresden)  
Prof. Dr.-Ing. Silke Eckhardt (HS Bremen)  
Hon. Prof. Dr.-Ing. Matthias Franke (Fraunhofer UMSICHT)  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Fricke (TU Braunschweig)  
Prof. Dr. sc. agr. Stefan Gäth (Univ. Gießen)  
Prof. Dr.-Ing. Gilian Gerke (HS Magdeburg-Stendal)  
Prof. Dr.-Ing. Christian Gierend (HTW Saar)  
Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann (TU Clausthal)  
Prof. Dr. Kathrin Greiff (RWTH Aachen)  
Prof. Dr.-Ing. Susanne Hartard (HS Trier)  
Prof. Dr. Andrea Heilmann (HS Harz)  
Prof. Dr.-Ing. Stefanie Hellweg (ETH Zürich)  
Prof. Dr. Peter Hense (HS Bochum)  
Prof. Dr. Soraya Heuss-Aßbichler (LMU München)  
Prof. Dr.-Ing. Robert Holländer (Univ. Leipzig)  
Prof. Dr. rer. nat. techn. Marion Huber-Humer (BOKU Wien)  
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kraft (Univ. Weimar)  
Prof. Dr.-Ing. Kerstin Kuchta (TU Hamburg)  
Prof. Dr. David Laner (Univ. Kassel)  
Prof. Dr.-Ing. Achim Loewen (HAWK Göttingen)  
Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller (Univ. Weimar)  
Prof. Dr.-Ing. Annette Ochs (HS Wismar)  
Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Roland Pomberger (Univ. Leoben)  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz (RWTH Aachen)  
Dipl.-Ing. Dr. mont. Arne Ragoßnig (RM Umweltkonsulten ZT GmbH)  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Günter Ramke (HS Ostwestf.-Lippe)  
Prof. Dr. techn. Helmut Rechberger (TU Wien)  
Prof. Dr.-Ing. Alfons Rinschede (FH Gelsenkirchen)  
Prof. Dr.-Ing. Stefan Salhofer (BOKU Wien)  
Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek (TU Darmstadt)  
Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Scheffold (FH Bingen)  
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Scholz (TU Clausthal)  
Prof. Dr.-Ing. Helmut Seifert (KIT)  
Prof. Dr.-Ing. Rainer Stegmann (TU Hamburg)  
Prof. Dr.-Ing. Iris Steinberg (HS Darmstadt)  
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel (TH Nürnberg)  
Prof. Dr. Daniel Vollprecht (Univ. Augsburg)  
Prof. Dr.-Ing. Rénatus Widmann (Univ. Duisburg-Essen)  
Hon. Prof. Dr. Martin Wittmaier (HS Bremen)  
Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky (HS Pforzheim)  
Prof. Dr.-Ing. Christoph Wunsch (HS Merseburg)

## Vorwort

Im letzten Jahr habe ich im Vorwort zum Wissenschaftskongress in Dresden festgestellt: es gibt weiter, trotz Corona, eine gute Zukunft für den Wissenschaftskongress. Und das stimmt. Wir hatten wieder viele eingereichte Abstracts, engagierte Beiräte und Organisatoren (TU Hamburg und DGAW) und einen eben- solchen lokalen Unterstützer (Stadtreinigung Hamburg AöR) sowie überregionale Sponsoren. Allen sei dafür herzlichst gedankt.

Die Zeiten gehen weiter und so hat auch der Wissenschaftskongress einige Entwicklungen erfahren. So gibt es ihn nun bereits zum 12. Mal, aber zum ersten Mal gibt es von diesem Kongress keinen Tagungs- band mehr als Printversion. Für diejenigen, die die Papierversion bevorzugen und ihr CO<sub>2</sub>-Budget ander- weitig ausgleichen, gibt es eine Print-on-Demand-Version.

Warum dieser Wissenschaftskongress? Es sollen die Forschungsergebnisse junger Wissenschaftler\*- innen vorgestellt werden. Dabei soll ein intensiver Austausch unter den verschiedenen Einrichtungen gepflegt werden. Es soll aber auch die Wissenschaft auf dem Gebiet der Abfall-/Kreislaufwirtschaft weiterentwickelt werden, denn die Wissenschaft gewinnt von Jahr zu Jahr eine immer größer werdende Bedeutung. Menschen, die sich auf der Straße oder sonst wo festkleben, berufen sich in ihrer Motivation auf die Wissenschaft. Doch eigentlich ist es das Ziel der Wissenschaft, so überzeugende Ergebnisse zu liefern, dass eine Gesellschaft so viel Vertrauen darin entwickelt, dass sie für einen erstrebenswerten Fortschritt und ein gedeihliches gesellschaftliches Zusammenleben bereit ist, akzeptierte Ergebnisse frei- willig umzusetzen. Zu diesen Punkten leistet der WIKO einen wesentlichen Beitrag.

In diesem Kontext ist zu erwähnen, dass die Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft vor kurzem die Akademie Kreislaufwirtschaft initiierte. Sie stützt sich im Wesentlichen auf die Beiräte dieses Kongresses und soll wissenschaftlich abgeleitete Befunde der Fachwelt zur Verfügung stellen.

Auch dieses Jahr wird der Wissenschaftskongress zwei intensive Tage der Information und des Austausches bieten. Von jungen Wissenschaftler/innen werden in Vorträgen und mit Postern komprimiert Ergebnisse präsentiert. Das zeichnet diesen Kongress aus.

Nochmals herzlichen Dank an alle: Frau Prof. Dr. Kerstin Kuchta, Herrn Prof. Dr. Siechau und ihre Teams als Gastgeber vor Ort, der DGAW als Organisatorin, dem Beirat, den Gestaltern des E-Tagungsbandes, den Unterstützern und Sponsoren.

Der Unterzeichner ist weiterhin begeistert und findet, dass wir auf einem guten Wege sind. Der 13. Kongress steht schon bevor.

Für die Herausgeber  
Ihr Gerhard Rettenberger



# Inhalt

## KAPITEL I – VORTRÄGE

### Teil 1 Recycling

*Moritz Petzold*

Nassmechanische Zerkleinerung und Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien  
aus Elektrofahrzeugen zur optimierten Lithium-Rückgewinnung ..... 19

*Jutta Geier, Márton Bredács, Gernot Oreski*

Polypropylene recycling – evaluation of the feedstock and possible improvements  
through enhanced sorting techniques ..... 25

*Lea Gritsch, Gisela Breslmayer, Ricarda Rainer, Jakob Lederer*

Wie entsorgen Konsument:innen zerlegbare Mehrkomponenten-Verpackungen  
und was bedeutet das für die reale Recyclingfähigkeit? ..... 31

*Fabian Roemer, Pierre Buyze, Norbert Effertz, Peter Quicker*

Chemisches Recycling: Untersuchungen zum thermochemischen Verhalten  
von SBR-Matratzenschaum ..... 37

### Teil 2 Kreislaufwirtschaft I

*Liselotte Schebek, Julian Baehr, Tabea Hagedorn, Alice do Carmo Precci Lopes,  
Vanessa Zeller*

Die Entsorgungswirtschaft im Kontext der Klimapolitik – Rahmenbedingungen,  
Instrumente und Entwicklungen ..... 47

*Wiebke Hagedorn, Kathrin Greiff*

The Development of Steel Products in Line with the Circular Economy Principles ..... 51

*Jannick Schmidt, Maximilian Auer, Jörg Woidasky*

Einflussfaktoren auf das Leichtverpackungsabfall-Aufkommen ..... 57

### Teil 3 Bau

*Ellen Sterk*

Willingness to pay for recycled aggregates in concrete .....	67
--	----

*Wojciech Walica, Sabine Flamme*

Bewertung der Recyclingfähigkeit gipshaltiger Abfälle in der Gipsfaserplattenproduktion .....	73
--	----

*Pauline Jegen*

RC-Beton: Nutzung von rezyklierter Gesteinskörnung für die Betonherstellung in Betonfertigteilen .....	79
---	----

### Teil 4 Thermik

*Iveta Vateva, David Laner*

Feinfraktion von HMV-Aschen – unter welchen Bedingungen ist eine Verwertung als Bindemittelersatz möglich? .....	85
---	----

*Dominik Blasenbauer, Julia Mühl, Johann Fellner, Jakob Lederer*

Vergleich der Qualität und Menge an Wertstoffen in Schlacken aus Rost- und Wirbelschichtfeuerung von Siedlungsabfällen .....	89
---	----

*Matthias Schnell, Kirsten Stark, Peter Quicker*

Thermische Klärschlammbehandlung an dezentralen Standorten – Versuchsbetrieb einer Wirbelfeuerung .....	95
--	----

### Teil 5 Kreislaufwirtschaft II

*Veronika Kladnik, Sabine Dworak, Therese Schwarzböck*

Charakterisierung von Abfällen aus dem öffentlichen Raum – Fallstudie der Stadt Krems .....	103
--	-----

*Andrea Lück*

Modell zur Wahl von Geschäftsmodellen für neuartige Sanitärsysteme .....	109
--	-----

*Cinthya Lara, Dominik Leverenz, Gerold Hafner, Jingjing Huang,  
Claudia Maurer, Glykeria Duelli*

Comparative study of demand forecasting methods for efficient food waste reduction using real data from small and medium-sized bakeries in Germany .....	115
---	-----



## Teil 6 Bio

<i>Arina Kosheleva, Jan Maarten Braack, Kerstin Kuchta</i> Investigation of in-situ hydrogen biomethanation of food waste .....	123
<i>Tayyeb Zeirani Nav, Thomas Pümpel, Angela Hoffman, Anke Bockreis</i> Adsorption of dissolved organic materials from biotreated landfill leachate onto biochars .....	129
<i>Selina Nieß, Sebastian Dietrich, Marco Klemm</i> Von Abfallbiomasse zum Biokraftstoff – geeignete Katalysatoren für eine direkte Biogasmethanisierung .....	133
<i>David Gaeckle, Eckhard Kraft</i> Wirkung von Pyrolysekohle in der batchbetriebenen Bioabfallvergärung .....	139

## KAPITEL II – POSTER

<i>Ahunoabobirim Bosompem Agya, André Rückert, Christina Dornack</i> Effectiveness of Traditional Waste Management System of Rural Communities: A Case Study in the Kwahu East District, Ghana .....	147
<i>Mustafa Kemal Ak, Axel Steffens, Cinthya Lara, Volker Preyl, Jingjing Huang, Claudia Maurer, Glykeria Duelli</i> Faserrückgewinnung aus kommunalem Bioabfällen zur Herstellung kompostierbarer Pflanzentöpfe .....	153
<i>Ayah Alassali, Kerstin Kuchta</i> Closed-loop recycling of plastics: Quality impacts on plastics circularity .....	159
<i>Anna-Caroline Assmann, Kathrin Greiff</i> Zerkleinerung von NdFeB-Magneten im Labormaßstab – Ermittlung optimaler Betriebsparameter für eine schonende Zerkleinerung .....	165
<i>Maximilian Auer, Jannick Schmidt, Jörg Woidasky</i> Der „Gelbe 100-Teile-Sack“ – Probenchargen-Konzeption .....	173
<i>Savannah Baptist, Christian Abendroth</i> A systematic review on Carbon Credits .....	179
<i>Maximilian Barth</i> Acidogenese Manipulator – AcidManip .....	185

<i>Ässia Boukhatmi</i> Entwicklung einer digitalen Plattform zur Förderung datengestützter zirkulärer Praktiken in der Solarindustrie .....	189
<i>Gisela Breslmayer, Dominik Blasenbauer, Lea Gritsch, Anna-Maria Lipp, Jakob Lederer</i> Faseraufbereitungsversuch mit automatisiert sortiertem Papier aus dem Restmüll .....	193
<i>Zhi Kai Chong, Kerstin Kuchta</i> Potential quality improvements of recycled plastics considering additional plastic packaging separation scenarios: A compositional analysis .....	197
<i>Tommy Ender, Vicky Shettigondahalli Ekanthalu, Jan Sprafke, Michael Nelles</i> Anaerobversuche mit Prozesswasser aus der HTC von Klärschlamm .....	205
<i>Felix Feher, J. Mühl, S. Hofer, S. Paul, Stefan Skutan, J. Lederer</i> Eigenschaften von Beton aus natürlichen und industriell hergestellte Gesteinskörnungen aus Müllverbrennungsgaschen .....	211
<i>Florian Feucht, Philipp Sedlazeck, Karl Friedrich, Theresa Sattler, Roland Pomberger</i> At the beginning of Project ReSoURCE .....	217
<i>Evelyn Finkbeiner &amp; Stefan Gäth</i> Zigarettenfilter als potenziell gefährlicher Abfall – Bewertung im Kontext des Europäischen Abfallverzeichnisses .....	223
<i>Fabian Gievers, Achim Loewen, Michael Nelles</i> Ökobilanzielle Bewertung der HTC und Pyrolyse von Klärschlamm .....	230
<i>Julius Hecher, Anke Bockreis</i> The Transition of Waste Management into a Circular Economy .....	235
<i>Simon Hofer, Jakob Lederer</i> der Produktqualität einer industriell hergestellten Gesteinskörnung aus Müllverbrennungs-Bettaschen als Zuschlagsstoff für Beton .....	241
<i>Pablo Kählig, Wolfgang Ipsmiller, Andreas Bartl</i> Recycling von Baumwoll-Polyester-Mischtextilien .....	247
<i>Magdalena Kitzberger</i> Die Wahrnehmung von geplanter Obsoleszenz in der deutschen Öffentlichkeit .....	251

*Nils Klemeyer*

Anwendung von Kavitation zur Trennung von Leichtfraktionen aus dem Hausmüll  
mit anschließender Analytik ..... 257

*Hannah Köhler, Karoline Raulf, Kathrin Greiff*

Aufbau einer Materialdatenbank zur Förderung des Verständnisses und der  
Umsetzung der Kreislaufwirtschaft ..... 261

*Bettina Krucker, Jingjing Huang, Claudia Maurer, Glykeria Duelli*

Die Verwertung organischer Reststoffe zu Futtermischungen für die Larven  
der Schwarzen Soldatenfliege in einer Insektenbioraffinerie ..... 267

*Anna-Maria Lipp, Dominik Blasenbauer, Jakob Lederer*

Simple (Screening) Does the Trick – Siebklassierung zur Wertstoffanreicherung  
in Outputs von Restmüllsplittingsanlagen ..... 271

*Markus Meissner, Sabrina Lichtnegger, Scott Gibson, Rhodri Saunders*

Evaluierung des Abfallvermeidungspotenzials zwischen chirurgischen  
Einweg- und Mehrweg-Klammernahtinstrumenten ..... 277

*Anne Mich, Klara Theobald, Susanne Hartard*

CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale durch die Implementierung einer Mehrweg- und  
Kaskadenwirtschaft am Umwelt-Campus Birkenfeld ..... 281

*Julia Mühl, Jakob Lederer*

Glasrückgewinnung aus Rost- und Bettaschen aus der Müllverbrennung ..... 287

*Jan Maurice Nowara*

Optimierte Datenerfassung an einem Photovoltaik-Modul-Prüfstand durch  
den Einsatz von Kondensatoren als variable Last ..... 293

*Pascal Otto, Christian Abendroth*

Untersuchung der mikrobiellen Profile von 70 verschiedenen Biogasanlagen  
und Identifizierung signifikanter technischer und chemischer Einflussgrößen  
auf das Mikrobiom ..... 297

*Elena Pabst, Sebastian Georg, Jan Nowara, Christian Gierend*

Prognose von Zeitreihen in Abhängigkeit der Emissionswerte mit FNN und CNN ..... 303

*Erik Peters, Daniel Wohter, Peter Quicker*

Maritime Abfall- und Abwasserentsorgungstechnologie: Abgasreinigung  
für die thermische Abfallentsorgung auf Schiffen ..... 309

<i>Annika Pruhs, Anina Kusch, Tobias Viere, Jörg Woidasky</i> Zirkuläre Produktentwicklungsmethodik für Serienprodukte .....	313
<i>Ricarda Rainer, Dominik Blasenbauer, Lea Gritsch, Anna-Maria Lipp, Jakob Lederer</i> Charakterisierung von Kunststofffolien in ausgewählten Abfallströmen .....	319
<i>Alisa Rizvan, Karim Khodier, Renato Sarc</i> RFID-Tool zur Partikelverfolgung in der Abfallwirtschaft .....	325
<i>Bettina Rutrecht</i> Innovative Recyclingmöglichkeiten für ausgediente Lithium-Ionen Energiespeichersysteme .....	329
<i>Sarah Schmidt, David Laner</i> Schlüsselfaktoren für den Umweltnutzen der Kunststoffverpackungs- abfallwirtschaft: Status quo und zukünftige Trends .....	335
<i>Leon Schneider, Sebastian Georg, Christian Gierend</i> Konstruktion und Bau eines Wärmeübertragers zur Evaluation von Machine- Learning-Tools für den digitalen Zwilling in der Verfahrenstechnik .....	341
<i>Johannes Roland Scholz</i> Re-Use im Bausektor: Abfallvermeidung oder Vorbereitung zur Wiederverwendung? .....	347
<i>Josef Schottenbauer, Christof Dinkelbach, Christian Schell, Peter Kurzweil</i> Voltammetrische pH-Messung mit Sensoren auf Basis von Metalloxiden .....	353
<i>Sebastian Seyffert, Nicole Schmeißer, Carsten Cuhls</i> Recovery of nutrients from animal slurry .....	359
<i>Axel Steffens, Cinthya Lara, Mustafa Kemal Ak, Volker Preyl, Claudia Maurer, Glykeria Duelli</i> Störstoffentfrachtung von Bioabfall zur Weiterverarbeitung in einer Bioraffinerie .....	365
<i>Franziska Struck</i> Ressourcenplan kommunaler Tiefbau (RekoTi) .....	371
<i>Kyra Atessa Vogt, Iris Steinberg</i> Untersuchung der Auswirkungen des Dispergierens auf die Erzeugung biobasierter Produkte aus biogenen Sekundärabfällen .....	377
<i>Meike Walz, Fabian Gievers</i> Anaerobe Co-Vergärung von Papierschlamm in mechanisch-biologischen Abfallanlagen (MBAs) .....	383

<i>Marco Wehner, Christian Ebner, Dominique Heinrich, Anke Bockreis</i> Energetische und stoffliche Verwertung von Bioabfällen an Kläranlagen .....	389
<i>Franziska Wendel, Frances Eck, Jörg Nispel, Stefan Gäth</i> Nachhaltige Verwendung von Lebensmittelabfällen am Beispiel der Schwarzen Soldatenfliege .....	393
<i>Jacqueline Winkler, Christian Ebner, Anke Bockreis</i> Einsatz von Fällmittel ( $\text{FeCl}_3$ ) zur Steigerung der Entwässerbarkeit von Faulschlamm .....	399
<i>Philipp Witkabel</i> Einfluss einer In-Situ-Methanisierung von $\text{H}_2$ auf die mikrobielle Beschaffenheit und $\text{CH}_4$ -Bildung in einer Flachbett-Methanstufe .....	403
<i>Janus zum Brock, Kerstin Kuchta</i> Klimaschutzpotenzial durch den vermehrten Einsatz von Recyclingbeton in Hamburg .....	409



# KAPITEL I – VORTRÄGE

## TEIL 1 Recycling

Leitung:

Prof. Dr. Kerstin Kuchta





# Nassmechanische Zerkleinerung und Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen zur optimierten Lithium-Rückgewinnung

**Abstract:** Aktuelle Recyclingverfahren von Lithium-Ionen-Batterien konzentrieren sich hauptsächlich auf die metallurgische Rückgewinnung der ökonomisch wertvollsten Metalle wie Kobalt und Nickel. Ziel des AURRELIA-Projektes ist es Lithium-Ionen-Batteriemodule möglichst umfassend zu recyceln. Die verwendete, nassmechanische Zerkleinerung der Batteriemodule zeichnet sich gegenüber anderen mechanischen Prozessen durch einen niedrigeren Energiebedarf sowie den Verzicht auf eine aufwändige Tiefenentladung der Batteriemodule und hohe Schutzmaßnahmen (z.B. Schutzgasatmosphäre) aus. Durch die Kreislaufführung des Prozesswassers lässt sich außerdem das im Wasser gelöste Lithium anreichern und durch anschließende Membran- und Fällungstechniken extrahieren. Mit Hilfe weiterer nass-mechanischer Aufbereitungsschritte kann nicht nur die wertvolle Schwarzmasse von den groben Feststoffen abgetrennt werden, sondern letztere auch noch weiter in die unterschiedlichen Folienfraktionen sowie Gehäuse- und Peripherieteile aufgetrennt werden.

## 1 Einleitung

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) werden aufgrund ihrer hohen Energiespeicherkapazität in unterschiedlichen Formaten/Größen bereits seit Anfang der 1990er Jahre als Stromspeicher eingesetzt. Zur Erreichung der Ziele des „EU Green Deal“ sowie des „Pariser Klimaabkommen“ ist ein zügiger Ausbau der Elektromobilität geplant, der wiederum in einen Anstieg der Produktion von LIB-Zellen resultiert. Elektroautos sind außerdem der größte Wachstumsmarkt der Mobilitätsbranche, mit mehreren Millionen zugelassenen Fahrzeugen seit den 2010er Jahren steigt die Nachfrage nach Energiespeichereinheiten exponentiell an (Pagliaro et al., 2019). Mit der gesteigerten Produktion von LIB gehen zukünftig auch exponentiell steigende Rücklaufzahlen von End-of-Life LIB einher, welche bis zum Jahr 2040 prognostiziert auf ca. 1.500.000 Mg/a ansteigen (Neef et al., 2021). Der Vertrieb und die Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren ist in der Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates (sogenannte Batterie-Richtlinie) geregelt, die mit dem Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriegelsetz – BattG) im Jahr 2009 in nationales Recht umgesetzt wurde. Mit dem aktuellen Vorschlag über eine EU-Batterieverordnung, die die bisherige EU-Batterierichtlinie ersetzen soll, werden zukünftig Phasen des Lebenszyklus von der Rohstoffgewinnung bis zur Batterieentsorgung in den Fokus genommen. Mit dieser soll die Kreislaufführung von Batterien auch durch ambitionierte Verwertungsquoten verbessert werden. (Europäisches Parlament, 2022, BMUV, 2020).

## 2 Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

Das Recycling von End-of-Life LIB aus dem Automobilbereich beginnt überwiegend mit einer Entladung und anschließender Demontage. Darauffolgend werden die so erhaltenen LIB-Module oder -Zellen einer Deaktivierung zugeführt, die thermisch oder mechanisch erfolgen kann (Yu et al., 2021). Je nach weiterer Prozessroute werden die entladenen und demontierten LIB in einem mechanischen Zerkleinerungsschritt aufgeschlossen oder auch direkt pyrometallurgisch weiterbehandelt. Um mögliche exotherme Reaktionen wie Explosion oder Brand zu vermeiden müssen für den Schritt der Aufschlusszerkleinerung Schutzmaßnahmen erfolgen. Diese kann z. B. eine der folgenden Maßnahmen sein (Valio et al., 2017, Steinbild et al., 2017, Li et al., 2018, Harper et al., 2019, Mazuka et al., 2021):

- Deaktivierung der LIB, durch z. B. thermischer Vorbehandlung
- Kryogene Zerkleinerung
- Zerkleinerung unter Schutzgasatmosphäre unter Verwendung von Stickstoff, Kohlenstoffdioxid oder Argon
- Zerkleinerung im nassen Milieu unter Verwendung von Wasser oder Salzlösung

Der erzeugte Output wird anschließend anhand ihrer physikalischen Eigenschaften mittels Siebklassierung, Dichtentrennung und optischen Sortierung in einzelne Fraktionen getrennt. Beginnend mit dem ersten Klassierungsschritt wird die Aktivmasse (Metalle wie Kobalt, Nickel, Mangan, Graphit) abgetrennt, anschließend werden über weitere Trennschritte auch die groben Feststoffe in gewünschte Fraktionen sortiert.

## 3 AURELIA-Projekt

Im AURELIA-Projekt, das im Rahmen des „greenBatt“-Clusters durch das BMBF gefördert wird, wird ein Verfahren für ein umfassendes Recycling von LIB entwickelt, welches neben nassmechanischen Aufbereitungsschritten auch verfahrenstechnische Prozesse zur Lithium-Rückgewinnung aus dem Prozesswasser und der Schwarzmasse sowie zur hydrometallurgischen Rückgewinnung der werthaltigen Schwermetalle (Nickel, Kobalt, Mangan) und die Graphitrückgewinnung berücksichtigt. Ziel ist es, ein Recycling möglichst aller Komponenten zu erreichen und so auch organische Bestandteile wie Elektrolyten sowie die Kunststoffkomponenten zurückzugewinnen. Abbildung 1 zeigt den Prozess im Fließbild. Die auf Modulebene

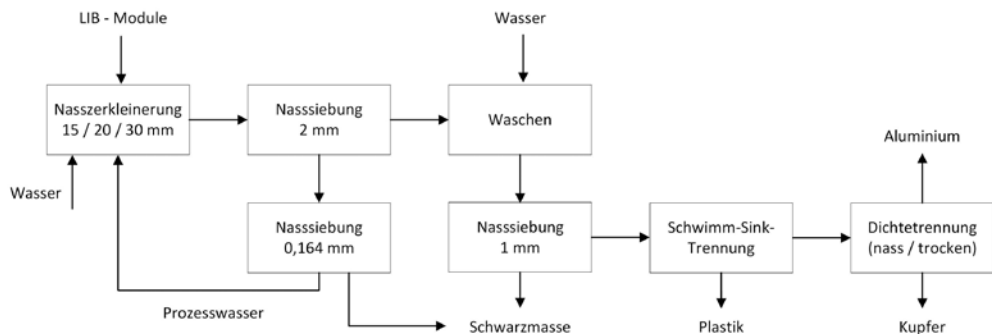


Abbildung 1: Nass-mechanische Prozessroute des AURELIA-Projektes

demontierten LIB werden unter Zugabe von Wasser in einem Wellen-Zerkleinerer mit Radialrotorschern aufgeschlossen. Das Zerkleinerungsaggregat ist dabei mit einem Austragssieb ausgestattet, um die Korngröße der Output-Fraktion kontrollieren zu können. Hier wurden verschiedene Austragssiebgrößen untersucht, um den optimalen Zerkleinerungsprozess für die folgenden Aufbereitungsschritte zu ermöglichen. Erste Ergebnisse zeigen, dass eine kleine Austragssiebgröße (15 mm oder 20 mm) in geringen Rest-Materialverbunden resultiert, was für die weitere mechanische Aufbereitung von Vorteil ist. Durch die erhöhte Zerkleinerungszeit bei kleinen Austragssieben erhöht sich jedoch auch der Feinanteil (kleiner 2 mm), welcher mit mechanischen Aufbereitungsschritten nicht optimal aufgetrennt werden kann.

Der Schredder-Output wird über eine Nasssiebung bei 2 mm klassiert um die Feinfraktion mit der darin enthaltene Schwarzmasse abzutrennen. Das in diesem Aufbereitungsschritt abgetrennte Prozesswasser kann nach Abtrennung der Feststoffe im Kreislauf verwendet werden. Neben der ressourcenschonenden Prozessführung hat die Kreislaufführung auch den Vorteil der Anreicherung des in dem Wasser gelösten Lithiums. Erste Versuche zeigen vielversprechende Ergebnisse. Das Lithium kann in anschließenden verfahrenstechnischen Prozessen (wie u.a. Membranverfahren und Fällung) aus dem Prozesswasser zurückgewonnen werden. Die Schwarzmasse wird durch einen weiteren Klassierungsschritt durch eine Filterpresse bei 64  $\mu\text{m}$  von der Feinfraktion (0 - 2 mm) des Schredderoutputs abgetrennt und anschließend mittels hydrometallurgischen Verfahren weiter aufbereitet, bei denen u.a. mit organischen Lösemitteln die Metalle Kobalt, Nickel, Mangan und Lithium zurückgewonnen werden. Die groben Feststoffe werden nach der Nasssiebung in einem Waschprozess von weiteren Schwarzwasserückständen abgetrennt. Die Integration eines Waschschrittes kann nach ersten Ergebnissen die Abtrennung der Schwarzmasse von ca. 75 % auf 78 bis 82 % erhöhen. Zurückzuführen ist dies auf die auftretenden Reibungskräfte der Partikel mit dem Waschwasser sowie untereinander und an Wänden und am Sieb. Die Separatorfolien werden im anschließenden Schwimm-Sink-Trennschritt durch Dichteseparation abgetrennt. Hierbei zeigt sich die Unterstützung durch Flotation positiv für den Trennerfolg. Nach anschließender Abtrennung der Gehäuseteile können die Separatorfolien mittels Dichtentrennung in Aluminium und Kupfer getrennt werden. Ein Vergleich nasser und trockener Trennverfahren steht hierbei noch aus.

Der in anderen Prozessen notwendige Energiebedarf für die thermische Vorbehandlung, bzw. die hohe Komplexität durch die Erzeugung einer Schutzgasatmosphäre sind in einem nass-mechanischen Aufbereitungsprozess obsolet. Dadurch bleiben die organischen Bestandteile wie unter anderem der Binder weiter in Takt, wodurch jedoch die Separation der Schwarzmasse von den Stromleiterfolien erschwert wird. Mit der mechanischen Beanspruchung durch den Zerkleinerer sowie die weiteren nass-mechanischen Trennprozesse können Großteile der Schwarzmasse gelöst werden, jedoch bleiben Rückstände – vor allem bei Materialverbunden – weiter in der Fraktion der groben Feststoffe. Eine weitere Herausforderung stellt die Dichtentrennung der groben Feststoffe dar: mit Hilfe der Schwimm-Sink-Trennung können bisher zwar qualitativ erfolgreich Teile der Separatorfolien abgetrennt werden, eine Trennung von Kupfer- und Aluminiumfolien steht aber noch aus. In der Literatur wird hier auf Ferrosilizium zurückgegriffen um eine Dichte von ca. 3 g/cm<sup>3</sup> einzustellen, sodass Aluminium (Dichte: 2,8 g/cm<sup>3</sup>) oben aufschwimmt und das Kupfer (Dichte: 8,9 g/cm<sup>3</sup>) absinkt (Legault-Seguín et al., 2016).

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Während viele industrielle Prozesse zum Recycling von LIB sich auf die werthaltigen Metalle Kobalt und Nickel fokussieren, bietet der nass-mechanische Aufbereitungsprozess des AURELIA-Projektes nicht nur eine schlanke Lösung, sondern auch den Vorteil der frühen Lithium-Rückgewinnung durch die Anreicherung und anschließende Fällung im Prozesswasser. Herausforderungen bei der Abtrennung der Schwarzmasse oder der Separation der Grobstoffe werden weiter optimiert. Im weiteren Verlauf des Projektes wird nicht nur ein Scale-Up aller Prozessebenen durchgeführt, sondern auch ein Gesamtkonzept zur Umsetzung auf industrieller Ebene abgeleitet.

## Danksagung

Das Projekt AURELIA wird durch das *Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)* im Rahmen des Kompetenzclusters *Recycling & Grüne Batterie (greenBatt)* gefördert.

## Literatur/Quellen

- Astrid Arnberger, Eda Coskun, Bettina Rutrecht (2018): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien, in: Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 11, Thomé-Kozmiensky-Verlag GmbH, Neuruppin, 2018, ISBN: 978-3-944310-40-4
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2020): Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriesgesetz - BattG) vom 25. Juni 2009 (BGBl. I, S. 1582), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 3. November 2020 (BGBl. I, S. 2280) geändert worden ist.
- Europäisches Parlament (Hrsg.) (2022): Report on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020, 2022
- Gavin Harper, Roberto Sommerville, Emma Kendrick, Laura Driscoll, Peter Slater, Rustam Stolkin, Allan Walton, Paul Christensen, Oliver Heidrich, Simon Lambert, Andrew Abbott, Karl Ryder, Linda Gaines, Paul Anderson (2019): Recycling Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles in Nature 575, S. 75-86, Nr. 7781/2019; DOI: 10.1038/s41586-019-1682-5
- Erin Legault-Seguín, Curtis Mohns, Mike Rylatt (2016): Dense Medium Separation – An Effective and Robust Pre-Concentration Technology, 48th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference, 44, Ottawa, Canada, Januar 2016, S. 1-32, URL: [https://www.ceecthefuture.org/wp-content/uploads/2016/04/CMP2016\\_Dense-Medium-Separation-An-Effective-and-Robust-.pdf](https://www.ceecthefuture.org/wp-content/uploads/2016/04/CMP2016_Dense-Medium-Separation-An-Effective-and-Robust-.pdf), Zugriff: 05.01.2023
- Brian Makuza, Qinghua Tian, Xueyi Guo, Kinnor Chattopadhyay, Dawei Yu (2021): Pyrometallurgical Options for Recycling Spent Lithium-Ion Batteries: A Comprehensive Review, in: Journal of Power Sources, 491, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.229622
- Christoph Neef, Thomas Schmaltz, Axel Thielmann (2021): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau VDMA (Hrsg.), November 2021, URL: [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2021/VDMA\\_Kurzstudie\\_Batterierecycling.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2021/VDMA_Kurzstudie_Batterierecycling.pdf), Zugriff: 11.08.2022

- Mario Pagliaro, Francesco Meneguzzo (2019): The driving power of the electron, in: Journal Physics Energy, 1, DOI: 10.1088/2515-7655/aacd9f
- M. Steinbild (Hrsg.) (2017): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – LithoRec II: Abschlussbericht der beteiligten Verbundpartner, URL: [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/Abschlussbericht\\_LithoRec\\_II\\_20170116.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/Abschlussbericht_LithoRec_II_20170116.pdf), Zugriff: 22.08.2022
- Johanna Valio (2017): Critical review on Li ion battery recycling technologies, URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/27050>, Masterarbeit, Aalto Universit, Zugriff: 05.01.2023
- Li Li, Xiaoxiao Zhang, Matthew Li, Renjie Chen, Feng Wu, Khalil Amine, Jun Lu (2018): The Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries: A Review of Current Processes and Technologies, in: Electrochemical Energy Review 4, 1, S. 461-482, DOI: 10.1007/s41918-018-0012-1
- Dawei Yu, Zhu Huang, Brian Makuza, Xueyi Guo, Qinghua Tian (2021): Pretreatment options for the recycling of spent lithium-ion batteries: A comprehensive review, in: Minerals Engineering, 173, DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107218

## Kontakt

*M. Sc. Moritz Petzold, Wissenschaftlicher Mitarbeiter*  
Fachhochschule Münster, IWARU – Arbeitsgruppe Ressourcen  
Tel.-Nr.: 0251-83-65255  
E-Mail: [m.petzold@fh-muenster.de](mailto:m.petzold@fh-muenster.de)  
Homepage: [www.fh-muenster.de/iwaru](http://www.fh-muenster.de/iwaru)



# Polypropylene recycling – evaluation of the feedstock and possible improvements through enhanced sorting techniques

**Abstract:** *Given the European Union's legal targets to increase the recycling rates for plastics and the huge amounts of polypropylene (PP) waste generated every year, PP recycling is more important than ever. However, PP recyclates often show quality deficiencies compared to virgin materials. In addition to the presence of foreign and polymeric impurities, the mixture of different PP grades often prevents recyclates to meet requirements for certain applications and processing methods. Recyclates from mixed grades exhibit only average properties of the grades they contain, which restricts their suitability for processing methods requiring high melt viscosities (e.g. extrusion). This work aims to investigate the source material for PP recycling and to show how improved sorting could solve the viscosity problem of recyclates.*

## 1 Introduction

Polypropylene (PP) accounted for almost 20% of plastic consumption in Europe in 2020, making it the second most used plastic (PlasticsEurope 2021). Due to the high volume of PP used as packaging material (PlasticsEurope 2021), large amounts of PP waste are generated each year. Therefore, PP recycling is crucial for progress towards a more circular economy for plastics. In order to increase plastics recycling, the European Union has introduced regulatory measures. According to Directive EU 2018/852, the rate of recycled plastic packaging should be at least 50% by 2025 and 55% by 2030 (European Union). In addition, a pledging campaign by the European Commission targets the use of ten million tons recycled plastics in new products (European Commission). However, the lower quality of recyclates compared to virgin materials still restricts their use in certain applications and processing methods (Thoden van Velzen et al. 2020). Due to material degradation and the presence of impurities, either from foreign materials or from other polymers, the required material properties cannot be achieved (Thoden van Velzen et al. 2020; Yin et al. 2015; Vilaplana and Karlsson 2008). However, even if the above-mentioned influences are reduced to a minimum, the properties may still be insufficient. This is due to the mixture of different grades of the same polymer. PP, for example, is available in many different grades that differ in their molecular structure and morphology and thus in their properties and processing characteristics. Producing recyclates from a mixture of different grades leads to only averaged or inferior properties (Alvarado Chacon et al. 2020; Traxler et al. 2022). In terms of processing properties, recyclates from mixed grades exhibit averaged and rather low melt viscosities and are thus unsuitable for processing methods requiring high melt viscosities, such as extrusion (Traxler et al. 2022). Improved sorting methods in mechanical recycling are needed to solve this problem.

Two main objectives are pursued with this work. First is to get an overview about the source material for PP recycling by analysing different PP waste bales. This is done by examining various PP containing-

waste bales and determining the amount of impurities (polymeric and foreign) as well as the proportion of differently processed PP articles. Second is to show possible improvements of PP recyclates through enhanced sorting. The goal is to produce recyclates suitable for processing methods and applications that require higher melt viscosities and thus lower melt flow rates. For this purpose, PP recyclates were produced from a mixed processing method fraction and from a hand-sorted extrusion blow moulding fraction and then compared. Particular attention was paid to the melt flow rate (MFR) value, which is an important processing parameter. A high MFR value indicates that the melt has a low viscosity and is not suitable for processing methods that require high viscosities.

## 2 Experimental

### 2.1 Investigation of PP waste bales

To a PP recycler, PP waste is available in form of different types and qualities of PP waste bales, "pure" PP bales or bales of PP mixed with other polymers such as polyethylene (PE) or polystyrene (PS). In this study, two "pure" PP bales, two mixed polyolefin bales and one PS/PP bale were investigated. Random samples of 5 to 10 kg were taken from each waste bale and manually sorted by polymer type and foreign materials. A distinction was made between the targeted PP, polyethylene (PE), PS (for the PP/PS bale) and impurities (other polymers and foreign materials). The obtained PP fraction was then further sorted by processing methods, these included injection moulding (INM), extrusion blow moulding (EBM), thermoforming (THF) and film extrusion (FLE). In this way, the proportion of waste samples with different melt flow properties could be determined. Tab. 1 shows typical examples for each processing method. To investigate possible seasonal variations, the described procedure was carried out four times a year.

*Table 1: Examples of PP articles of each processing method class*

Processing method	Examples
INM	Food container (ice cream, spreads) and lids, buckets
EBM	Detergent bottles, ketchup bottles, shampoo bottles
THF	Thin-walled plant pots, yoghurt cups, trays
FLE	Pasta packaging, sweets wrapping, toys packaging

### 2.2 Comparison of recyclates from unsorted and sorted fractions

To evaluate the impact of enhanced sorting, a recyclate from a fraction of mixed processing methods (R-MIX) was compared to a recyclate from only extrusion blow moulded waste samples (R-EBM). For the R-EBM, the EBM articles were hand-sorted and their caps, nozzles and film sleeves were removed. This ensured that no other materials or processing methods were present in the EBM stream. In addition, all samples from the mixed and EBM fraction were measured with Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy before processing to confirm that they were all made of PP. The two fractions were then shredded, washed and processed into granules and test specimens. The produced recyclates were compared in various tests. The density was determined and melt flow properties were investigated via melt flow rate (MFR) measurements.



The mechanical properties were analysed with the help of tensile tests and Charpy impact tests. Information on the chemical structure and thermal properties was obtained using FTIR spectroscopy, Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermogravimetric Analysis (TGA).

### 3 Results

#### 3.1 Results of PP waste bale analysis

The waste bale analysis showed that for some sampling times, the "pure" PP bales contain a fairly high amount of PE. Some bales were found to have high levels of foreign and polymeric impurities. By sorting the PP fractions by processing methods, it was found that INM is the predominant processing method followed by EBM and THF. The lowest proportion was determined for FLE. The proportion of differently processed PP also varies with sampling time, as can be seen in Fig. 1, where examples of a "pure" PP and an MPO bale are shown. Thus, recyclates would have shown different processability at each sampling time due to the different melt flow characteristics of the processing fractions (e.g. higher EBM amount leads to higher melt viscosity).

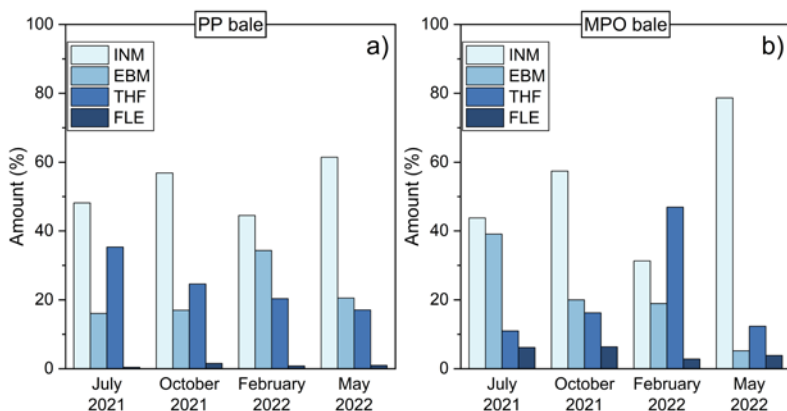


Figure 1: Results of sorting according to processing method shown on the example of a) a "pure" PP and b) an MPO bale.

#### 3.2 Comparison of recyclates

The comparison of the density and MFR values of the two recyclates are shown in Fig. 2. R-MIX exhibited a higher density than the recyclate from the sorted fraction R-EBM. The difference may be explained by a higher PE or filler content in the R-MIX. The higher filler content was confirmed by TGA and FTIR measurements. The MFR value of the R-EBM shows a significant difference from the value of the R-MIX. The MFR of the R-mix is too high for extrusion applications, while the R-EBM showed a value more suitable for extrusion. In addition, the R-EBM showed a higher elongation at break and a higher impact toughness.

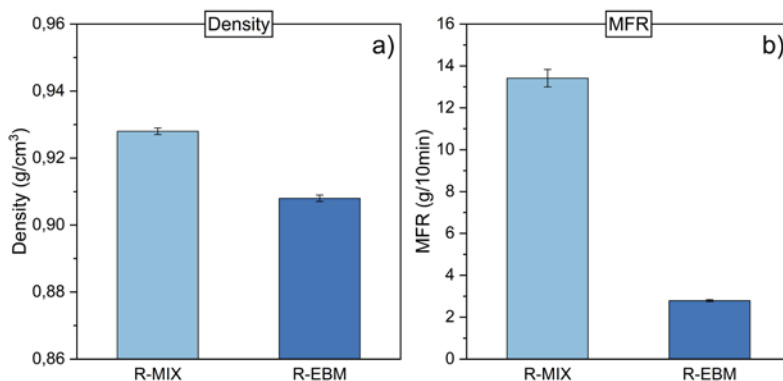


Figure 2: Comparison of a) the density and b) the MFR value of the produced recyclates.

## 4 Conclusion

Differences in the proportions of PP, PE and impurities in the waste bales were found to vary seasonally. Some bales were found to contain rather high amounts of foreign and polymeric impurities, which makes further treatment by additional sorting inevitable. The proportions of the processing methods in the PP stream were shown to also depend on the sampling time. The different proportions would have resulted in differences in processing characteristics and properties of the recyclates from each sampling time. It was found that in almost all cases, the proportion of INM was the highest. Since INM grades have low melt viscosities, recyclates from a mixed stream usually also have low melt viscosities. Thus, further treatment of the PP fractions is necessary to process recyclates suitable for extrusion applications. Improved sorting techniques in mechanical recycling may be one solution. For this reason, this study also investigated whether recyclates can be improved to the extent that they can be used for processing methods requiring high melt viscosities. The production of the recyclate from hand-sorted EBM articles showed that it is possible to generate recyclates with higher viscosities. The next step in this project is to adapt NIR sorting systems to be able to automatically sort polymers according to processing methods or MFR values.

## Acknowledgement

This research work was performed at the Polymer Competence Center Leoben GmbH (PCCL, Austria) within the framework of the COMET-program of the Federal Ministry for Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology and the Federal Ministry for Digital and Economic Affairs with contributions by Montanuniversität Leoben, Budapest University of Technology and Economics, PreZero Polymers Austria GmbH, Redwave - a division of BT-Wolfgang Binder GmbH and Poloplast GmbH & Co KG. The PCCL is funded by the Austrian Government and the State Governments of Styria, Lower Austria and Upper Austria.

## Literatur/Quellen

- Alvarado Chacon, F.; Brouwer, M. T.; Thoden van Velzen, E. U.; Smeding, I. W. (2020): A first assessment of the impact of impurities in PP and PE recycled plastics. Wageningen.
- European Commission: Declaration of the Circular Plastics Alliance. Available online at [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/circular-plastics-alliance\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/circular-plastics-alliance_en), checked on 5th January 2023.
- European Union: Directive (EU) 2018/852 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. In Official Journal of the European Union. Available online at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1551965345008&uri=C ELEX:32018L0852>, checked on 5th January 2023.
- PlascticsEurope (2021): Plasctics - the Facts 2021. An analysis of European plastics production, demand and waste data. Available online at <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>, checked on 5th January 2023.
- Thoden van Velzen, E. U.; Chu, S.; Alvarado Chacon, F.; Brouwer, M. T.; Molenveld, K. (2020): The impact of impurities on the mechanical properties of recycled polyethylene. In *Packag Technol Sci* 34 (4), pp. 219–228. DOI: 10.1002/pts.2551.
- Traxler, I.; Marschik, C.; Farthofer, M.; Laske, S.; Fischer, J. (2022): Application of Mixing Rules for Adjusting the Flowability of Virgin and Post-Consumer Polypropylene as an Approach for Design from Recycling. In *Polymers* 14 (13). DOI: 10.3390/polym14132699.
- Vilaplana, F.; Karlsson, S. (2008): Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review. In *Macromol. Mater. Eng.* 293 (4), pp. 274–297. DOI: 10.1002/mame.200700393.
- Yin, S.; Tuladhar, R.; Shi, F.; Shanks, R. A.; Combe, M.; Collister, T. (2015): Mechanical reprocessing of polyolefin waste: A review. In *Polym Eng Sci* 55 (12), pp. 2899–2909. DOI: 10.1002/pen.24182.

## Kontakt

*Dipl.-Ing. Jutta Geier, Researcher*

Polymer Competence Center Leoben GmbH

Tel.-Nr.: +43 3842 42962-48

E-Mail: [jutta.geier@pccl.at](mailto:jutta.geier@pccl.at)

Homepage: [www.pccl.at](http://www.pccl.at)



## **Wie entsorgen Konsument:innen zerlegbare Mehrkomponenten-Verpackungen und was bedeutet das für die reale Recyclingfähigkeit?**

**Abstract:** *Die Recyclingfähigkeit von Verpackungen ist eine Grundlage für das Erreichen der EU-Recyclingziele für Verpackungsabfälle. Diese hängt jedoch nicht nur vom Design der Verpackung selbst, sondern in der Praxis auch vom Verhalten der Konsument:innen ab. Darum wurde in dieser Arbeit exemplarisch die Trennqualität von Mehrkomponenten-Leichtverpackungen im Siedlungsabfall einer Großstadt in Österreich untersucht, sowie deren Erfassungsgrad berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der vorgesehenen Sammelschienen und beworbenen Fraktionen der Stadt der Erfassungsgrad der nicht beworbenen Mehrkomponenten-Leichtverpackungen bei nur etwa 4% liegt. Zudem wurden nur 11% der im Restmüll vorgefundenen und 57% der in der getrennten Sammlung vorgefundenen Mehrkomponenten-Leichtverpackungen vor ihrer Entsorgung vollständig in ihre Einzelkomponenten zerlegt. Ihr Verpackungsdesign stellt offensichtlich nicht nur für Konsument:innen eine Herausforderung dar, sondern führt möglicherweise auch zu Problemen bei der automatischen Sortierung. Dies sollte bei der Bemessung der realen Recyclingfähigkeit beachtet werden.*

### **1 Einleitung**

Das Erreichen der im Kreislaufwirtschaftspaket der EU (EC, 2018) und in der österreichischen Verpackungsverordnungs-Novelle 2021 festgelegten Recyclingziele für Verpackungsabfälle, und hier besonders Leichtverpackungen, erfordert umfangreiche Maßnahmen aller beteiligten Branchen und Akteur:innen, von Verpackungshersteller:innen über Konsument:innen bis hin zu Abfallbehandler:innen. Es ist nicht nur notwendig, genügend Leichtverpackungen zu sammeln, sondern diese auch in einer für das Recycling geeigneten Qualität zur Verfügung zu stellen. Hierbei spielt die Recyclingfähigkeit und nicht zuletzt auch das Verhalten der Konsument:innen eine wesentliche Rolle. Dies kommt im Speziellen bei zerlegbaren Mehrkomponenten-Leichtverpackungen (MK-LVP) zum Tragen, welche vor ihrer Entsorgung in ihre Einzelkomponenten zerlegt werden sollen, um ein Recycling gewährleisten zu können. Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen waren deshalb MK-LVP aus einer Karton-Kunststoff-Kombination, wie sie für Milchprodukte und hier vor allem Joghurt, verwendet werden. Bei der betrachteten MK-LVP wird ein Kunststoffbecher aus Polypropylen oder Polystyrol mit einem Karton ummantelt, wobei der Karton mit oder ohne Boden ausgeführt wird. Als Verschluss dient üblicherweise ein Siegeldeckel aus Aluminium (Alu). Informationen zur richtigen Trennung der MK-LVP finden sich auf dem bedruckten Karton, während der Kunststoffbecher selbst unbedruckt bleibt, was eine gute Voraussetzung für ein hochwertiges mechanisches

Recycling darstellt. Von den Herstellern werden die MK-LVP für ihre ansprechende Optik und Haptik und als nachhaltige Alternative zu konventionellen Kunststoffbechern beworben: Sie benötigen dank dem stützenden Karton, welcher bis zu 80% aus Sekundärrohstoff (Altpapier) bestehen kann, ein Drittel weniger Kunststoff in der Herstellung (Greiner Packaging GmbH, 2023). Während Kunststoff von einem negativen Image begleitet wird, hat Papier ein sehr positives Image bei Konsument:innen und wird oft als das umweltfreundlichste Verpackungsmaterial wahrgenommen (Nguyen et al., 2020). Deshalb sind MK-LVP mit Papier sehr beliebt, bei Herstellern wie auch Konsument:innen. Die untersuchten MK-LVP können einfach in ihre Einzelkomponenten zerlegt werden und weisen deshalb eine hohe theoretische Recyclingfähigkeit auf (Greiner Packaging GmbH 2023; Pomberger, 2021). Diese hängt jedoch davon ab, ob die MK-LVP von den Konsument:innen wirklich in ihre Einzelkomponenten zerlegt und diese anschließend dem richtigen Sammelsystem zugeordnet werden. Darum wurde in der vorliegenden Arbeit exemplarisch untersucht, in welchem Zustand theoretisch leicht zerlegbare MK-LVP für Milchprodukte aus Kunststoff, Karton und Alu im Siedlungsabfall vorgefunden werden, wie hoch der Erfassungsgrad dieser Verpackungen im Allgemeinen ist und welche Rückschlüsse daraus auf die reale Recyclingfähigkeit derartiger Verpackungen gezogen werden können. Entsprechende Erkenntnisse sind bisher nur sehr eingeschränkt verfügbar, stellen jedoch wertvolle Beiträge zur Bemessungsgrundlage für die Recyclingfähigkeit im Zuge einer vorgesehenen Ökomodulation der Lizenzierungsentgelte für Inverkehrbringer von Verpackungen dar.

## 2 Methodik

Die Daten für diese Untersuchung stammen aus einer Großstadt in Österreich und wurden im Zuge einer großen Abfallsortierkampagne, welche im Jahr 2022 stattfand, erhoben. In der Stadt wurden im Untersuchungsjahr der Karton über die Altpapiersammlung, das Alu über die LVP-Sammlung (gemischte Sammlung von Kunststoffflaschen, Getränkeverbundkartons und Metallen) und der Kunststoff, da noch nicht aktiv für die LVP-Sammlung beworben, planmäßig über die Restmüllsammlung entsorgt. Im Zuge der Analysen wurden Beprobungen bei zwei dieser Abfallströme (Restmüll und LVP) durchgeführt, wobei rund 3.700 kg Restmüll und 1.300 kg LVP analysiert wurden. Die Planung sowie Durchführung der Stichprobenahme erfolgte gemäß technischem Leitfaden (Beigl et al., 2017), die Stichproben stammten aus dem gesamten Stadtgebiet. Der getrennte Erfassungsgrad und die Trennqualität, also inwieweit die MK-LVP vor ihrer Entsorgung in ihre Einzelkomponenten zerlegt (siehe Abb. 1) und der richtigen Sammelschiene



Abbildung 1: Trennqualität bei MK-LVP: Inkl. Karton, inkl. Alu; inkl. Karton, exkl. Alu; exkl. Karton, inkl. Alu; exkl. Karton, exkl. Alu (v.l.n.r.).

zugeordnet wurde, wurde durch manuelle Einzelkorncharakterisierung erhoben. Insgesamt wurden 2,7 kg (n=259) MK-LVP aus der LVP-Sammlung sowie 4,5 kg (n=290) MK-LVP aus dem Restmüll analysiert.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse zur Trennqualität der MK-LVP (siehe Abb. 2) zeigen, dass 11% der im Restmüll vorgefundenen MK-LVP vollständig in ihre Einzelkomponenten zerlegt wurden, während 45% gänzlich unzerlegt entsorgt wurden. Bei 9% wurde ausschließlich der Karton entfernt, wohingegen bei 35% ausschließlich das Alu entfernt wurde. Den Berechnungen des Erfassungsgrades nach muss man davon ausgehen, dass aufgrund der aktuell vorgesehenen Sammelschienen von allen anfallenden MK-LVP derzeit 96% über den Restmüll und nur etwa 4% über die getrennte LVP-Sammlung entsorgt werden. Bei den über die getrennte LVP-Sammlung entsorgten MK-LVP wurden 57% vor ihrer Entsorgung vollständig in ihre Einzelkomponenten zerlegt, während 11% gänzlich unzerlegt entsorgt wurden. Bei 10% wurde ausschließlich der Karton entfernt, wohingegen bei 22% ausschließlich das Alu entfernt wurde.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Verpackungsdesign dieser MK-LVP zu Herausforderungen bei den Konsument:innen führt, einerseits bei der richtigen Zerlegung und andererseits bei der Zuordnung zum

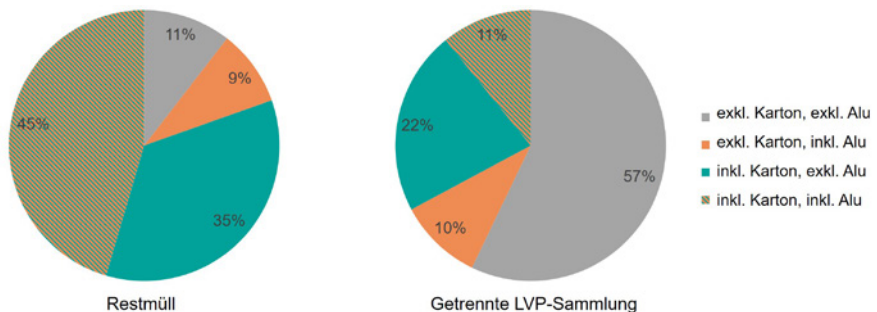


Abbildung 2: Trennqualität bei MK-LVP im Restmüll und der getrennten LVP-Sammlung als Folge des Verhaltens der Konsument:innen hinsichtlich Trennung der Einzelkomponenten vor der Entsorgung (Inkl. Karton/Alu:

Kartonmantel/Aludeckel wurde nicht entfernt; Exkl. Karton/Alu: Kartonmantel/Aludeckel wurde entfernt),

Anteile berechnet aus Stückzahl n der analysierten MK-LVP: n (RM)=290, n (g.S.)=259.

richtigen Sammelsystem. Auch in nachgeschalteten automatischen Sortieranlagen kann diese Verpackung zu Problemen führen, da sie nicht richtig erkannt wird (ZSVR, 2022).

Deutschland ist bis dato eines der wenigen Länder, das konkrete verbindliche Mindestkriterien für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von Verpackungen erstellt hat (ZSVR, 2022). Demnach dürfen in Deutschland derzeit „Kombinationsverpackungen nur dann separat bemessen werden, wenn diese zum Ge- oder Verbrauch notwendigerweise und unwiderruflich getrennt werden müssen“ (ZSVR, 2022). Abweichend davon ist die Berücksichtigung einer Trennung durch mechanische Beanspruchungen z.B. bei Transport- und Sortiervorgängen zulässig. Ob zukünftig freiwillige Trennvorgänge durch Konsument:innen bei der Bewertung der Recyclingfähigkeit berücksichtigt werden, ist zu beobachten. Aufgebrachte Entsorgungshinweise könnten hier unterstützend wirken.

## 4 Schlussfolgerungen

Der generelle Trend zu mehr Nachhaltigkeit führt bereits zu einer Zunahme von Papierverbunden als Ausweichbewegung zu reinen Kunststoffverpackungen (UBA Deutschland, 2021). In Kombination mit den gesetzlichen Regelungen zur Recyclingfähigkeit von Verpackungen könnte das zu einer Zunahme von zerlegbaren MK-LVP führen. Hier bedarf es jedoch wesentlicher Verbesserungen in der Bewusstseinsbildung bei Konsument:innen, um die reale Recyclingfähigkeit zu erhöhen, wie diese Untersuchungen zeigen.

Neben dem grundsätzlichen Design der Verpackung und dem Verhalten der Konsument:innen spielen natürlich auch technische Randbedingungen wie Servicelevel und definierte Zielfraktionen eine wesentliche Rolle dabei, welche getrennten Sammelquoten erreicht werden (Schuch et al., 2023) und in welchem Zustand MK-LVP in den Abfallstrom gelangen. Mit Beginn 2023 werden in ganz Österreich alle Kunststoff-LVP Zielfraktionen der getrennten Sammlung. Inwieweit das die Entsorgung und den Erfassungsgrad der MK-LVP im Untersuchungsgebiet beeinflusst, soll noch weiterführend untersucht werden, ebenso der Einfluss des Servicelevels als Vergleich von Bring- und Holsystem.

## Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Forschungsinitiative CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der TU Wien. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Gleichzeitig bedanken wir uns bei unseren Unternehmenspartnern Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoff Recycling Austria AG, Borealis AG, Brantner Österreich GmbH, Lenzing AG, Linz Service GmbH, MM Board and Paper AG, OMV Downstream GmbH, Wien Energie GmbH und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H., sowie bei der Magistratsabteilung Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien (MA 48).

## Literatur/Quellen

- Beigl, P.; Happenhofer, A.; Salhofer, S. (2017): Technische Anleitung für die Durchführung von Restmüll-Sortieranalysen. Hg. v. Institut für Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien. Wien.
- European Commission (EC) (2018): Directive (EU) 2018/852 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. In: Official Journal of the European Union L 150, S. 141–151.
- Greiner Packaging International GmbH (2023): K3-Karton-Kunststoff-Kombination. Online verfügbar unter <https://www.greiner-gpi.com/de/Produkte/Dekoration/K3-Karton-Kunststoff-Kombinationen>, zuletzt geprüft am 01.07.2021.
- Nguyen, Anh Thu; Parker, Lukas; Brennan, Linda; Lockrey, Simon (2020): A consumer definition of eco-friendly packaging. In: Journal of Cleaner Production 252, S. 119792. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119792.
- Pomberger, Roland (2021): Über theoretische und reale Recyclingfähigkeit. In: Österr Wasser- und Abfallw 73 (1-2), S. 24–35. DOI: 10.1007/s00506-020-00721-5.



- Schuch, D.; Lederer, J.; Fellner, J.; Scharff, C. (2023): Separate collection rates for plastic packaging in Austria - A regional analysis taking collection systems and urbanization into account. In: Waste management (New York, N.Y.) 155, S. 211–219. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.09.023.
- Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) (2022): Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG. Osnabrück. Online verfügbar unter [https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Mindeststandard/Mindeststandard\\_VerpackG\\_Ausgabe\\_2022.pdf](https://www.verpackungsregister.org/fileadmin/files/Mindeststandard/Mindeststandard_VerpackG_Ausgabe_2022.pdf), zuletzt geprüft am 23.01.2023.
- Umweltbundesamt Deutschland (UBA) (2021): Altpapier. Umweltbundesamt Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altpapier#vom-papier-zum-altpapier>, zuletzt geprüft am 02.07.2021

### **Kontakt**

*Lea Gritsch, MSc, wissenschaftliche Mitarbeiterin*

TU Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften

CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft

1060 Wien

Tel.-Nr. +43 1 58801 166111

E-Mail: [lea.gritsch@tuwien.ac.at](mailto:lea.gritsch@tuwien.ac.at)

Homepage: [www.vt.tuwien.ac.at](http://www.vt.tuwien.ac.at)



## Chemisches Recycling: Untersuchungen zum thermochemischen Verhalten von SBR-Matratzenschaum

**Abstract:** Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) ist ein Copolymer aus Styrol (ca. 30 %) und Butadien (ca. 70 %), das als synthetischer Kautschuk in Anwendungen der Automobil-, Elektronik- und Konsumgüterindustrie weit verbreitet ist. Nach einem Vulkanisierungsprozess mit Schwefel oder schwefelhaltigen Verbindungen wird es u. a. als Matratzenschaum eingesetzt. In dieser Arbeit wurden die thermochemischen Grundlagen für das chemische Recycling von SBR via Pyrolyse zwischen 400 und 500 °C untersucht. Durch die Kopplung der thermogravimetrischen Analyse mit Infrarotspektroskopie (TGA/FTIR) wurde das Produktspektrum der Gasphase temperaturspezifisch erfasst. Zudem wurde die Zusammensetzung kondensierbarer Bestandteile mittels Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC-MS) analysiert. Die Pyrolyseöle zeigten einen hohen Anteil an alkylierten Monoaromaten sowie Thiophenen.

### 1 Einleitung

Das Recycling von Latex-Matratzenschäumen ist derzeit nicht industriell etabliert. Steigende EU-Recyclingquoten für Siedlungsabfälle (EEA, 2018) bedingen jedoch ein Ende der rein energetischen Verwertung und die Entwicklung neuer technischer Verfahren zur stofflichen Nutzung. Aktuell werden in der EU die Matratzenabfälle größtenteils deponiert (45 %) oder thermisch verwertet (35 %) (Umweltbundesamt, 2022). Trotz der begrenzten Anzahl an eingesetzten Materialien sowie bekannter Stoffströme fehlen grundlegende Daten, und die Verfahren für die stoffliche Nutzung dieser Materialien stehen am Anfang (Azura & Syuhada, 2019). Bisherige Konzepte für Matratzenrecycling streben ein stoffliches Recycling der Materialien an (EU Recycling, 2020). Derzeit werden etwa 4,8 Mio. Matratzen jährlich in Deutschland hergestellt und im gleichen Zeitraum fallen etwa 163 kt Abfälle aus Matratzen an, davon 16,5 kt Latexschaum (Umweltbundesamt, 2022). Eines der Latexschaummaterialien ist das Copolymer Styrol-Butadien-Kautschuk (engl. styrene-butadiene rubber, SBR). Dieses wird mit Schwefel vulkanisiert und kann dann u. a. als Matratzenschaum eingesetzt werden (Garrido et al., 2017). Die Machbarkeit eines werkstofflichen Recyclings dieses Materials ist momentan aufgrund verschiedener Aspekte, wie der chemischen Struktur, Verunreinigungen und dem Einsatz als Verbundwerkstoff, fraglich (Zanchet & Sousa, 2020). Als Alternative zur thermischen Verwertung käme somit nur die rohstoffliche Nutzung in Frage, um Primärrohstoffe im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zu ersetzen. In Zukunft könnte die pyrolytische Behandlung eine Möglichkeit sein, SBR-haltige Abfälle zu recyceln. Bei der Pyrolyse wird das Material in inerter Atmosphäre so weit erhitzt, dass die Polymerketten durch die Wärmeeinwirkung fragmentiert werden. Flüchtige Komponenten gehen in die Gasphase über und enthalten neben Permanentgasen bei Raumtemperatur kondensierbare Kohlenwasserstoffbestandteile von

ölig bis wachsartiger Konsistenz. Diese Pyrolysekondensate könnten bei optimierter Prozessführung und weiteren Aufbereitungsschritten der Wertstoffkette wieder zugeführt werden. Dies könnte dazu beitragen, Matratzenschaum zu recyceln, fossile Rohstoffe zu substituieren und eine zirkuläre Wertschöpfung auf Basis der stofflichen Nutzung ermöglichen.

## 2 Material

Abbildung 1 zeigt Stücke des geschäumten SBR-Kautschuks für die Anwendung als Matratzenschaum. Das Material zeigt ein elastisches und weiches Verhalten. Mit einer Dichte von  $83,4 \text{ kg/m}^3$  ist der Schaum ein leichtes Material.



Abbildung 1 Geschäumter Kautschuk auf Basis des SBR (Hersteller Synthomer Deutschland) (Maßstab = 1 cm).

Gemäß den Angaben des Herstellers, Synthomer Deutschland, handelt es sich um ein homogenes Material, welches bei der Schaumherstellung mit Natriumhexafluorosilikat behandelt wurde, welche zu  $\text{KF}$  und  $\text{SiO}_2$  umgesetzt werden und zudem prozessbedingte Rückstände der Vulkanisationsaktivatoren, insbesondere Zinkoxid und weitere Zinksalze enthält.

Für die chemischen Analysen wurde das Material unter kryogenen Bedingungen in einer Laborschneidmühle auf eine Korngröße  $< 1 \text{ mm}$  zerkleinert. Die Ergebnisse der Immediatanalyse, der Brennwertbestimmung sowie die CHNS-Elementargehalte sind in Tabelle 1 gezeigt. Die SBR-Probe wies einen hohen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen auf. Aufgrund des hohen Polymergehalts weist die Probe einen Kohlenstoffgehalt von  $77,8 \text{ Ma.-%}$  auf. Die S-Vulkanisation führt zu erheblichen Mengen an Schwefel mit  $2,5 \text{ Ma.-%}$ .

Tabelle 1 Immediatanalyse sowie CHNS Elementargehalte des SBR Schaums, analysenfeucht (n=3).

Analyse	Einheit	SBR Probe	Versuchsvorschrift
Wassergehalt	[Ma.-%]	< 0,1	DIN 51718
Aschegehalt (550 °C)	[Ma.-%]	4,59	DIN EN ISO 21656
Flüchtige Bestandteile	[Ma.-%]	94,9	DIN 51720
Brennwert	[MJ/kg]	42,10	DIN 51900
<b>Elementargehalt</b>			
Kohlenstoff (C)	[Ma.-%]	77,8	DIN 51732
Wasserstoff (H)	[Ma.-%]	7,7	DIN 51732
Stickstoff (N)	[Ma.-%]	0,7	DIN 51732
Schwefel (S)	[Ma.-%]	2,5	DIN 51724

### 3 Methodik

Die Untersuchungen zum thermochemischen Zersetzungsverhalten wurden in einer Linseis STA PT1600 Thermowaage durchgeführt. Es wurden jeweils  $15,0 \pm 0,1$  mg des pulverisierten Materials pro Durchgang verwendet. Die Probe wurde in einem Stickstoffgasfluss (Reinheit 99,999 %) von 125 ml/min von Raumtemperatur auf Versuchstemperatur erhitzt. Für die Untersuchung kondensierbarer Pyrolyseprodukte wurde der Vollstrom aus der Thermowaage in eine Kühlfalle mit flüssigem Stickstoff geleitet. Die öligen bis wachsartigen Kondensate wurden in 5 ml MeOH:CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> (1:1) gelöst und mittels GC-MS Analyse in einem Agilent 7010B Triple Quadrupole GC/MS analysiert. Für die Quantifizierung der BTEX-Fraktion wurden die Einzelsubstanzen Benzol, Toluol, Ethylbenzol und m-/p-Xylole als Referenzen vorab gemessen. Die Konzentration von Styrol wurde aus der referenzierten Quantifizierung dieser Fraktion rechnerisch abgeleitet. Für die TGA/FTIR-Kopplung wurden 100 mg SBR verwendet und der Gasstrom auf 600 ml/min erhöht, um einen ausreichenden Volumenstrom für den Gasanalysator zu erreichen. FTIR-Referenzspektren wurden anhand der erwarteten und in GC-MS Analysen identifizierten Verbindungen ausgewählt. Alle FTIR-Messungen wurden mit dem Analysator Gasmeter CX4000 durchgeführt.

### 4 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 2 zeigt den Aufbau zur Kondensatbeprobung mittels Kühlfalle sowie das Pyrolyseöl der kondensierten Gasbestandteile. Die gesammelten Kondensate der pyrolysierten SBR-Probe wiesen eine gelbliche Farbe und eine hohe Viskosität auf. Die Ausbeute betrug 26,5 Ma.-% bei 400 °C. Bei 500 °C konnte diese auf 35,7 Ma.-% erhöht werden. Für 400 °C verblieben 40,9 Ma.-% der Probe als Koks, welcher bei der Pyrolyse bei 500 °C auf 6,6 Ma.-% reduziert werden konnte.

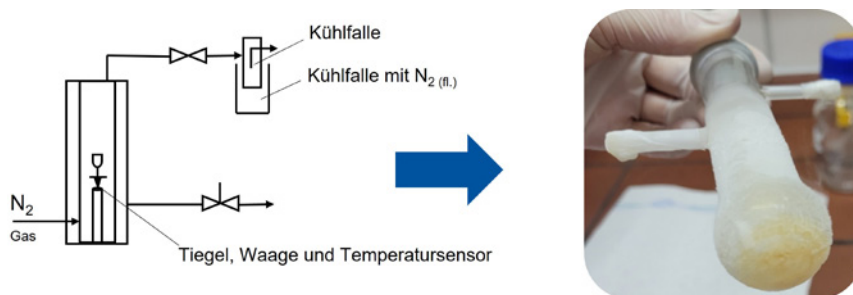


Abbildung 2 Schema der Kondensatbeprobung und die Kühlfalle mit Kondensat aus pyrolysiertem SBR.

#### 4.1 Kondensierbare Pyrolyseprodukte (GC-MS Analyse)

Die Chromatogramme der GC-MS Analyse zeigen ein großes Produktspektrum mit einer Vielzahl an Verbindungen, beispielhaft dargestellt für die PAK-Analyse der SBR-Pyrolyse bei 500 °C in Abbildung 3.

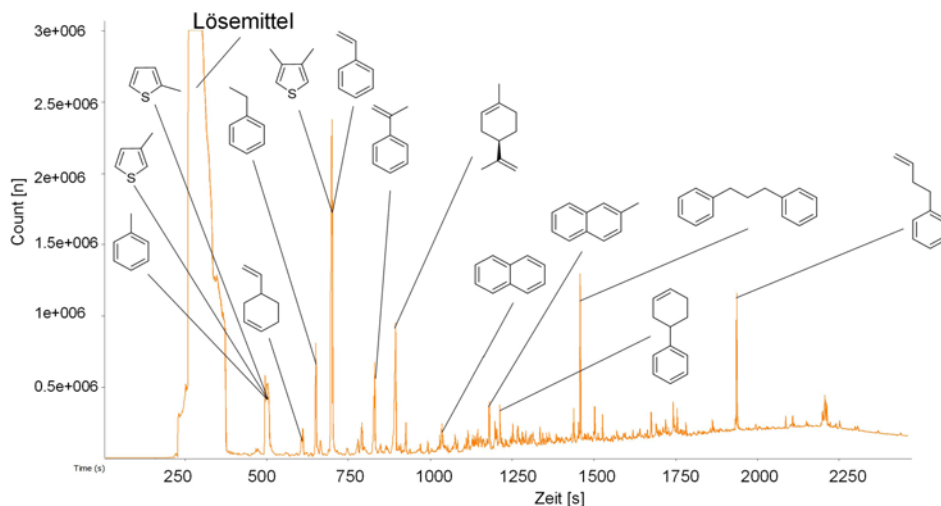


Abbildung 3 Chromatogramm der PAK-Analyse für SBR-Pyrolysekondensat bis 500 °C.

Monoaromatische Verbindungen machen den Großteil der Verbindungen hinsichtlich Anzahl und Konzentration aus. Styrol ist das Hauptprodukt der pyrolytischen Zersetzung. Zahlreiche monoalkylierte Phenylderivate können zudem identifiziert werden, die ebenfalls aus dem monoaromatischen Bestandteil des Polymers stammen. Alkylierte Thiophene sind weitere relevante Zersetzungsprodukte. Diese S-heteroaromatischen Verbindungen resultieren aus der Fragmentierung der S-vulkanisierten Polymerkette und können in ähnlicher Konzentration wie Styrol gemessen werden. Limonen kann in signifikanter Menge detektiert werden und ist eines der wenigen Produkte ohne aromatische Struktur, die mit der GC-MS Methode bestimmt wurden. Mehr als 1.300 Verbindungen können identifiziert werden, wobei die Konzentration der polyaroma-

tischen Kohlenwasserstoffe mit steigender Kohlenstoffanzahl stetig abnimmt. Tabelle 2 zeigt die Ausbeuten der Kondensate, der BTEX-Fraktion und Styrol inklusive der Konzentration im Kondensat.

Tabelle 2 Kondensatausbeute und Produktkonzentration der BTEX-Fraktion und Styrol.

Probe	Einheit	SBR 400°C		SBR 500°C	
		Ausbeute	Produktkonzentration	Ausbeute	Produktkonzentration
Kondensat	[Ma.-%]	26,5	-	35,7	-
BTEX	[Ma.-%]	2,22	8,41	3,13	8,77
Styrol	[Ma.-%]	2,22	8,37	2,30	6,47

## 4.2 TGA/FTIR-Kopplung

Das thermogravimetrische Verhalten des SBR-Schaums ist in Abbildung 4 für den Temperaturbereich zwischen 100 und 700°C gezeigt. Der Matrattzenschaum aus SBR zeigt eine zweistufige Zersetzung, ermittelt durch den relativen Massenverlust (-dm/dT). Mit der TGA/FTIR-Kopplung ist es zudem möglich, die Konzentration der Gasphasenprodukte (mg/s) mit der Massenabnahme zu korrelieren.

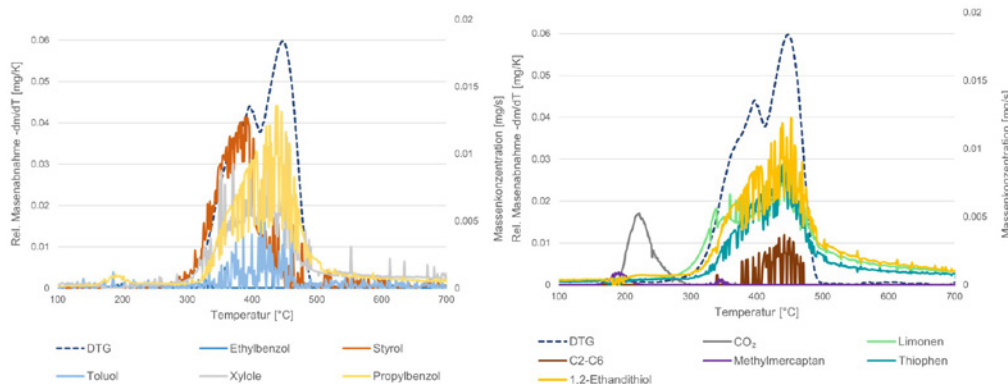


Abbildung 4 DTG/FTIR-Kopplung mit Konzentration ausgewählter Gasphasenprodukte (n=2).

Für die erste Zersetzungsstufe bei etwa 380 °C kann eine hohe Konzentration von Styrol ermittelt werden. Xylole und Toluol können ebenfalls in signifikanter Menge detektiert werden. Bei der zweiten Zersetzungsstufe bei etwa 450 °C sinkt die Menge an Styrol und überwiegend alkylierte Aromaten mit  $R \geq 3$  werden gebildet. Eine Erklärung könnte sein, dass sich der Mechanismus ändert und es vermehrt zu Brüchen der Polymerkette kommt, sodass längere Alkylketten an den Phenylderivaten verbleiben. Diese Ergebnisse spiegeln auch die Ergebnisse der GC-MS Messung wider (vgl. Tabelle 2). Schwefelhaltige Verbindungen werden bei der Zersetzung konstant gebildet. Neben Thiophen kann 1,2-Ethandithiol detektiert werden, wobei dieses nicht mittels GC-MS Analyse bestimmt werden konnte. Die Verbindung könnte aus der Spaltung der Schwefelbrücken ( $-C-S_x-$ -Verbindungen), der Oxidation des Schwefels oder sekundären Reaktionen mit

H<sub>2</sub>S stammen. Es waren zum Zeitpunkt der Untersuchungen keine Referenzen für H<sub>2</sub>S oder für Dithiole mit längerer Kohlenstoffkette verfügbar. Die Entstehung schwefelhaltiger Verbindung scheint nicht im signifikanten Maße mit der Bildung der Phenylderivate zu interagieren und nur geringe Mengen an aromatischen Mercaptoverbindungen können mittels GC-MS oder FTIR-Spektroskopie gefunden werden. Limonen werden proportional zum Massenverlust bis 500 °C gebildet, auch danach können geringe Mengen der Verbindung detektiert werden. Das ist äquivalent zu kürzeren Kohlenwasserstoffen, die jedoch aufgrund der niedrigen Konzentration nicht mit Sicherheit mit der genutzten Methode qualitativ oder quantitativ bestimmt werden konnten. Limonen könnte aus intramolekularen Zyklisierungsreaktionen oder der Dimerisierung des Monomers 1,3-Butadien entstehen. 1,3-Butadien wurde jedoch nicht in signifikanter Konzentration detektiert. Geringe Mengen an CO<sub>2</sub> können bei etwa 220 °C beobachtet werden. Der Ursprung ist unbekannt, jedoch ist die Ausgasung aus den Poren des Schaums denkbar, wenn dieser schmilzt, da kein Massenverlust in diesem Temperaturbereich zu beobachten ist.

## 5 Fazit

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes liefern die Basis, um das Rückgewinnungspotenzial der Pyrolyseprodukte aus SBR abzuschätzen. Insbesondere der hohe Anteil an Monoaromaten könnte sich positiv auf die ökonomische Machbarkeit eines Recyclingverfahrens für SBR-Matratzenschäume mittels Pyrolyse auswirken. In einem technischen Maßstab gilt es die Kondensatausbeute weiter zu optimieren. Der optimale Temperaturbereich dafür liegt wahrscheinlich zwischen 400 °C und 500 °C. Die Kenntnis des thermochemischen Verhaltens ließe sich nutzen, um temperaturspezifisch die gewünschten Produkte in einem Pyrolyseprozess zu erzeugen. Der hohe Anteil an Schwefel macht eine Aufbereitung des Öls unerlässlich, sofern das Pyrolysekondensat in (petro-) chemischen Prozessen verwertet werden soll. Verfahren zu einer vorausgehenden Devulkanisation mittels verschiedener Ansätze wurden bereits erprobt (Asaro et al., 2018) und könnten die Produktqualität der Pyrolyseöle deutlich erhöhen.

## Danksagung

Das Forschungsprojekt wurde durch die Synthomer Deutschland GmbH und euroLATEX finanziert.

## Literatur/Quellen

- Asaro, L.; Gratton, M.; Seghar, S.; Aït Hocine, N. (2018): Recycling of rubber wastes by devulcanization. In: Resources, Conservation and Recycling. 133, 250–262.
- Azura, A.R., Syuhada, D.N. (2019): Recycling of Latex Waste and Latex Products, In: Rubber Recycling: Challenges and Developments, 233-258.
- EEA, EU-Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie (EU) 2018/851) 4. Juli 2018, Artikel 3 Nr. 2b: Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle
- EU Recycling; Szombathy, M. (2020): Matratzenrecycling: Verwertungsmodelle gesucht, In: EU Recycling + Umwelttechnik, 37, 34-37.
- Garido, M. A.; Font, R.; Conea, J. A.: (2017): Thermochemical study of the briquetting process of mattress foams, In: Fuel Processing Technology. 159, 88-95.



Umweltbundesamt, Wagner, J.; Steinmetzer, S.; Theophil, L.; Strues, A.S; Kösegi, N., Hoyer, S. (2022): Evaluation der Erfassung und Verwertung ausgewählter Abfallströme zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft, 69-89.

Zanchet, A. Sousa, F. D. B. de (2020): Elastomeric Composites Containing SBR Industrial Scraps Devulcanized by Microwaves: Raw Material, Not a Trash. In: Recycling. 5, (1), 1-13.

### **Kontakt**

*Fabian Roemer, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter*

Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER), RWTH Aachen

Tel.-Nr. +49 176 20901749

E-Mail: [roemer@teer.rwth-aachen.de](mailto:roemer@teer.rwth-aachen.de)

Homepage: [www.teer.rwth-aachen.de](http://www.teer.rwth-aachen.de)



# TEIL 2

## Kreislaufwirtschaft I

Leitung: Prof. Dr. Martin Kranert



## Die Entsorgungswirtschaft im Kontext der Klimapolitik – Rahmenbedingungen, Instrumente und Entwicklungen

**Abstract:** Die Circular Economy ist ein wichtiger Baustein des EU Green Deals, um das Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2050 zu erreichen. Die Entsorgungswirtschaft sieht sich daher heute in einem Politikfeld mit hoher Dynamik und neuen Anforderungen. Die Rahmenbedingungen dieses Politikfeldes sind vielen Akteuren im Detail jedoch nicht bekannt und auch der Sektor selbst muss seine Rolle in der Klimapolitik erst finden. Diese Sachlage ist umso komplexer, als es in der politischen Diskussion nicht allein um die in der Kreislaufwirtschaft nötigen Maßnahmen selbst geht, sondern auch darum, wem die resultierenden Einsparungen an Treibhausgasen zugerechnet werden. An dieser Frage entscheidet sich, ob Maßnahmen zur Erfüllung möglicher zukünftiger Zielsetzungen einzelner Akteure oder Sektoren beitragen können. Vor diesem Hintergrund stellt der vorliegende Beitrag die aktuellen Rahmenbedingungen der Klimapolitik vor, gibt eine strukturierte Darstellung bestehender Bilanzierungsansätze für Treibhausgase und analysiert deren Relevanz in unterschiedlichen Instrumenten der Klimapolitik aus der Perspektive der Entsorgungswirtschaft.

### 1 Einleitung

Im Dezember 2019 legte die Europäische Kommission den „Green Deal“ vor, ein ehrgeiziges Programm für die Transformation der Europäischen Union (EU) zu einer klimaneutralen und ressourceneffizienten Wirtschaft. Die Mitteilung der Kommission (COM(2019) 640)<sup>1</sup> beschreibt die konzeptionelle Grundlage des Green Deals und definiert seine wesentlichen Komponenten (Abbildung 1). Damit bildet der Green Deal den aktuellen EU-politischen Rahmen für zahlreiche einzelne Instrumente und Strategien, die seit 2019 auf den Weg gebracht wurden und für die nächste Zukunft geplant sind.

Als ein wesentliches Element des Klimaschutzes setzt der Green Deal auf eine „saubere und kreislaufforientierte Wirtschaft“. Die zentrale Strategie dazu ist ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft, der Circular Economy Action Plan (CEAP), der im März 2020 durch die EU-Kommission vorgestellt wurde.<sup>2</sup> Mit dem Begriff der Circular Economy bezieht sich der CEAP nicht nur auf die klassische Entsorgungswirtschaft, sondern auf die gesamte Wirtschaft. So zielt er auf die Abfallvermeidung, beschreibt den Rahmen für eine

<sup>1</sup> EU-Kommission (2019): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN EUROPÄISCHEN RAT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN. Der europäische Grüne Deal. Europäische Kommission. Brüssel.

<sup>2</sup> EU-Kommission (2019): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN. Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. Europäische Kommission. Brüssel.

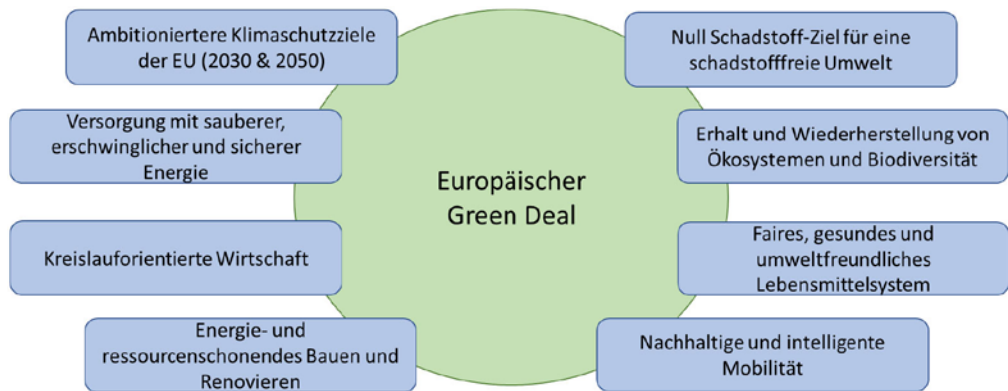


Abbildung 1: Der europäische Grüne Deal (eigene Abbildung nach: COM(2019) 640)

nachhaltige Produktpolitik einschließlich bspw. Initiativen zum Design nachhaltiger Produkte und beinhaltet konkrete Maßnahmen für zentrale Produktwertschöpfungsketten (Elektronik, Batterien und Fahrzeuge, Verpackungen, Kunststoffe, Textilien, Bauwirtschaft und Gebäude sowie Lebensmittel, Wasser und Nährstoffe). Die Circular Economy als Bestandteil des Green Deals verkörpert somit in die Fortführung des schon im Dezember 2015 veröffentlichten Aktionsplans „Den Kreislauf schließen“ der EU<sup>3</sup> eine systemische Sicht auf die Kreislaufwirtschaft, wie sie sich auch z.B. in der Circular Economy Roadmap des Acatech (acatech, 2021) und in den Leitsätzen des Umweltbundesamtes (UBA) zur Kreislaufwirtschaft (Müller et al., 2020) widerspiegelt.

Zur Umsetzung des Green Deals wurden auf europäischer und nationaler Ebene Zielwerte für die Einsparung von Treibhausgasen erlassen, die teils direkt für einzelne Sektoren der Wirtschaft formuliert wurden. Die Entsorgungswirtschaft sieht sich hier in einem besonderen Spannungsfeld: einerseits betonen der Green Deal und der CEAP konzeptionell die Rolle einer gesamtwirtschaftlichen Kreislaufwirtschaft, in welcher der Entsorgungswirtschaft eine strategische Funktion bei der Schließung von Materialkreisläufen zukommt. Andererseits adressieren die Zielvorgaben der Klimagesetze die Entsorgungswirtschaft im Sinne klassischer Entsorgungsverfahren wie Deponierung und Abfallverbrennung. Dies hat erhebliche Bedeutung für den Handlungsrahmen der Entsorgungswirtschaft und die Bewertung ihres Beitrags zum Klimaschutz. So zeigen Studien wie (Dehoust, 2010) und (Prognos, CE Delft, 2022), dass die Entsorgungswirtschaft durch die stoffliche Verwertung von Abfällen (Recycling) zu erheblichen CO<sub>2</sub> Einsparungen beitragen kann. Im Unterschied dazu werden in der nationalen Klimaberichterstattung der Entsorgungswirtschaft vorrangig die Aufwendungen für die Behandlung von Abfällen zugerechnet, während die Einsparungen durch Substitution von Primär- durch Sekundärrohstoffe an anderer Stelle zum Tragen kommen. Aus diesen unterschiedlichen Bilanzierungen und der daraus resultierenden Einsparungen entsteht eine sehr komplexe Problemlage, in der es für Akteure der Praxis schwer überschaubar ist, ob und in welcher Form sie zur Erfüllung heutiger oder möglicher zukünftiger Klimaziele beitragen können.

3 EU-Kommission (2019): MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft

## 2 Methodik

Vor diesem Hintergrund stellt der Beitrag eine strukturierte Darstellung der aktuellen Rahmenbedingungen und klimapolitischen Instrumente dar und ordnet diese den einschlägigen Treibhausgas-Bilanzierungsmethoden zu, auf die in unterschiedlichen Instrumenten Bezug genommen wird. Zusammenfassend werden deren Relevanz für die Entsorgungswirtschaft und mögliche Handlungsansätze auf dem Weg zur Klimaneutralität diskutiert. Die Aufarbeitung der Inhalte wurde zwischen September 2021 und Januar 2022 durchgeführt und bezieht sich auf die bis dahin gültigen Rechtsvorschriften. Erst die strukturierte Aufarbeitung der unterschiedlichen klimapolitischen Instrumente aus der Perspektive der Entsorgungswirtschaft ermöglicht es, Handlungsfelder zur Erreichung der Sektorziele herauszuarbeiten. Somit leistet die vorliegende Arbeit einen wichtigen Beitrag zur Definition von sektorspezifischen Klimaschutzmaßnahmen, die innerhalb der aktuellen Rahmenbedingungen zur Erreichung der Sektorziele beitragen können.

## Danksagung

Die Inhalte dieses Beitrags wurden im Rahmen der Vorstudie „Klimaneutralität der Entsorgungswirtschaft“ (Schebek et al., 2022) erarbeitet, die durch das Autorenteam der TU Darmstadt im Auftrag der Entsorgungsgemeinschaft der deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. (EdDE) erstellt wurde. Basierend auf diesen Inhalten erschien im August 2022 ein Artikel in der Fachzeitschrift „Müll und Abfall“, der die wichtigsten inhaltlichen Punkte der Studie zusammenfasst (Schebek et al., 2022). Wir danken sowohl dem EdDE als auch der „Müll und Abfall“-Redaktion für die Nutzung der Inhalte für diesen Kongressbeitrag.

## Literatur/Quellen

- Acatech, Circular Economy Initiative Deutschland, SYSTEMIQ (2021): Circular Economy Roadmap für Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.acatech.de/publikation/circular-economy-roadmap-fuer-deutschland/> zuletzt geprüft am 12.01.2023
- Dehoust, G.; Schüler, D.; Vogt, R.; Giegrich, J. (2010): Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft - Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3907.pdf>, zuletzt geprüft am 12.01.2023
- Müller, F.; Kohlmeyer, R.; Krüger, F.; Kosmol, J.; Krause, S.; Dorer, C.; Röhreich, M. (2020): Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft. Online verfügbar unter [www.umweltbundesamt.de/publikationen](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen).
- Prognos, CE Delft (2022): CO2 reduction potential in European waste management. Berlin/Düsseldorf/Delft. Online verfügbar unter <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=co2-saving-europe-waste-management-circular-economy->, zuletzt geprüft am 12.01.2023
- Schebek, L.; Baehr, J.; Hagedorn, T.; Do Carmo Precci Lopes, A.; Zeller, V. (2022): Klimaneutralität in der Entsorgungswirtschaft. Eine Vorstudie im Auftrag der Entsorgungsgemeinschaft der Deutschen Entsorgungswirtschaft e. V. (EdDE).
- Schebek, L.; Baehr, J.; Hagedorn, T.; Do Carmo Precci Lopes, A.; Zeller, V. (2022): Die Entsorgungswirtschaft im Kontext der Klimapolitik. Rahmenbedingungen, Instrumente und Entwicklungen. In: Müll und Abfall. Online verfügbar unter [https://muellundabfall.de/download/165941/mua\\_20220806.pdf](https://muellundabfall.de/download/165941/mua_20220806.pdf), zuletzt geprüft am 12.01.2023.

## **Kontakt**

*M.Sc. Julian Baehr (wissenschaftlicher Mitarbeiter)*

Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft

TU Darmstadt

Tel.-Nr. +49 6151 16 21 162

E-Mail: [j.baehr@iwar.tu-darmstadt.de](mailto:j.baehr@iwar.tu-darmstadt.de)

Homepage: <https://www.iwar.tu-darmstadt.de/sur/>



# The Development of Steel Products in Line with the Circular Economy Principles

**Abstract:** *The steel industry is a major causer of environmental impact related to the increasing resource demand. To reach climate targets, urgent action is needed. Despite the success of the established recycling system, environmental saving potentials of the Circular Economy (CE) in a wider sense are mostly untapped. To foster the implementation, sector-specific knowledge from applying the CE is required. By synthesizing multiple case studies of circular steel products, this contribution offers valuable insights. The research shows, that the CE has enormous potential to reduce the Carbon Footprint (CF), Cumulative Energy Demand (CED), and Material Footprint (MF) of steel products. But applying CE is not per se environmentally beneficial, which is why the implementation needs to be analyzed thoroughly. By considering the close interplay between material, process, and product level, conditions for an environmentally sustainable product system can be derived and the overcompensation of savings can be avoided.*

## 1 Introduction

The process of climate change accelerates unhindered and requires fast action. A significant share of environmental impact, 7.2% of global greenhouse gas (GHG) emissions, are directly caused by the steel sector (OECD, 2019). Steel is fundamental for modern society and its infrastructure resulting in a steadily increasing global demand and environmental impact. By making use of steel scrap at the End-of-Life (EoL) of products, the material flow is closed, substituting primary resources. Producing steel from secondary steel is environmentally beneficial as the CF and CED can be halved (Hagedorn et al., 2022a, OECD, 2019). The global scrap content in steel is on average 37% and in Germany even 43.7% (Worldsteel, 2019; WV Stahl, 2020). Despite the success story of the established recycling system, it has its limits when it comes to e.g. contamination as well as supply and demand of needed scrap qualities (Daehn et al., 2017, Dworak et al., 2021). That substantiates the urgent need for further far-reaching measures to be on track of climate targets. One promising solution approach is the Circular Economy (CE) in a wider sense, which requires to rethink existing value chains. Considering the variety of definitions, Kirchherr et al. (2017) summarizes a CE to be an economy, which replaces EoL with reducing, reusing, recycling, and recovering material along the entire value chain of products and that way achieving environmental, economic, and social sustainability. Many studies of this contested approach stress the theoretical environmental and resource saving potentials and at the same time the need for sector-specific knowledge of the CE implementation (Saidani et al., 2019). By carrying out several research projects of applying the CE in the field of steel and analyzing their results from an environmental perspective, specific insights were generated for steel products (Hagedorn et al., 2021, Hagedorn et al., 2022a, Hagedorn et al., 2022b). The contribution focuses on how to rethink value chains

of steel products to achieve a CE. It summarizes the main findings differentiated by material, process, and product level. It covers relevant technical parameters and influencing factors, which are relevant to reach the target of environmental sustainability. Moreover, it points out methodological aspects that are important for the interpretation of the results.

## **2 Methodology**

The contribution synthesizes results from multiple research projects (Hagedorn et al., 2021, Hagedorn et al., 2022a, Hagedorn et al., 2022b). All case studies focus on the environmental assessment of circular interventions on product level. The products are a U-bolt used in the automotive industry and cutting tools from the metalworking industry. The analyses include Life Cycle Assessment (LCA), which were carried out with OpenLCA and the database Ecoinvent 3.6. The choice of impact categories was based on the ecological hotspots of the steel industry - CF, CED, MF. Further, CE indicators were evaluated in previous own and literature work, but were found to be inadequate and have a limited scope (Hagedorn et al., 2022a, Saidani et al., 2019). The findings indicate that the MF and mass-based material efficiency indicators do not correlate with the CF and CED, thus, confirm the importance of including multiple indicators when aiming for environmental sustainability. Regarding the allocation, the cut-off approach was chosen for considering recycling. Also, the case studies include further multifunctional processes, which was addressed with system expansion wherever possible and otherwise with mass-based allocation.

## **3 Essentials from a Multilevel Perspective**

The material, process, and product level have a co-dependency as all three contribute to a certain function and have requirements. To achieve e. g. a defined toughness, which is required by the function of the target product, the material composition (material) in combination with a defined heat treatment (process) and a certain geometrical property (product) needs to be determined. Therefore, in the following the application of the CE to steel products is described from all three perspectives including their interlinkages.

### **3.1 Material**

The material steel describes thousands of steel types with varying chemical compositions and properties. Within the case studies various steel alloys were analyzed regarding their environmental performance. One of the alloys contains more than 13% of alloying elements, which is classified as a high-alloyed steel. It was expected to be relevant as individual alloying elements have a significantly higher environmental impact compared to e.g. iron. To evaluate the alloys, 1 kg of steel produced in Germany in an Electric Arc Furnace (EAF) with a scrap content of 95% was compared in relation to the same application. The CF is between 0.6-0.8 kg CO<sub>2</sub> eq, the CED is between 10.3-13.3 MJ-eq, and the MF is between 3.4-13.2 kg showing a notable difference (Hagedorn et al., 2022a, Hagedorn et al., 2022b). But within the iterative LCAs, it was found that per kg or ton material, the choice of energy mix and production route (EAF, Blast Oxygen Furnace) as well as the share of secondary material had a higher influence than the varying chemical composition.

### 3.2 Process

The focus should not be set on the material level only, because a change of the alloying concept also influences the processes. One example is that by adding diffusion-inhibiting elements in the alloying concept of the U-bolt, the critical cooling rate can be reduced to such an extent that martensitic microstructures can be obtained by air cooling. This way, the heat treatment as an energy-intensive process becomes unnecessary, which is favorable for the environmental performance (Hagedorn et al., 2022b). The same applies to the integration of product systems, where the alternative semi product is already in a heat-treated condition. Also, the processes may be shortened, e.g. the shaping processes when the circular semi product is closer to the target geometry (Hagedorn et al., 2022a). Such changes on process level do not necessarily result in shortening or eliminating. Changed properties can require other processes, process parameters, and auxiliary materials. They can also result in a longer process requiring more energy and auxiliary materials (Hagedorn et al., 2021). One case study showed that additional transportation for returning steel products at the EoL and the prolonging of shaping processes has the potential to compensate for the environmental savings achieved by refabricating steel at its EoL (Hagedorn et al., 2021, Hagedorn et al., 2022a). Therefore, the changes on process level must be developed and evaluated thoroughly to determine possible conditions to create an environmental beneficial product system compared to the status quo and prevent possible back-firing. Generally, it was found that processes relevant to the environmental performance of steel products are steel production, heat treatment, and subtractive manufacturing.

### 3.3 Product

The overarching goal of production processes is to achieve a product, which provides a certain function. The adaptations, developments, and optimizations on material and processes level are thus closely interlinked to the product. It was found that the changes in material properties are often central to define a products functionality. For example, the cyclic strength is the core property for the U-Bolt and the cutting resistance for the included cutting tools. The change of the material characteristics helps to quantify the change of the provided service and possible consequence on product lifetime (Hagedorn et al., 2022b). The increase of product service is in terms of environmental assessment favorable and leads in the covered cases to a reduction of environmental impact per service unit. The actual usage of the increased product service or realization of product lifetime and thus the real environmental savings depend on the behavior of the user. It is often difficult to collect data to retrieve relevant information on that, especially within the development stage. It is also possible, that the product is subject to excessive functionality as the case of the U-bolt illustrates. It allowed the application of lightweight design, which further increased the resource efficiency and saved environmental impact. Generally, it was found that closing, narrowing, and slowing have an enormous potential to reduce the CF (30-77%), the CED (30-74%) and the MF (30-84.5%) of steel products and increase its resource efficiency (Hagedorn et al., 2021, Hagedorn et al., 2022a). Sensitive parameters were transportation mode and distance, production yields, and energy mix. Also, the recyclability of the new steel grade, which has an unusual manganese content, has an expected influence, but is difficult to quantify.

### 3.4 Multi Product System

Applying the CE on product level offers a range of opportunities to close so-called inner circles, meaning the retention of material and product characteristics by CE strategies, which delay the remelting, which require the adjustment of properties. This can lead to the integration of product systems as shown by the case studies

(Hagedorn et al., 2021, Hagedorn et al., 2022a). It can compromise the integration of products with the same or different functionality within the process chains of one or multiple manufacturers. It was found that the integration of process chains of varying manufacturers is characterized by the challenge of information exchange. It concerns the availability of materials in terms of time and quantity, the characteristics, and specific usage, which are sensitive data. One major challenge is the identification of suitable products for such industrial symbioses. It is much easier to consider a well-known process chain and product lifecycle. Integrating an alloy, which was so far not considered for an application, can lead to the outperformance of the current product system. On the other hand, such characteristics can also be exclusion criteria, e.g. corrosion resistance is mandatory for medical and food industry.

## 4 Conclusions

The global steel sector causes significant environmental impact and thus contributes largely to the accelerating climate change. By establishing a recycling system, the steel industry achieved to make use of products at the EoL, substitute primary material and reduce its environmental burden. But its implementation and environmental potential are limited. Thus, the steel industry should focus also on the CE in a wider sense. LCA is a profound methodology to assess these wider systems. To provide sector-specific knowledge in applying the CE, the findings of several research projects and case studies on product-level were synthesized and presented. The previous work stresses the close interlinkages between the material, process, and product level. All levels should be considered when implementing the CE to prevent the potential overcompensation of environmental savings. It was found that the chemical composition of steel influences the environmental performance on material level notably. But the choice of production route, energy mix, and share of secondary material is more significant. Also, the material characteristics are crucial for the interplay with the process level and the functional unit of the product. Regarding the process chain, applying CE can lead to processes becoming unnecessary, shortened, or prolonged. It might also require additional process steps, and auxiliary materials, which need to be quantified thoroughly to not overlook new potential ecological hotspots. Regarding the product level, especially the influence on the provided product service needs to be taken into account. Analyses of material characteristics are helpful for reasonable quantification. Applying the CE to steel products can lead to an increase of product service. In one case, excessive functionality was achieved, which allowed the application of lightweight design and further reduced the environmental impact.

In summary, the CE offers product-centric solutions to further reduce the environmental impact of the steel industry. It requires the integration of product systems, which needs to be carefully developed and examined to realize the environmental saving potentials.

## References

- Daehn, K.; Serrenho, A.; Allwood, J. (2017): How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? *Environmental Science & Technology* 51: 6599–6606.
- Dworak, S.; Fellner, J. (2021): Steel Scrap Generation in the EU-28 since 1946 – Sources and Composition. *Resources, Conservation and Recycling* 173: 105692.

- Hagedorn, W.; Jäger S.; Wieczorek, L.; Kronenberg, P.; Greiff, K.; Weber, S.; Roettger, A. (2022a): More than Recycling – The Potential of the Circular Economy Shown by a Case Study of the Metal Working Industry. *Journal of Cleaner Production* 377: 134439.
- Hagedorn, W.; Gramlich, A.; Greiff, K.; Krupp, U. (2022b): Alloy and Process Design of Forging Steels for Better Environmental Performance. *Sustainable Materials and Technologies*.
- Hagedorn, W.; Greiff, K.; Biengen, K.; Liedtke, C. (2021): Circular Economy Strategies in Practice. *Ecological Potentials of Linking Value Chains in the Metalworking Industry*. Sendai, Japan, The Institute of LCA.
- Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. (2017): Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling* 127: 221–232.
- OECD (2019): *Global material resources outlook to 2060*. Paris, France. OECD Publishing.
- Saidani, M.; Yannou, B.; Leroy, Y.; Cluzel, F.; Kendall, A. (2019): A Taxonomy of Circular Economy Indicators. *Journal of Cleaner Production* 207: 542–59.
- Worldsteel (2019): *Sustainable steel indicators 2019 and the steel supply chain*. Worldsteel Association.
- WV Stahl (2020): *Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2020*.

### **Kontakt**

Wiebke Hagedorn, M. Sc., Research Assistant  
RWTH Aachen University – Chair of Anthropogenic Material Cycles  
+49 241 80 99346  
wiebke.hagedorn@ants.rwth-aachen.de  
www.ants.rwth-aachen.de



## **Einflussfaktoren auf das Leichtverpackungsabfall-Aufkommen**

**Abstract:** Für die Untersuchung des Abfallaufkommens von Leichtverpackungen (LVP) wurden in einem zweiwöchigen Zeitraum im Jahr 2019 deutschlandweit in ausgewählten Haushalten LVP-Abfälle im Rahmen einer Feldstudie gesammelt. Die gewonnenen Daten zu insgesamt 254.032 g an LVP bzw. 25.762 Einzelteilen aus 249 Haushalten bzw. 639 Personen wurden mit soziodemographischen (z. B. Haushaltsgröße) und abfallwirtschaftlichen (z. B. den lokalen Entsorgungssystem) Angaben ausgewertet. 70 % der LVP wurden für Lebensmittel und 30 % für nicht Lebensmittel (z. B. Medikamente und Waschmittel) eingesetzt. Das jährliche Pro-Kopf-LVP-Abfallaufkommen der Studienteilnehmer (639 Personen) liegt mit 9,5 kg deutlich unterhalb des durchschnittlichen Pro-Kopf-LVP-Abfallaufkommen von 32 kg aus dem Jahr 2019. Weiter nimmt das Pro-Kopf-Abfallaufkommen mit abnehmender Haushaltsgröße zu (z.B. werden in Ein-Personen-Haushalten im Vergleich zu fünf und mehr Personen-Haushalten fast dreimal mehr Pro-Kopf-Abfälle produziert). Bei Holsystemen konnte bezogen auf den zweiwöchigen Sammelzeitraum mit 420 g ein um 45 % höheres Pro-Kopf-Abfallaufkommen im Vergleich zu Bringsystemen mit 289 g festgestellt werden.

### **1 Einleitung**

Kurzlebige Verpackungen machen heute mehr als 50 % der Kunststoffabfälle in Deutschland aus (Mellen und Becker 2018). Im Zeitraum von 1991 (1,64 Mio. t) bis 2020 (3,21 Mio. t) führte dies fast zu einer Verdopplung der Kunststoffverpackungsabfälle (Burger et al. 2022). Entsprechend stehen Kunststoffe auf der europäischen und deutschen Agenda zur Weiterentwicklung kreislaufwirtschaftlicher Ansätze: Auf europäischer Ebene hat die EU 2018 die „Europäische Strategie für Kunststoffe in einer Kreislaufwirtschaft“ vorgestellt, welche vorsieht, dass alle in der EU in Verkehr gebrachten Kunststoffverpackungen bis 2030 entweder wiederverwendbar oder kostengünstig recycelbar sind (European Commission 2018). Mit diesem Ansatz soll der derzeit vorherrschende lineare Fluss (offener Kreislauf) von Kunststoffen entlang der Wertschöpfungskette von der Produktion bis zur Verwendung und Entsorgung durchbrochen werden und sich zu einer echten Kreislaufwirtschaft weiterentwickeln (Blomsma und Brennan 2017). In Deutschland musste durch das im Jahr 2019 in Kraft getretene Verpackungsgesetz (VerpackG) bis zum Jahr 2022 eine werkstoffliche („mechanische“) Recyclingquote von 63 % erreicht werden (VerpackG 2017).

Die Zentrale Stelle Verpackungsregister verfügt in Deutschland über detaillierte Informationen zu den innerhalb des deutschen Marktes in Verkehr gebrachten Mengen an Kunststoffverpackungen. Dieser Detaillierungsgrad wird auf der Seite des anfallenden Kunststoff-Verpackungsabfalls durch Abfallanalysen üblicherweise nicht erreicht. Veröffentlichte Analysen stellen den Verpackungsabfallanfall i.d.R. als absolute

Gesamtmenzen z.B. der Kategorien Kunststoffe, Aluminium und Papier (Burger et al. 2022), nach Post-Consumer- und Post-Industrial-Abfällen (Lindner et al. 2022) dar, oder gehen nicht über den Verpackungs- und Packstofftyp hinaus bzw. beziehen sich auf den Sortieranlagenoutput, aus dem der Input abgeschätzt wird (Christiani und Beckamp 2020). Genaue Sortieranlageninput-Analysen über die Eigenschaften der Verpackungen (z.B. Verpackungstyp und -größe und Füllguttyp) sind für Prognosen von Abfallmengen und deren Zusammensetzung jedoch unabdingbar, ebenso wie für die Entwicklung zukunftsfähiger Aufbereitungs- und Recyclingverfahren. Eine zentrale Rolle spielt der Verbraucher, der als Abfallerzeuger die grundsätzliche Entscheidung über den Entsorgungsweg trifft. Dabei wird diese Entscheidung von sozioökonomischen Faktoren wie Alter, Bildungsgrad und Haushaltsgröße beeinflusst, aber auch von der Struktur des Entsorgungsgebietes (städtische oder ländliche Region), dem Umweltbewusstsein, von saisonalen Einflüssen wie Jahreszeiten, von den bereits erwähnten rechtlichen Rahmenbedingungen oder dem kommunenspezifischen Entsorgungssystem (Clauß 2017). Die Entsorgung liegt in der Verantwortung der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger, sodass sich über die Jahre Bringsysteme (Wertstoffhof und -insel und Depotcontainer) und Holsysteme (gelber Sack, gelbe Tonne, Wertstofftonne und -Sack) herausgebildet haben. Durch Holsysteme, d. h. die Abholung der Abfälle an der Grundstücksgrenze der Haushalte, können hohe Erfassungsquoten der Abfälle erzielt werden, und dem Erzeuger entsteht wenig Aufwand für die Entsorgung (Hesse und Clausen 2019). Bringsysteme, d. h. das Transportieren der gesammelten Abfälle durch den Verbraucher zu definierten Sammelstellen finden Anwendung, da hierbei eine höhere Trennqualität erreicht werden kann (Wagner et al. 2018). In Deutschland wurden im Jahr 2015 1,22 Mio. t durch Tonnen (48,0 %), 1,22 Mio. t durch Säcke (48,0 %), 0,02 Mio. t über Wertstoffhöfe (0,8 %) und 0,08 Mio. t über andere Systeme wie Depotcontainer gesammelt (3,2 %) (Wagner et al. 2018).

Mangelnde öffentliche Datengrundlagen dieser LVP-Ströme sowie quantitativer Analysen des Einflusses der Einstellungen der Verbraucher auf deren LVP-Abfallaufkommen behindern den abfallwirtschaftlichen Fortschritt. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Quantifizierung der Einflüsse unterschiedlicher Haushalts- und Gemeindegrößen und von Hol- und Bringsystemen auf das LVP-Abfallaufkommen.

## 2 Methodik

Für die Generierung eines Datensatzes (Primärdatenerhebung) zum Leichtverpackungsabfall-Aufkommen wurde eine deutschlandweite Feldstudie (Schmidt et al. 2021) im Rahmen des BMBF-Forschungsprojekts MaReK (Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen) (Lang-Koetz et al. 2021) in Kooperation mit dem Forschungsprojekt VerPlaPoS (Verbraucherreaktionen auf Kunststoffe und deren Vermeidungsmöglichkeiten am Point of Sale) der Stadt Straubing (Decker et al. 2021) durchgeführt. Aus 500 Teilnehmern, die in einer ersten Online-Befragung teilnahmen und unter anderem zu ihren Einkaufsgewohnheiten, zum Vermeidungsverhalten bzgl. Kunststoffverpackungen, zum lokalen Entsorgungssystem und zu demografischen Daten befragt wurden, wurden 350 aus dem gesamten Bundesgebiet u.a. anhand der Haushaltsgröße und der Einwohnerzahl ihres Wohnortes für die Teilnahme an der Feldstudie ausgewählt. Die Studie zur Primärdatenerhebung fand zwischen August und November 2019 statt. Hierzu sammelten die teilnehmenden Haushalte ihre LVP-Abfälle in einem bereitgestellten transparenten 80-Liter-Polyethylen-Sack innerhalb eines variablen zweiwöchigen Zeitraums. Insgesamt 249 Teilnehmer (639 Personen, unter Berücksichtigung der Haushaltgröße) schickten ihre gesammelten LVP-Abfälle zurück an die Hochschule Pforzheim. So wurden insgesamt 207 kg LVP bzw. ca. 21.380 Einzelteile einer Tiefencharakterisierung unterzogen. Die Ergebnisse dieser Charakterisierung



wurden bereits publiziert (Schmidt et al. 2021; Schmidt et al. 2022; Woidasky et al. 2021). Ergänzende Charakterisierungsarbeiten führten insgesamt zu einer untersuchten Gesamtmasse von 254 kg bzw. 25.762 Einzelteilen. Dieser erweiterte Datensatz wird für die vorliegende Arbeit verwendet.

Für das Sicherstellen einer statistisch auswertbaren Studienteilnehmeranzahl (und damit auch Masse) wurde eine Mindestanzahl von zwei teilnehmenden Haushalten pro Kombination aus Haushalts- und Gemeindegrößenkategorie (s. Tabelle 1) festgelegt. Die Mindestanzahl von zwei Teilnehmern wird von den Matrixfeldern G4H4 (**G4**: Gemeindegröße 100.000 bis unter 200.000 Einwohner; **H4**: Vier-Personen-Haushalt), G4H5 und G5H5 unterschritten und von G1H5 gerade erfüllt. Für die quantitative Beschreibung linearer Zusammenhänge wurde die Methode der Regressionsanalyse verwendet sowie für Mittelwertvergleiche der t-Test und der Mittelwertvergleich nach Kruskal-Willis. Für beide Testverfahren wurde ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  festgelegt.

### 3 Ergebnisse

Tabelle 1 stellt das Pro-Kopf-Abfallaufkommen unterschiedlicher Haushalts- und Gemeindegrößenklassen der Studienteilnehmer, normiert auf das mittlere Pro-Kopf-Abfallaufkommen von 398 g dar. Die Daten in der Matrix sind in Form zweier Heatmaps dargestellt, in denen die Farbintensität bei größeren Zahlen zunimmt. Grün hinterlegte Zahlen repräsentieren das Verhältnis des Pro-Kopf-Abfallaufkommens zum mittleren Pro-Kopf-Abfallaufkommen je Matrixfeld, wohingegen blau hinterlegte Zahlen dieses Verhältnis innerhalb einer Haushaltsgrößen- oder Gemeindegrößenkategorie repräsentieren. Rot markierte Zahlen unterschreiten die Mindestanzahl von zwei teilnehmenden Haushalten je Matrixfeld und können daher als Ausreißer interpretiert werden.

Tabelle 1: Heatmap des (normierten) Pro-Kopf-Abfallaufkommens nach Gemeinde- und Haushaltsgrößen

Haushalts- größe (HH)	Gemeinde- größe (GG)	unter 5.000 Ew (G1)	5.000 bis unter 20.000 Ew (G2)	20.000 bis unter 100.000 Ew (G3)	100.000 bis unter 200.000 Ew (G4)	200.000 bis unter 500.000 Ew (G5)	500.000 und mehr Ew (G6)	*PKA je HH
1		1,93	2,47	1,49	2,12	1,53	1,77	1,70
2		1,10	1,37	1,43	1,14	1,15	1,14	1,24
3		1,04	1,25	0,87	0,75	0,97	1,03	0,98
4		0,70	0,78	0,67	1,11	0,63	1,23	0,77
5 und mehr		0,96	0,71	0,60	-	1,86	0,27	0,60
*PKA je GG		0,94	1,06	0,94	1,11	1,15	0,95	1,00

\*PKA: Pro-Kopf-Abfallaufkommen; Wertebereich von 0,27 - 2,47

Die Verteilung aus Tabelle 1 zeigt, dass das Pro-Kopf-Abfallaufkommen mit abnehmender Haushaltsgröße zunimmt (Spalte „PKA je HH“). In Ein-Personen-Haushalten werden im Vergleich zu fünf und mehr Personen-Haushalten fast dreimal mehr Pro-Kopf-Abfälle produziert. Eine Regressionsanalyse ( $R^2 = 0,96$ ,  $p = 0,004$ ) bestätigt hierbei eine sehr starke lineare Korrelation. Ein Mittelwertvergleich der mittleren Pro-Kopf-

Abfallaufkommen mittels Kruskal-Wallis-Test zeigt, dass alle Mittelwerte  $\alpha = 0,05$  unterschreiten und sich damit signifikant voneinander unterscheiden, mit der Ausnahme der Mittelwerte H3 zu H4 ( $p = 0,114$ ). Eine Regressionsanalyse des Pro-Kopf-Abfallaufkommens je Gemeindegroßenkategorie zeigt keinen linearen Zusammenhang ( $R^2 = 0,0921$ ,  $p = 0,559$ ). Der Mittelwertvergleich zeigt, dass fast alle Mittelwerte des Pro-Kopf-Abfallaufkommens  $\alpha = 0,05$  überschreiten, lediglich mit Ausnahme der Gemeindegroßenkombinationen G5 - G6 ( $p = 0,010$ ), G4 - G6 ( $p = 0,037$ ), G3 - G5 ( $p < 0,001$ ) und G3 - G4 ( $p = 0,035$ ). Zudem konnte ein um 45 % höheres mittleres Pro-Kopf-Abfallaufkommen im Holsystem mit 420 g im Vergleich zum Bringsystem mit 289 g festgestellt werden. Ein t-Test zeigt einen signifikanten Unterschied des mittleren Pro-Kopf-Abfallaufkommens ( $t(227) = -5,835$ ,  $p < 0,001$ ).

Tabelle 2 stellt die Lebensmittelgruppen unterschiedlicher Haushaltsgrößen dar. Der Datensatz teilt sich in 70 % Lebensmittel- und 30 % nicht Lebensmittel-Verpackungen (z. B. Medikamente und Waschmittel). Milch u. Milchprodukte (23,8 %), Obst und Gemüse (11,2 %) und Getränke (9,6 %) werden unabhängig der Haushaltsgröße am häufigsten konsumiert. Beispielsweise werden Fertiggerichte insbesondere in Haushalten mit ein-, zwei und fünf und mehr Personen konsumiert.

Tabelle 2: Produktkategorien der Packgüter in Abhängigkeit der Haushaltsgröße (HH)

Packgut (Angaben in Gew.-%)	1P-HH	2P-HH	3P-HH	4P-HH	5P und mehr HH	Gesamt
Keine Lebensmittel	32,2	29,7	29,9	30,3	25,9	29,8
Milch u. Milchprodukt	20,3	24,8	22,1	25,9	26,4	23,8
Obst/Gemüse	12,6	11,2	11,7	9,1	11,3	11,2
Getränke	10,1	9,3	12,0	7,1	9,1	9,6
Sonstige Lebensmittel	4,6	4,5	3,7	4,1	5,0	4,3
Trockene Prod.	3,7	3,8	4,0	5,5	3,0	4,0
Fertiggericht	4,6	4,1	2,9	3,0	4,1	3,7
Fleisch/Geflügel/Fisch	2,5	2,3	3,1	3,0	3,8	2,9
Backware	2,3	2,7	2,3	3,6	3,4	2,8
Süßwaren	2,5	3,2	2,7	2,6	2,4	2,7
Wurstware	2,2	1,3	1,7	2,8	3,2	2,1
Ersatz tierischer Prod.	0,5	1,5	1,5	0,9	1,0	1,1
Salzgebäck	1,1	0,9	1,1	1,1	0,6	1,0
Teigwaren	0,7	0,7	1,3	1,2	0,7	0,9
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

## 4 Diskussion

Zusammen produzierten die 249 Haushalte bzw. 639 Personen 254.032 g an LVP-Abfällen, was einem durchschnittlichen Pro-Kopf-Abfallaufkommen von 398 g im zweiwöchigen-Sammelzeitraum gleichkommt. Dies entspricht bei linearer Hochrechnung einem jährlichen Pro-Kopf-Abfallaufkommen von 9.552 g, welches deutlich unterhalb des durchschnittlichen Pro-Kopf-LVP-Abfallaufkommens von 32 kg eines Deutschen aus dem Jahr 2019 liegt (Statistisches Bundesamt). Bereits durch die Auswahl der Probanden durch einen Anmeldeprozess für die Studie kann ein überdurchschnittliches Verpackungs-Vermeidungsverhalten, zumindest aber ein bewusster Umgang bzgl. Kunststoffverpackungen vermutet werden. Dies wird vermutlich durch das Wissen der Teilnehmer um die detaillierte Analyse ihrer Verpackungsabfälle verstärkt. Zudem stammen 70 % der Verpackungen aus dem Lebensmittelbereich. Weiter werden Fertiggerichte insbesondere in Ein-, Zwei- und Fünf- und größeren Personen-Haushalten konsumiert, wobei in der Hälfte der Haushalte mit fünf und mehr Personen keine unter 18-jährigen Personen leben. Es handelt sich demnach wohl nicht um die klassische Familienstruktur, sondern um z.B. Wohngemeinschaften, was den erhöhten Verzehr von Fertiggerichten erklärt und zeigt, dass Fertiggerichte vermehrt in Ein- und Zweipersonen-Haushalten konsumiert werden.

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass das Pro-Kopf-Abfallaufkommen mit zunehmender Haushaltsgröße abnimmt, die Gemeindegröße jedoch keinen entsprechenden Einfluss besitzt. Eine Zunahme des Pro-Kopf-Abfallaufkommens bei kleineren Haushalten deckt sich mit den Aussagen früherer Veröffentlichungen (Hoffmeister 2008; Umweltbundesamt 2022). Dies liegt letztlich am Trend hin zu kleineren Gebindegrößen von Verkaufsverpackungen und der damit einhergehenden nicht proportionalen Verringerung der Füllmenge im Verhältnis zur Verpackung. Weiter führen die Urbanisierung und der soziodemographische Wandel zur Zunahme kleinerer Haushalte, sodass zukünftig mit einem weiter steigenden Verpackungsabfallaufkommen zu rechnen ist.

Weiter wurde das Pro-Kopf-Abfallaufkommen der Studienteilnehmer nach Hol- und Bringsystem untersucht. Hierbei konnte ein um 45 % erhöhtes Abfallaufkommen bei Holsystemen im Vergleich zu Bringsystemen festgestellt werden. Dies kann daran liegen, dass Haushalte in Bringsystemen aus Bequemlichkeitsgründen vermehrt Abfälle im Restmüll entsorgen und damit dem LVP-Wertstoffkreislauf entziehen oder eine gründlichere Restentleerung zu geringeren Pro-Kopf-Abfallaufkommen führt, da die Abfälle oft in der Wohnung vor der Entsorgung zwischengelagert werden. Weiter kann auch ein geringerer Fehlwurfanteil die Massedifferenz erklären, da in Bringsystemen (z.B. Wertstoffhof) eine Informationsbereitstellung durch Mitarbeiter erfolgen kann.

## 5 Fazit

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass der Pro-Kopf-Abfallanfall mit abnehmender Haushaltsgröße zunimmt, die Gemeindegröße jedoch keinen entsprechenden Einfluss besitzt. Holsysteme weisen ein um ca. 45 % höheres Pro-Kopf-Abfallaufkommen als Bringsysteme auf. Zudem führt ein ausgeprägtes Umweltbewusstsein der Teilnehmer in Form eines Reduktionsverhalten von Kunststoffabfällen zu einer massiven Reduktion (ca. 70 % weniger als im Durchschnitt in Deutschland). Dies ist ein deutliches Indiz für das verhaltensbedingte Einsparungspotential von Leichtverpackungen. Unter Berücksichtigung des Füllguttyps

konnte eine Verteilung von 70 % Lebensmittel- und 30 % nicht Lebensmittel-Verpackungen festgestellt werden. Weitere Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf das LVP-Abfallaufkommen, auf Restfüll- und Fehlwurfanteile sowie die erneute Durchführung der Studie sind in Planung.

## Literatur

- Blomsma, F.; Brennan, G. (2017): The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. In: *Journal of Industrial Ecology* 21 (3), S. 603–614. DOI: 10.1111/jiec.12603.
- Burger, A.; Cayé, N.; Schüler, K. (2022): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2020. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-09-29\\_texte\\_109-2022\\_aufkommen-verwertung-verpackungsabfaelle-2020-d.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-09-29_texte_109-2022_aufkommen-verwertung-verpackungsabfaelle-2020-d.pdf), zuletzt geprüft am 17.12.2022.
- Christiani, J.; Beckamp, S. (2020): Was können die mechanische Aufbereitung von Kunststoffen und das werkstoffliche Recycling leisten? In: Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker und Alexander Gosten (Hg.): *Energie aus Abfall*, Bd. 17. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, S. 139–152, zuletzt geprüft am 03.11.2021.
- Clauß, D. (2017): Abfallmenge und Abfallzusammensetzung. In: Martin Kranert (Hg.): *Einführung in die Kreislaufwirtschaft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 65–110.
- Decker, T.; Lippl, M.; Albrecht, S.; Bauer, K.D.; Drechsel, P.; Frommeyer, B. et al. (2021): Verbraucherreaktionen bei Plastik und dessen Vermeidungsmöglichkeiten am Point of Sale (VerPlaPoS). Abschlussbericht. Online verfügbar unter [https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-06/Abschlussbericht%20\\_VerPlaPoS\\_2021.pdf](https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-06/Abschlussbericht%20_VerPlaPoS_2021.pdf), zuletzt geprüft am 02.09.2022.
- European Commission (2018): A European Strategy for Plastics in a Circular Economy. European Commission. Brussels, Belgium. Online verfügbar unter [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF), zuletzt geprüft am 14.04.2022.
- Hesse, K.; Clausen, U. (2019): Entsorgung und Kreislaufwirtschaft. In: Kai Furmans und Christoph Kilger (Hg.): *Betrieb von Logistiksystemen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 239–303.
- Hoffmeister, J. ((2008)): Demografie und Abfall – Wechselwirkungen zwischen sozio-demografischen Einflussfaktoren und dem spezifischen Abfallaufkommen. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky, Andrea Versteyl (Hg.): *Planung und Umweltrecht*. Neuruppin: TK, S. 15–28.
- Lang-Koetz, C.; Woidasky, J.; Schmidt, J.; Auer, M.; Kusch, A.; Gasde, J. et al. (2021): Markerbasiertes Sortier- und Recyclingsystem für Kunststoffverpackungen. Schlussbericht des BMBF-Forschungsvorhabens „MaReK“. Hg. v. Technische Informationsbibliothek. Pforzheim, Germany. Online verfügbar unter <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:1777963265/Markerbasiertes-Sortier-und-Recyclingsystem-f%C3%BCr?cHash=dd74a446d37fa737fc852e56bc425726>, zuletzt geprüft am 19.08.2022.
- Lindner, C.; Schmitt, J.; Fischer, E.; Hein, J. (2022): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen. Conversio GmbH. Online verfügbar unter [https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung\\_Stoffstrombild\\_2021\\_13102022\\_1\\_.pdf](https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf), zuletzt geprüft am 23.11.2022.
- Mellen, D.; Becker, T. (2018): Kunststoffe. In: Peter Kurth, Anno Oexle und Martin Faulstich (Hg.): *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 327–345.

- Schmidt, J.; Auer, M.; Moesslein, J.; Wendler, P.; Wiethoff, S.; Lang-Koetz, C.; Woidasky, J. (2021): Challenges and Solutions for Plastic Packaging in a Circular Economy. In: Chemie Ingenieur Technik 93 (11), S. 1751–1762. DOI: 10.1002/cite.202100110.
- Schmidt, J.; Grau, L.; Auer, M.; Maletz, R.; Woidasky, J. (2022): Multilayer Packaging in a Circular Economy. In: Polymers 14 (9). DOI: 10.3390/polym14091825.
- Statistisches Bundesamt: Verpackungsmüll 2019: Pro Kopf 4 Kilogramm mehr eingesammelt als im Vorjahr. Wiesbaden. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/03/PD21\\_132\\_321.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/03/PD21_132_321.html), zuletzt geprüft am 03.11.2022.
- Umweltbundesamt (2022): Verpackungsabfälle, zuletzt aktualisiert am <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/verpackungsabfaelle#grunde-fur-den-anstieg-der-verpackungsabfalle>.
- VerpackG (2017): Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 45 / Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen (Verpackungsgesetz–VerpackG), S. 2234–2261. Online verfügbar unter [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F%5B@attr\\_id%3D%27bgbl117s2234.pdf%27%5D#\\_\\_bgbl\\_\\_%2F%2F%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl117s2234.pdf%27%5D\\_\\_1581674018469](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F%5B@attr_id%3D%27bgbl117s2234.pdf%27%5D#__bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl117s2234.pdf%27%5D__1581674018469), zuletzt geprüft am 15.02.2021.
- Wagner, J.; Günther, M.; Rhein, H.-B.; Meyer, P. (2018): Analyse der Effizienz und Vorschläge zur Optimierung von Sammelsystemen der haushaltsnahen Erfassung von Leichtverpackungen und stoffgleichen Nichtverpackungen auf der Grundlage vorhandener Daten. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-effizienz-vorschlaege-zur-optimierung>, zuletzt geprüft am 25.11.2022.
- Woidasky, J.; Auer, M.; Schmidt, J.; Kusch, A.; Gasde, J.; Lang-Koetz, C. et al. (2021): „Tracer-Based-Sorting“ in der Verpackungs-Abfallwirtschaft. In: Müll und Abfall (7). DOI: 10.37307/j.1863-9763.2021.07.05.

## Kontakt

*M.Sc., 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](mailto:Jannick.schmidt@hs-pforzheim.de)



# TEIL 3

## Bau

Leitung:

Prof. Dr. Anke Bockreis





## Willingness to pay for recycled aggregates in concrete

**Abstract:** *The construction industry claims a vast quantity of natural resources and is responsible for more than half of the waste generated in Germany. R-concrete contains recycled aggregates and is a resource efficient alternative to primary concrete. A central stakeholder whose preferences may significantly influence the use of R-concrete is the construction client. Despite their central role in this respect, little is known about clients. This study contributes to the understanding of the clients' demand decision. It determines the willingness to pay (WTP) for recycled aggregates and it identifies which factors influence clients' propensity to choose R-concrete. Throughout these questions, differences between client groups are considered. In addition to item-based questions on potential barriers and drivers, a discrete choice experiment is applied in order to estimate the clients' WTP for a certain share of recycled aggregates in concrete. Positive and significant WTP estimates were found for all client groups. Overall, clients are willing to pay 0.26 € for every percentage point increase of added recycled aggregates. Private individuals' WTP is lowest, while organizations are willing to pay most. However, even the highest WTP found in this study does not equal the price premium currently seen. The main barriers for demanding R-concrete are based on a lack of information. Therefore, in order to foster the use of R-concrete, instruments that rely on information provision are recommended. Moreover, the significant differences in client groups should be considered in designing these instruments.*

### 1 Introduction

The construction industry claims a vast quantity of natural resources. Of the 733 million tons of non-renewable resources extracted in Germany in 2019, 550 million tons (75 %) are used in the construction industry (Destatis, 2021). At the other end of life, it is responsible for more than half of all the waste generated in Germany (Destatis, n.d.). While the recovery rate of construction and demolition waste is comparably high at 88 % (Destatis, n.d.), the majority of recycled aggregates is used for road filling, which is considered downcycling (Di Maria et al., 2018; Knappe et al., 2012; Kreislaufwirtschaft Bau, 2021). One alternative for an application that retains the value of this material are recycled aggregates for concrete production (Di Maria et al., 2018). In so called resource-saving concrete ("R-concrete" from here on), the aggregates, usually primary gravel and sand, are partly replaced by recycled aggregates from construction and demolition waste.

Because their demand and expectations are what initiates and shapes a construction project, clients are often seen as “the most influential stakeholder on construction projects” (Onubi et al., 2020, p. 1). With this role, they are also highly influential when it comes to adopting sustainable building practices. The lack of clients’ demand for recycled materials such as R-concrete explains why its use has not yet been established (Katerusha, 2021; Pitt et al., 2009). The reasons why the demand for R-concrete is low, however, have yet to be investigated. One of the barriers for clients is likely to be the price, which is currently higher than that for primary concrete (Stürmer & Kulle, 2017). However, research found that there generally is a positive willingness to pay (WTP) for environmentally friendly attributes in buildings (Mandell & Wilhelmsson, 2011). Thus, it is unclear whether clients are willing to pay more for recycled aggregates in concrete and if so, to what extent.

The subjects of this study, construction clients, are the ones “who initiate, commission, and pay for a construction project” (Hartmann et al., 2008, p. 5). This definition can apply to several groups: private individuals, organizations, and developers. Since these groups differ in significant aspects such as their information level and motivation to apply sustainable building practices, it is conceivable that their reasons for (not) demanding R-concrete as well as their WTP for it differ, too. To identify these differences is important in order to design effective instruments that can foster the use of R-concrete. To that end it is also useful to know which other factors generally influence clients’ WTP. The literature on sustainable construction offers some candidates: environmental awareness (Yau, 2012), familiarity with the material (Portnov et al., 2018), and feeling responsible for considering sustainability rather than pointing towards others (Andelin et al., 2015).

The contribution of this study is three-fold. First, it identifies barriers and drivers for clients to demand R-concrete. Second, it analyzes whether clients are willing to pay for recycled aggregates in concrete and if so, how high their WTP is. Third, the study identifies factors that influence clients’ WTP. Throughout, three client groups are distinguished in order to detect differences between them that are relevant to their demand for R-concrete.

## 2 Method

This study employs an experimental survey among three groups of construction clients (private individuals, organizations, and developers). The first part of the survey contains item-based questions and covers demographic information, respondents’ familiarity with R-concrete, the role sustainability plays for them, and their perception of potential barriers and drivers for the use of R-concrete. The second part of the survey consists of a discrete choice experiment. In discrete choice experiments, respondents are given a set of alternatives from which they are asked to choose their most desired one. These alternatives differ on a certain number of attributes, which enables the researcher to determine the influence of these attributes on the probability of choosing an alternative (Louviere et al., 2010). By including the price as one of the attributes describing the alternatives, a WTP for the other attributes can be calculated. The alternatives in this study are different forms of R-concrete, which are characterized by four attributes: price per m<sup>3</sup>, the share of recycled aggregates contained, the CO<sub>2</sub>-footprint per m<sup>3</sup> of concrete, and a certification with a CSC-R (Concrete Sustainability Council – R-module) label. The latter two will not further be discussed here.

Respondents were given six decision situations (choice sets), each of which shows three forms of R-concrete (A, B, and C) and a non-varying status-quo alternative, which is primary concrete. Since showing all

possible choice sets to respondents was infeasible, a fractional factorial design was generated (Louviere et al., 2010). Respondents were asked to imagine that they are currently planning a building and have to choose the type of concrete to be used. The data on barriers and drivers is analyzed using descriptive statistics. Clients' WTP is identified using a mixed logit model (McFadden & Train, 2000).

### 3 Results

Taking the entire sample together, the number one barrier for the use of R-concrete is the lack of knowledge and/or experience with it on the side of the clients themselves or their building partners. The second most important reason for not using R-concrete is the uncertainty surrounding norms and regulations of the material. Ranked third is the notion that it is easier or more convenient to use primary concrete. Organizations and developers each viewed separately show the same pattern as the overall sample. For private individuals, the top three barriers are the lack of knowledge and/or experience, not knowing of R-concrete until now, and the uncertainty about norms and regulations.

As expected, the price has a negative and the share of recycled aggregates has a positive influence on the probability of choosing a certain (R-)concrete. All coefficients are highly significant in the overall sample as well as in the separate client groups. The WTP estimates range from 0.21 € (private individuals) to 0.30 € (organizations) per percentage point of recycled aggregates. Clients who are more environmentally aware, who are familiar with R-concrete, and who feel responsible for considering sustainability in their construction projects each are more likely to choose R-concrete (instead of primary concrete) and have a higher WTP for increasing the share of recycled aggregates than their respective counterparts.

### 4 Discussion

The WTP estimates found are significant and show that construction clients are ready to pay for resource efficient building materials. However, clients' WTP for recycled aggregates only partly covers the price premium currently seen. This suggests that under the current market price, only a selected group of highly environmentally aware clients demand R-concrete. Thus, in order to increase the use of R-concrete, additional measures to stimulate demand among all construction clients are recommended. Our results show that this can be done by reducing clients' ignorance of R-concrete and their uncertainty concerning the regulatory environment. Information needs to be provided to fill this knowledge gap and to highlight the material's environmental advantages. A sustainability label could help in this regard. Finally, different client groups have been shown to have differing wants and needs and should be addressed accordingly.

### Acknowledgments

This study is part of a PhD project within the research group Verbund.NRW II. This program deals with the resource efficiency of composite construction materials from an inter- and transdisciplinary perspective and is funded by the ministry of culture and science of the state of north rhine-westphalia.

## References

- Andelin, M., Sarasoja, A.-L., Ventovuori, T., & Junnila, S. (2015). Breaking the circle of blame for sustainable buildings – evidence from Nordic countries. *Journal of Corporate Real Estate*, 17(1), 26–45. <https://doi.org/10.1108/JCRE-05-2014-0013>
- Destatis. (o. J.). Kurzübersicht Abfallbilanz—Zeitreihe. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/liste-abfallbilanz-kurzuebersicht.html>
- Destatis. (2021). Umweltökonomische Gesamtrechnungen: Gesamtwirtschaftliches Materialkonto. Berichtszeitraum 1994—2019/2020. Statistisches Bundesamt (Destatis). [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Materialfluesse-Energiefluesse/\\_inhalt.html#\\_q5odg31z4](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Materialfluesse-Energiefluesse/_inhalt.html#_q5odg31z4)
- Di Maria, A., Eyckmans, J., & Van Acker, K. (2018). Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. *Waste management*, 75, 3–21.
- Hartmann, A., Reyman, I. M. M. J., & Van Oosterom, G. (2008). Factors constituting the innovation adoption environment of public clients. *Building Research & Information*, 36(5), 436–449. <https://doi.org/10.1080/09613210802028386>
- Katerusha, D. (2021). Barriers to the use of recycled concrete from the perspective of executing companies and possible solution approaches-case study Germany and Switzerland. *Resources Policy*, 73, 102212.
- Knappe, F., Dehoust, G., Petschow, U., & Jakubowski, G. (2012). Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung schutzgutbezogener und anwendungsbezogener Anforderungen, des potenziellen, volkswirtschaftlichen Nutzens sowie branchenbezogener, ökonomischer Anreizinstrumente [Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes]. Umweltbundesamt. <http://www.uba.de/uba-info-medien/4305.html>
- Kreislaufwirtschaft Bau. (2021). Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018—Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018. Kreislaufwirtschaft Bau. <https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-12.pdf>
- Louviere, J. J., Hensher, D. A., Swait, J. D., Adamowicz, W., & Swait, J. (2010). *Stated choice methods: Analysis and applications* (7. printing). Cambridge Univ. Press.
- Mandell, S., & Wilhelmsson, M. (2011). Willingness to Pay for Sustainable Housing. *Journal of Housing Research*, 20(1), 35–51. <https://doi.org/10.1080/10835547.2011.12092034>
- McFadden, D., & Train, K. (2000). Mixed MNL models for discrete response. *Journal of Applied Econometrics*, 15(5), 447–470. [https://doi.org/10.1002/1099-1255\(200009/10\)15:5<447::AID-JAE570>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1099-1255(200009/10)15:5<447::AID-JAE570>3.0.CO;2-1)
- Onubi, H. O., Yusof, N., & Hassan, A. S. (2020). How environmental performance influence client satisfaction on projects that adopt green construction practices: The role of economic performance and client types. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122763. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122763>
- Pitt, M., Tucker, M., Riley, M., & Longden, J. (2009). Towards sustainable construction: Promotion and best practices. *Construction Innovation*, 9(2), 201–224. <https://doi.org/10.1108/14714170910950830>
- Portnov, B. A., Trop, T., Svechikina, A., Ofek, S., Akron, S., & Ghermandi, A. (2018). Factors affecting homebuyers' willingness to pay green building price premium: Evidence from a nationwide survey in Israel. *Building and Environment*, 137, 280–291. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.014>

- Stürmer, S., & Kulle, C. (2017). Untersuchung von Mauerwerksabbruch (verputztes Mauerwerk aus realen Abbruchgebäuden) und Ableitung von Kriterien für die Anwendung in Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Beton mit Typ 2 Körnung) für den ressourcenschonenden Hochbau. Deutsche Bundesstiftung Umwelt. <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32105.pdf>
- Yau, Y. (2012). WILLINGNESS TO PAY AND PREFERENCES FOR GREEN HOUSING ATTRIBUTES IN HONG KONG. *Journal of Green Building*, 7(2), 137–152. <https://doi.org/10.3992/jgb.7.2.137>

### **Contact**

*M. Sc. Ellen Sterk, Research Associate*

RWTH Aachen University, Research Unit International Economics

+49 241 8096481

[ellen.sterk@rwth-aachen.de](mailto:ellen.sterk@rwth-aachen.de)

[www.verbund-nrw.de](http://www.verbund-nrw.de)



## Bewertung der Recyclingfähigkeit gipshaltiger Abfälle in der Gipsfaserplattenproduktion

**Abstract:** Die gipsverarbeitende Industrie wird in den kommenden Jahren mit einer zunehmenden Verknappung von Gips konfrontiert. Als alternative Rohstoffquelle wird das Recycling von gipshaltigen Abfällen<sup>1</sup> derzeit noch vernachlässigt und ist hauptsächlich auf den Abfallstrom Gipskartonplatte (GKP) beschränkt. Dabei kann hieraus lediglich der rezyklierte Gips als Sekundärrohstoff für die Herstellung von GKP oder in der Zementindustrie zudosiert werden, die Papierfraktion wird energetisch verwertet. Ein möglicher, alternativer Verwertungsweg für die ganzheitliche Verwertung von Gipskartonplatten, Gipsfaserplatten (GFP) und Schleifstäuben ist der Einsatz in der Gipsfaserplattenherstellung. Vor diesem Hintergrund werden die Materialeigenschaften der genannten Abfallströme und ihr Einfluss auf die Bruchlast von Gipsfaserplatten untersucht. Ziel ist es den RC-Anteil in Gipsfaserplatten zu maximieren und die Ressourceneffizienz zu steigern.

### 1 Einleitung

Mit dem Kohleausstieg und dem damit einhergehenden Wegfall von REA-Gips<sup>2</sup> ist in den nächsten Jahren in Deutschland mit einer zunehmenden Verknappung von Gips zu rechnen. Um für die gipsverarbeitende Industrie die Rohstoffversorgung dennoch zu gewährleisten, müssen alternative Rohstoffquellen erschlossen werden. Zum Schutz der Umwelt und des Erhalts der Landschaft ist – neben der Ausweitung bestehender sowie der Erschließung neuer Gipsabbaugebiete –, vor allem das Recycling von gipshaltigen Abfällen als mögliche Rohstoffquelle zu nutzen (Buchert et. al, 2017). Das Recycling von gipshaltigen Abfällen beschränkt sich derzeit vor allem auf die Verwertung von GKP. Diese werde in mehreren Aufbereitungsschritten mit dem Ziel zerkleinert, die Gipsfraktion von der Papierfraktion zu trennen. Die rezyklierte Gipsfraktion wird u. a. wieder für die Herstellung von GKP eingesetzt. Die Papierfraktion ist jedoch aufgrund von Restgipsanhaftungen nicht für eine Verwertung in der Papierherstellung geeignet und wird der energetischen Verwertung zugeführt (Bunzel & Wilczek, 2016). GFP entsprechen wegen ihres hohen Fasergehaltes von bis zu 20 %, welcher zu hohe TOC-Werte verursacht, nicht den Anforderungen der Gipsindustrie an RC-Gips und sind als Sekundärrohstoff für die Herstellung vieler Gipsprodukte nicht geeignet (Bundesverband der Gipsindustrie e. V., 2020). Papierfasern in GFP haben eine armierende Wirkung und erhöhen die Druck- und Biegezugfestigkeit der Platte (Coutts, 1990).

1 Mit gipshaltigen Abfällen sind in dieser Arbeit Gipskartonplattenabfälle, Gipsfaserplattenabfälle sowie Schleifstäube aus der Gipsfaserplattenveredelung gemeint.

2 Rauchgasentschwefelungsanlagen-Gips fällt als Nebenprodukt bei der Rauchgasreinigung in Kohlekraftwerken an und stellt derzeit ca. 50 % der verarbeiteten Gipsmenge in D.

Die Firma Lindner Norit GmbH hat ein Aufbereitungskonzept zur ganzheitlichen<sup>3</sup> Verwertung von gipshaltigen Abfällen in der Gipsfaserplattenproduktion entwickelt. Basierend auf diesem Konzept wird im Rahmen dieser Dissertation die Eignung sowie der Einfluss der gipshaltigen Abfälle für die Verwertung in der Gipsfaserplattenherstellung untersucht und bewertet. Dazu werden Materialeigenschaften gipshaltiger Abfälle analysiert und der Einfluss von Papierfasern auf die Armierungswirkung in GFP untersucht. Mit der multivariaten Datenanalyse (multiple lineare Regression) wird ein Modell entwickelt, mit dem eine optimierte Rohstoffzusammensetzung mit maximalen Recycling-Anteilen berechnet werden kann und damit zu einer Steigerung der Ressourceneffizienz beiträgt.

## 2 Hintergrund

Das Aufbereitungskonzept der Lindner Norit GmbH (Abbildung 1) umfasst vier Abfallströme Gipskartonplattenabfälle, stückige Gipsfaserplattenabfälle, Schleif-, Säge- und Frässtäube aus der Bearbeitung von Gipsfaserplatten und wasserhaltige Gipsschlämme aus der Wasseraufbereitung der Produktion. Diese werden materialbedingt spezifisch aufbereitet und in einem Autoklav zu reaktivem alpha-Calciumsulfat-Halbhydrat nasskalziniert. Die kalzinierte Gips-Papiermischung wird bei der Herstellung der GFP in Anteilen zudosiert. Bisher fehlen relevante Daten zu Materialqualitäten der Abfallströme oder der Eignung bestimmter Bestandteile der Abfallströme (z. B. imprägnierte GKP) für die Verwertung in der Gipsfaserplattenproduktion. Zudem fehlen empirische Untersuchungen, die den Einfluss spezifischer Fasereigenschaften von Altpapier auf die Druck- und Biegezugfestigkeit von GFP analysieren. Diese sind notwendig, um die Zusammensetzung aus Primär- und Sekundärrohstoffen zu steuern und einen möglichst hohen Anteil an Sekundärrohstoffen bei der Herstellung von GFP einzubringen, ohne dabei die Anforderungen an die Verarbeitungs- und Produktqualität zu verfehlen.

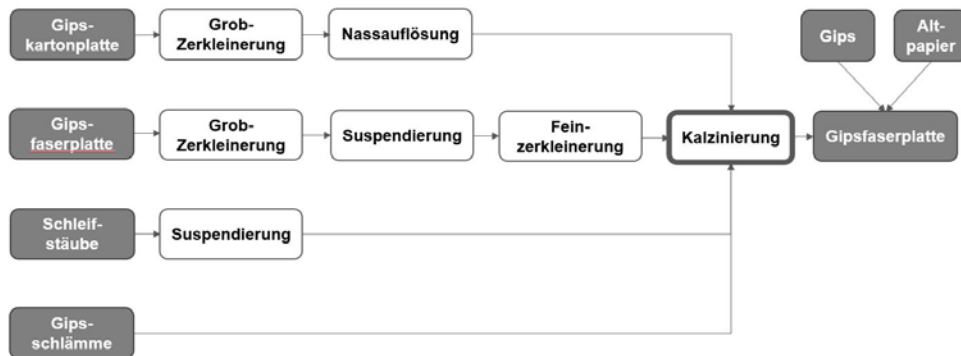


Abbildung 1: Aufbereitungskonzept für die Verwertung von gipshaltigen Abfällen in der Gipsfaserplattenproduktion

<sup>3</sup> Ganzheitliche Verwertung meint hier alle Bestandteile des Gipsproduktes, heißt die Gips- und Papierfraktion



### 3 Methodik

Die Materialqualität der Gips- und Papierfraktion wird mit qualitativen und quantitativen Methoden untersucht. Auf Grundlage der Ergebnisse der Materialuntersuchungen, wird der Rahmen für die Versuchsreihe zur Armierungswirkung von Fasereigenschaften gesetzt. Die erhobenen Daten werden mit multivariaten Datenanalysen ausgewertet.

#### 3.1 Qualitative und quantitative Materialuntersuchungen von gipshaltigen Abfällen

##### • Materialuntersuchung Gips

Für die Gipsuntersuchungen werden drei gängige GKP-Typen (Bauplatte, imprägnierte Platte, Feuerschutzplatte) aus unterschiedlichen Produktionswerken in Deutschland verwendet. Die Proben bestehen aus kleinen Druckstücken des Gipskerns. Die GFP werden mit einer Hammermühle auf eine Korngröße von < 10 mm zerkleinert und die Schleifstäube direkt dem Schleifprozess entnommen. Mit einem Rasterelektronenmikroskop wird die Kristallmorphologie analysiert und eine qualitative Einschätzung zu Fremdbestandteilen (Glas- oder Papierfasern) und Zusatzmitteln (Schaumbildner) gegeben. Mit der Röntgenbeugung (XRD) wird die Zusammensetzung der Gipsproben qualitativ und über die Rietveld-Verfeinerung quantitativ ermittelt. Damit werden Reinheit sowie mögliche Störstoffe bestimmt. Für die weiteren Abfallfraktionen – GFP und Schleifstaub – bedarf es keiner XRD-Untersuchung, da es sich um interne Produktionsabfälle handelt und die Zusammensetzung des Gipses bekannt ist.

##### • Materialuntersuchung Papier

Für die Probenvorbereitung der Papieruntersuchungen werden Papierrohlinge aus der GKP-Produktion in einem präparierten Mixer unter Zugabe von Wasser gelöst. GFP und Schleifstäube werden als Gips-Fasermischung belassen. Die Proben werden mit dem Valmet Fiber Image Analyzer (FS5) analysiert. Über optische Bildauswertung werden Fasereigenschaften, wie z. B. Faserlänge, Faserdicke, Feinanteil oder der Fibrillierungsgrad ermittelt. Papiereigenschaften, wie z. B. Holzstoff- und Aschegehalte werden mit dem Paper Bale Sensor der Papiertechnischen Stiftung erfasst.

Die Durchführung der Versuchsreihen zur Bestimmung der Materialqualität ist vollständig abgeschlossen. Folgende erste Ergebnisse konnten abgeleitet werden: Die Schwankungsbreite der Gipsqualität hinsichtlich der unterschiedlichen GKP-Typen und Hersteller ist gering. Fremdstoffe wie mineralische Bestandteile konnten in allen Proben in geringen Anteilen festgestellt werden. Die Faserqualität der Papierfraktion von GKP ist über alle GKP-Typen hinweg sehr ähnlich und kann in eine Qualitätsstufe mit Zeitungspapier eingeordnet werden. Dagegen fällt die Faserqualität der aufbereiteten GFP sowie Schleifstäube vor allem wegen der prozessbedingt stark verkürzten Faserlänge deutlich ab.

#### 3.2 Armierungswirkung von Papierfasern auf die Druckfestigkeit von Gipsfaserplatten

In einer Versuchsreihe werden GFP aus diversen Papieren unterschiedlicher Qualitätsstufen und Fasergehalten erzeugt. Die Ergebnisse der vorhergehenden Papieruntersuchungen geben den Rahmen für die Auswahl der Papierqualitäten vor und erlauben eine möglichst realistische Formulierung des Modells. Die eingesetzten Papiere bestehen aus gängigen Altpapiersorten wie Kraftpapier, Wellpappe, Zeitungspapier, Hygienepapier, Papier aus der Gipskartonplattenproduktion sowie speziell aufbereitete Fasern aus Zellstoff und Holzstoff und bilden ein realitätsnahes Spektrum an möglichen Papier- und Fasereigenschaften für die

Herstellung von GFP ab. In der Versuchsreihe wird das Papier unter Zugabe von Wasser im Pulper gelöst. Im Nassmischer wird der Pulpe ein definierter Stuckgips zugegeben und anschließend in einer Presse zu einer GFP gepresst. Dieses Vorgehen entspricht einem Versuch / Beobachtung. Pro Versuch werden zwei GFP hergestellt und auf Druck- und Biegezugfestigkeit geprüft (Abbildung 2).

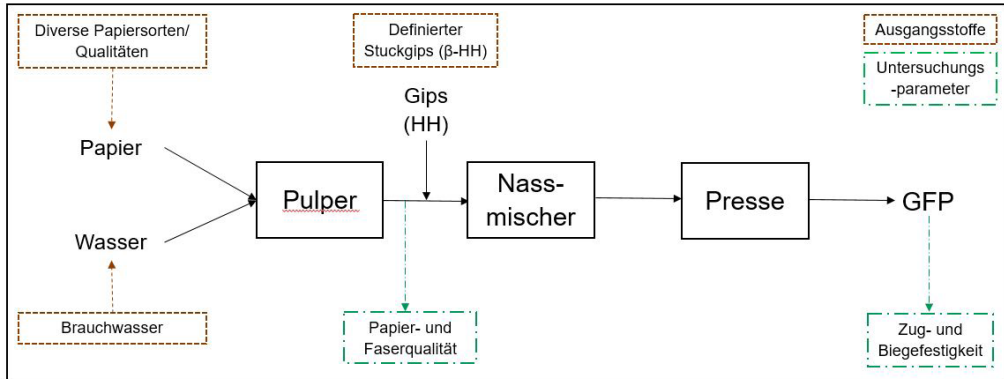


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Armierungswirkung von Papier in GFP

Die erhobenen Daten werden mit der Regressionsanalyse (multiple lineare Regression) ausgewertet. Mit der Regressionsanalyse können Beziehungen zwischen den erhobenen Parametern (Papier- und Fasereigenschaften, Fasergehalt, Druck- und Biegezugfestigkeit) erklärt werden oder Werte einer abhängigen Variable durch unabhängige Variablen vorhergesagt werden (Backhaus et. al., 2021). Für die Regressionsanalyse wird als Richtwert ein Datensatz aus mindestens 30 Beobachtungen empfohlen oder 10 Beobachtungen pro unabhängiger Variablen des Modells (Backhaus, 2021, Stoetzer M. W., 2017). Deshalb wird ein Datensatz mit einer Anzahl von etwa 50 Beobachtungen angestrebt. Es wird ein Modell entwickelt, das eine Vorhersage der Druck- und Biegezugfestigkeit (abhängige Variable) in Abhängigkeit von den Papier- und Fasereigenschaften (unabhängige Variable) ermöglicht. Mit diesem Modell kann die Rohstoffzusammensetzung für die Herstellung von GFP optimiert werden. Dabei können, unter Einhaltung der Anforderungen an die Produktqualität, ökologische und ökonomische Zielgrößen wie die maximale Ressourceneffizienz vorgegeben werden.

Es wurde ein Datensatz aus 40 Beobachtungen generiert und ein vorläufiges Versuchsmodell erstellt. Die bisherigen Ergebnisse sind vielversprechend, jedoch ist die Auswertung nicht abgeschlossen, sodass zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine endgültige Einschätzung zur Güte des Modells gegeben werden kann.

## Literatur/Quellen

Buchert, M.; Sutter, J.; Alwast, H.; Schütz, N.; Wiemann, K. (2017): Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-24\\_texte\\_33-2017\\_gipsrecycling.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-24_texte_33-2017_gipsrecycling.pdf) (Zugriff: 06.01.2023)

- Bunzel, J.; Wilczek, M. (2016): Industrielles Recycling von gipshaltigen Abfällen – Betriebserfahrungen und Produktqualität der Aufbereitungsanlage in Großpösna/Störmthal, In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, 3. Auflage, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, S. 497-497, ISBN: 978-3-944310-282
- Bundesverband der Gipsindustrie e. V. (2020): Recyclinggips (RC-Gips) Erstprüfung für Recyclinganlagen, Qualitätsmanagement, Qualitätsempfehlungen und Analyseverfahren, URL:[https://www.gips.de/fileadmin/user\\_upload/aktuelles/Qualitaetsempfehlungen\\_Gipsrecycling\\_Analyseverfahren\\_Stand\\_Juni\\_2020.pdf](https://www.gips.de/fileadmin/user_upload/aktuelles/Qualitaetsempfehlungen_Gipsrecycling_Analyseverfahren_Stand_Juni_2020.pdf) (Zugriff: 06.01.2023)
- Coutts, R. S. P. (1990): Wastepaper fibres in plaster products, In: Journal of materials science letters 10, S.77.78, URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00721913> (Zugriff: 06.01.2023)
- Backhaus, K.; Erichson, B.; Gensler, S.; Wieber, R.; Wieber, T. (2021): Multivariate Analysemethoden - Eine anwendungsorientierte Einführung, 16. Auflage, Springer Gabler Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-658-32424-7
- Stoetzer, M. W. (2017): Regressionsanalyse in der empirischen Wirtschafts- und Sozialforschung Band 1 - Eine nichtmathematische Einführung mit SPSS und Stata, 1. Auflage, Springer Gabler Verlag, Berlin, ISBN: 978-3-662-53823-4

## Kontakt

*M. Sc. Wojciech Walica, wissenschaftlicher Mitarbeiter*

FH Münster / IWARU - Institut für Infrastruktur • Wasser • Ressourcen • Umwelt

Tel.-Nr. +49 251 83-65272

E-Mail: [wojciech.walica@fh-muenster.de](mailto:wojciech.walica@fh-muenster.de)

Homepage: [www.fh-muenster.de/iwaru](http://www.fh-muenster.de/iwaru)



## RC-Beton: Nutzung von rezyklierter Gesteinskörnung für die Betonherstellung in Betonfertigteilen

**Abstract:** Die Bauindustrie und die damit verbundenen Abrissprozesse von Gebäuden und Infrastrukturen verursachen den größten Abfallstrom in Deutschland. Die anfallenden mineralischen Bau- und Abbruchabfälle können recycelt und in Form von RC-Beton eingesetzt werden. Dabei ersetzt rezyklierte Gesteinskörnung einen Teil der natürlichen Gesteinskörnung bei der Betonherstellung. RC-Beton wird in Deutschland bis jetzt kaum angewendet. RC-Beton kann für Transportbetonanwendungen wie für die Produktion von Betonfertigteilen verwendet werden. Die Nutzung von RC-Beton zur Herstellung von Betonfertigteilen bietet im Sinne der Circular Economy (CE) viele Vorteile, unter anderem, weil Betonfertigteile am Ende ihrer Primärnutzung nicht nur der Wiederverwertung zugeführt werden, sondern wiederverwendet werden können. Deswegen stellt sich die Frage, welche Betonfertigteile für die Herstellung mit RC-Beton geeignet sind. Dafür werden die speziellen Produktnormen der jeweiligen Betonfertigteile untersucht und mit den Anforderungen an den RC-Beton verglichen. Anhand einer Bewertungsmatrix werden die einzelnen Betonfertigteile bewertet und die Ergebnisse in einer Bewertungsmatrix dargestellt. Außerdem werden die Stoffströme analysiert, um zu evaluieren, welche Mengen Ausgangsmaterial (Bau- und Abbruchabfälle) in dem Bundesland Nordrhein-Westfalen zur Verfügung stehen und welche Bedarfe (Betonfertigteile) für die jeweiligen Stoffströme existieren. Der wissenschaftliche Beitrag dieser Forschung ergibt sich aus der Erschließung ganzheitlicher CE Implementierungen in der Bauindustrie und somit dem Aufzeigen neuer zirkulärer Geschäftsmodelle. Durch die Implementierung können Primärressourcen, wie Kies und Schotter, und CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden.

### 1 Einleitung

Die Bauindustrie und die damit verbundenen Abrissprozesse von Gebäuden und Infrastrukturen verursachen den größten Abfallstrom in Deutschland. Die anfallenden mineralischen Bau- und Abbruchabfälle können recycelt und als RC-Baustoffe verwendet werden. Diese finden meist Anwendung im Erd- und Tiefbau. Für die Verwendung im Hochbau besteht die Möglichkeit der Nutzung von RC-Beton. Dabei ersetzt rezyklierte Gesteinskörnung einen Teil der natürlichen Gesteinskörnung bei der Betonherstellung. RC-Beton wird in Deutschland bis jetzt kaum angewendet. Dafür werden verschiedene Gründe genannt. Zum einen stellen viele Recyclingbetriebe keine rezyklierte Gesteinskörnung her, welche zur Herstellung von RC-Beton verwendet werden darf. Zum anderen ist der Bedarf nach RC-Beton seitens der Betonhersteller kaum ge-

geben. Außerdem wird RC-Beton selten bei der Planung einbezogen und damit auch nur vereinzelt ausgeschrieben. Es stellt sich somit die Frage, wie der Einsatz von RC-Beton gefördert werden kann.

In der CE hat die Wiederverwendung Vorrang vor dem Recycling, dies ist ebenfalls im KrWG verankert. Betonfertigteile sind für die Wiederverwendung besonders gut geeignet. Sie können nach dem Ende ihrer Primärnutzung nicht nur dem Recycling zugeführt, sondern wiederverwendet werden, entweder an demselben oder einem anderen Bauvorhaben. Dabei ist es unerheblich, ob sie in der gleichen Bauweise wiederverwendet werden oder ob diese geändert wird. Bei der Herstellung neuer Betonprodukte sollte das Ziel des „Design for Disassembly“ berücksichtigt werden, um die Wiederverwendung zu erleichtern. Damit Betonprodukte schadlos ausgebaut und wiederverwendet werden können, muss die Demontierbarkeit unter Beachtung der Produkthanforderungen und der bauaufsichtlichen Vorschriften bei gleichzeitiger Wahrung der Ästhetik eingeplant werden (Mettke et al., 2019). Die Wiederverwendung von Betonprodukten hat wirtschaftliche und ökologische Vorteile, da der Verbrauch von Rohstoffen und die Abfallmenge bei Bau, Renovierung und Abriss verringert wird, Wertschöpfungs- und Produktionsketten geschlossen werden und somit die Kreislaufwirtschaft gefördert wird. Die Nutzung von rezyklierter Gesteinskörnung zur Betonherstellung hat zusätzlich Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß von Beton. Bau- und Abbruchabfälle sind insbesondere in Ballungsräumen lokal verfügbar, während Kies und Sand aus den Abbaugebieten in diese transportiert werden müssen. Dadurch können Transportwege verkürzt oder sogar vermieden werden. Zusätzlich kann durch die Wiederverwendung von Fertigteilen die graue Energie erhalten bleiben und CO<sub>2</sub>-Emissionen, die in der Produktionsphase neuen Betons entstehen, vermieden werden.

Betonprodukte bieten also in zweierlei Hinsicht Potenzial zur Stärkung der CE: einmal in Form der Verwendung von RC-Beton und gleichzeitig in der Möglichkeit der Wiederverwendung.

## **2 Methodik**

### **2.1 DIN-Norm-Analyse mit Hilfe einer Bewertungsmatrix**

Um zu evaluieren, welche Betonfertigteile für die Herstellung mit RC-Beton geeignet sind, werden die speziellen Produktnormen der jeweiligen Betonfertigteile nach DIN EN 13369 untersucht und mit den Anforderungen an den RC-Beton verglichen. Anhand einer Bewertungsmatrix werden die einzelnen Betonfertigteile bewertet und die Ergebnisse in einer Bewertungsmatrix dargestellt. Die Bewertungsmatrix umfasst die technischen und rechtlichen Regeln und die Beurteilung der Tauglichkeit in der Baupraxis. Insgesamt werden drei Bewertungskategorien betrachtet:

(1.) Spannbetonbauweise: Betonfertigteile, welche in Spannbetonbauweise produziert werden, sind nicht für die Herstellung mit RC-Beton geeignet, da diese Herstellungsweise nicht zulässig ist (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., 2019).

(2.) Druckfestigkeitsklasse: Die Nutzung von RC-Beton ist in Deutschland nur bis zur Druckfestigkeitsklasse C30/37 zulässig (DIN EN 206). Betonfertigteile, welche eine höhere Druckfestigkeitsklasse erfordern, können somit nicht mit RC-Beton hergestellt werden.

(3.) Expositionsklassen: RC-Beton darf nur für Anwendungen im Rahmen definierter Expositionsklassen verwendet werden (DIN EN 206). Liegt die hauptsächliche Nutzung der Betonfertigteile außerhalb der erlaubten Expositionsklassen, ist eine Nutzung von RC-Beton für diese Betonfertigteile nicht möglich.

## **2.2 Quantifizierung der potentiellen Stoffströme**

Der potentielle zukünftige Bedarf an rezyklierten Gesteinskörnungen für die Betonherstellung ist ein entscheidender Faktor für die Umsetzung und Etablierung der vorgestellten CE Anwendung. Dafür werden die Stoffströme analysiert, um zu evaluieren, welche Mengen Ausgangsmaterial (mineralische Bau- und Abbruchabfälle) im Bundesland Nordrhein-Westfalen zur Verfügung stehen und welche Bedarfe (rezyklierte Gesteinskörnung zur Herstellung von Betonfertigteilen aus RC-Beton) für die jeweiligen Stoffströme existieren.

### **2.2.1 Ausgangsmaterialien (mineralische Bau- und Abbruchabfälle)**

Die Ausgangsmaterialien sind anhand der Abfallstatistik erkenntlich. Diese definiert jedoch nicht, welche Zusammensetzung die Bau- und Abbruchabfälle haben. Um zu evaluieren, wie viel mineralisches RC-Material potentiell zur Verfügung steht, ist diese Information jedoch relevant, da nicht alle Bau- und Abbruchabfälle zur Herstellung von RC-Beton verwendet werden können. Laut Müller und Kurkowski (2017) besteht Bauschutt zu 53 Masse-% aus Beton und 47 Masse-% aus Mauerwerksbruch. Der Mauerwerksbruch kann durch die folgenden Anteile definiert werden: 41,7 Masse-% Ziegel und Dachziegel, 28,0 Masse-% Kalksandstein, 2,4 Masse-% Porenbeton, 9,9 Masse-% (Leicht-)Beton sowie 18,0 Masse-% Mörtel und Putz (Müller und Kurkowski, 2017).

### **2.2.2 Bedarf (rezyklierte Gesteinskörnung zur Herstellung von Betonfertigteilen aus RC-Beton)**

Für die Berechnung des potentiellen Bedarfs an rezyklierten Gesteinskörnungen zur Herstellung von Betonfertigteilen mit RC-Beton wird angenommen, dass zukünftig die Gebäude in Nordrhein-Westfalen in der Fertigteilbauweise errichtet werden. Die Grundlage bieten die Statistischen Berichte NRW, welche die erteilten Baugenehmigungen abbilden (Information und Technik Nordrhein-Westfalen, 2022). Anhand dieser werden Durchschnittswerte der Jahre 2017-2021 über die Geschossflächen pro Gebäudetyp in m<sup>2</sup> abgebildet. Außerdem wird ein spezifischer Material Capacity Index (MCI) für verschiedene Gebäudetypen definiert. Der MCI ist das Verhältnis der durchschnittlichen Betonmenge eines bestimmten Gebäudetyps zur spezifischen durchschnittlichen Nettonutzfläche der Datenbank des IÖR (IÖR Informationsportal Bauwerksdaten, 2022). Die betrachteten Gebäudetypen sind (1.) Wohngebäude: Ein- und Zweifamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser (2.) Nichtwohngebäude; Anstaltsgebäude, Büro- und Verwaltungsgebäude, landwirtschaftliche Dienstleistungsgebäude, Fabrik- und Werkstattgebäude, Einzelhandels- und Lagergebäude, Hotels und Gaststätten, sonstige nichtlandwirtschaftliche Gebäude, sonstige Nichtwohngebäude.

Um die erforderliche Betonmenge zu ermitteln, wird der spezifische MCI mit der durchschnittlichen Nettonutzfläche pro Gebäudetyp multipliziert. Anhand dieser kann die erforderliche Gesamtmenge an Gesteinskörnung ermittelt werden.

Für unterschiedliche Expositionsklassen können anstelle der natürlichen Gesteinskörnung entsprechende Massenanteile an rezyklierter Gesteinskörnung verwendet werden. Dies wird bei der Ermittlung der

Gesteinskörnungsmenge berücksichtigt. Es wird der Mittelwert aller maximal zulässigen Massenanteile der Expositionsklassen angenommen, der für Gesteinskörnungstyp 1 mit 37,5 % und für Gesteinskörnungstyp 2 mit 30 % berechnet wird. Darüber hinaus wird auch die erforderliche Menge an rezyklierte Gesteinskörnung berechnet, wenn die Gesamtmenge an natürlichen Gesteinskörnungen ersetzt wird. Dies wäre dann der Fall, wenn die Hersteller von Fertigteilen eine nationale technische Zulassung für ihre Produkte verlangen und damit nachweisen, dass die vollständige Substitution möglich ist.

### **3 Wissenschaftlicher Beitrag**

Der wissenschaftliche Beitrag dieser Forschung ergibt sich aus der Erschließung ganzheitlicher Circular Economy Implementierungen in der Bauindustrie und somit dem Aufzeigen neuer zirkulärer Geschäftsmodelle. Durch die Implementierung können Primärressourcen, wie Kies und Schotter, und CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden.

### **Danksagung**

Die Autorin des Konferenzbeitrages erhält ein Promotionsstipendium von INZIN e.V. und Remondis.

### **Literatur/Quellen**

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (2019). DAfStb-Richtlinie – Anforderungen an Ausgangsstoffe zur Herstellung von Beton nach DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 2019-08. Beuth-Verlag.

DIN 4226-101, Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen

DIN EN 206:2021-06, Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

IÖR Informationsportal Bauwerksdaten (2022). <http://ioer-bdat.de/>

Information und Technik Nordrhein-Westfalen (2022). Statistische Berichte Baugenehmigungen.

KrWG. (2012). Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG).

Mettke, Angelika & Arnold, Viktoria & Schmidt, Stephanie. (2019). Erste Schritte zum Urban Mining. In Leal Filho, W. (Hrsg.). (2019). Aktuelle Ansätze zur Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele. Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-58717-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-58717-1_7).

Müller, A., & Kurkowski, H. (2017). Potenzialstudie zur Umsetzung eines Re-/Upcyclingkonzeptes im Gebiet der IRR GmbH – Schwerpunkt mineralische Baustoffe.

### **Kontakt**

*Pauline Jegen, Stipendiatin/wissenschaftliche Mitarbeiterin*  
TU Dortmund / Lehrstuhl für Ressourcen- und Energiesysteme  
E-Mail: [pauline.jegen@tu-dortmund.de](mailto:pauline.jegen@tu-dortmund.de)  
Homepage: <https://res.raumplanung.tu-dortmund.de/>



# TEIL 4

## Thermik

Leitung:

Prof. Dr. Peter Quicker



## Feinfraktion von HMV-Aschen – unter welchen Bedingungen ist eine Verwertung als Bindemittelersatz möglich?

**Abstract:** Nach der Verbrennung von nicht recycelbaren Siedlungsabfällen entsteht der feste Rückstand Hausmüllverbrennungsasche (HMV-Asche). Nach einer Aufbereitung und Rückgewinnung der Metalle werden die HMV-Aschen zum Großteil deponiert oder als Deponiebaustoff eingesetzt. Vor dem Hintergrund der neuen Ersatzbaustoffverordnung wird der Anteil der zu deponierenden HMV-Asche weiter steigen, weil bestimmte Grenzwerte in vielen Fällen nicht eingehalten werden können. Alternativ kann die HMV-Asche durch neue Aufbereitungs- und Verwertungswege als hochwertiger Baustoff eingesetzt werden. Zum Beispiel ermöglicht die Nutzung der feinen HMV-Asche als Bindemittelersatz in Betonprodukten einerseits die Schonung von Rohstoffen und Deponiekapazitäten sowie andererseits die Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Herausforderungen stellen in diesem Zusammenhang jedoch Restmetallgehalte, insb. der Gehalt an metallischem Aluminium, dar, die durch geeignete Aufbereitungsschritte reduziert werden müssen, um Schäden am Beton zu verhindern. Die vorliegende Arbeit beschreibt Untersuchungen im Rahmen des Projekts HMV-Öko-Beton, das auf die Nutzung von Hausmüllverbrennungsaschen als Ersatz für Gesteinskörnungen und Bindemittel in Betonfertigprodukten abzielt.

### 1 Einleitung

Etwa 20 Mio. t Siedlungsabfälle werden in Deutschland jährlich verbrannt (Destatis 2018). Dabei entstehen ca. 5 Mio. t des mengenmäßig größten festen Verbrennungsrückstands Hausmüllverbrennungsasche (HMV-Asche). HMV-Aschen bestehen zu knapp 10 % aus Metallen, die während der Aufbereitung zum Großteil abgetrennt und anschließend recycelt werden. Die aufbereitete HMV-Asche besteht hauptsächlich aus Asche, geschmolzenen Partikeln, Keramik, Bauschutt, Steinen und Glas. Fertig aufbereitete HMV-Asche wird aktuell zu etwa 1/3 als Ersatzbaustoff verwertet und zu 2/3 auf Deponien als Baustoff eingesetzt oder beseitigt (ITAD 2021). Mit Inkrafttreten der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) im August 2023 werden sich HMV-Asche-Materialströme voraussichtlich noch stärker in Richtung Deponie verschieben, da bestimmte Eluat-Grenzwerte (z.B. Molybdän) für die Nutzung als Ersatzbaustoff mit herkömmlichen Aufbereitungsverfahren kaum eingehalten werden können. Es gilt daher alternative Aufbereitungs- und Verwertungspfade zu erschließen, damit HMV-Asche als hochwertiger Baustoff eingesetzt werden kann. Ein entsprechender Verwertungsweg ist die Nutzung der HMV-Aschen als teilweises Substitut für Bindemittel in Betonprodukten. Die Feinfraktion < 2 mm macht etwa 20 - 30% der Gesamtmasse der HMV-Asche aus und ist aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften grundsätzlich als Bindemittelsubstitut geeignet. Jedoch stellen die Gehalte an metallischem Aluminium, die löslichen Salze und Schwermetalle

eine Herausforderung für ihre Verwertung als Bindemittlersatz in Betonprodukten dar (Joseph et al. 2018). Das metallische Aluminium reagiert im alkalischen Milieu im Beton und bildet Wasserstoff, was wiederum zu Volumenvergrößerung führt und Risse im Betonkörper zur Folge haben kann. Da die Effektivität der Wirbelstromscheidung zur NE-Metallabtrennung im Feinkornbereich unter 2 mm (Šyc et al. 2020) stark abnimmt, bietet sich das stufenweise Mahlen und Sieben der Feinfraktion an, um Metalle abzutrennen. Außerdem wird durch die Mahlung die spezifische Oberfläche vergrößert, was die Porosität verringert und die Abbindefähigkeit erhöht. Ziel dieser Arbeit ist ein optimales Verfahrenskonzept des stufenweisen Mahlens und Siebens zu erarbeiten, sodass mit minimalem Aufbereitungsauswand eine gemahlene HMV-Feinfraktion erzeugt wird, die als Bindemittlersatz in Beton eingesetzt werden kann.

## 2 Methodik

Für das experimentelle Arbeiten wurde HMV-Asche des MHKW Kassel der Korngröße unter 2 mm nach der konventionellen trockenen Aufbereitung in einer mobilen Anlage verwendet. Die Feinfraktion wurde in der Anlage abgetrennt und NE-Metalle wurden mittels Wirbelstromscheider teilweise ausgezogen.

Für die weitestgehende Reduktion von Metallen und insb. metallischem Aluminium aus der Feinfraktion der HMV-Asche wurde das Verfahren des stufenweisen Mahlens und Siebens angewendet (Abbildung 1). Dafür wurden eine Planeten-Monomühle und eine Vibrations-Siebmaschine verwendet. Durch die Mahlung wurden Metallpartikel, die in der Mineralmatrix eingeschlossen waren, freigelegt und bei entsprechender Korngröße mit dem Siebüberlauf abgetrennt. Nach jedem Mahlvorgang wurde das zerkleinerte Material durch ein Sieb mit Maschenweite von 500, 250, 125  $\mu\text{m}$  gesiebt, um die Metalle abzutrennen. Die gemahlenen Aschen unter 125  $\mu\text{m}$  wurden nicht weiter zerkleinert. Als Orientierung für die Endfeinheit wurde die Korngröße 125  $\mu\text{m}$  ausgewählt, weil dadurch Feinheiten im Bereich von Zement (ca. 90% vom Zement sind feiner als 100  $\mu\text{m}$ ) erreicht werden.

Die Konzentration an metallischem Aluminium wurde mittels der Wasserstoffgasmethode bestimmt. Die Wasserstoffgasmethode basiert auf der Reaktion von metallischem Aluminium mit Lauge zu Aluminiumoxid

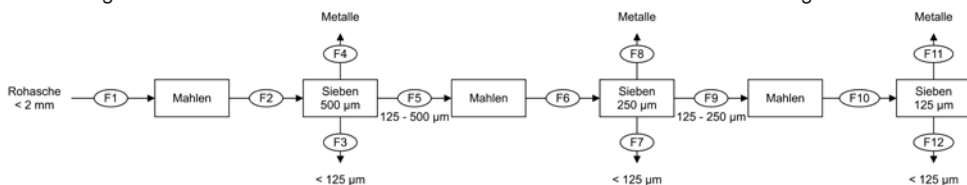


Abbildung 1: Schema des stufenweisen Mahlens und Siebens

und Wasserstoff nach Gl. 1. Hierzu wurden etwa 30 g der Probe in eine 30%ige NaOH-Lösung gegeben. Durch das gebildete Wasserstoffgas kann die Konzentration an metallischem Aluminium mittels Gl. 2 bestimmt werden. Metallisches Zink reagiert ähnlich wie metallisches Aluminium in basischer Umgebung zu Wasserstoff. Erfahrungsgemäß ist die Zinkkonzentration in der HMV-Asche deutlich niedriger, deswegen wurden die Berechnungen hier vereinfachend nur auf metallisches Aluminium bezogen.



$$Al [\%] = \frac{p \cdot \Delta V \cdot M_{Al} \cdot n_{Al}}{R \cdot T \cdot M_{H_2} \cdot n_{H_2} \cdot m_{BA}} \quad (2)$$

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Feinheit

Hauptziel des Aufbereitungsschrittes Mahlen ist die Vergrößerung der spezifischen Oberfläche. Für die Nutzung der aufbereiteten HMV-Aschen als Bindemittlersatz ist das von großer Bedeutung, um die Reaktivität zu erhöhen und den Wasserbedarf zu senken. Abbildung 2 zeigt die Korngrößenverteilung der ursprünglichen aufbereiteten HMV-Asche < 2 mm und der gemahlene und von Metallen befreiten HMV-Asche < 2 mm. Zum Vergleich ist die Sieblinie eines Zements dargestellt. Daraus ist erkennbar, dass durch den Mahlvorgang eine Zementfeinheit der HMV-Asche erreicht werden kann. Andere Studien zeigen außerdem, dass sich das Mahlen positiv auf die Hydratationswärme und damit auf die Reaktionsfähigkeit der HMV-Asche auswirkt (Loginova et al. 2021). Längere Mahldauern erwiesen sich im Rahmen der Versuche als unvorteilhaft, weil dadurch größere Partikel kaum weiter zerkleinert werden. Dieses Phänomen wurde auch von Loginova et al. beobachtet (Loginova et al. 2021). Zudem bildet sich dadurch Wärme, was zur Verklebung der feineren Partikel führt.

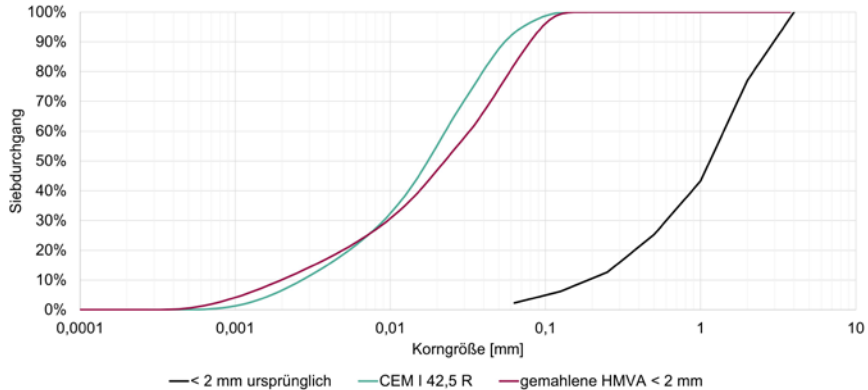


Abbildung 2: Sieblinie der ursprünglichen aufbereiteten mineralischen Fraktion < 2 mm und der gemahlene mineralischen Fraktion < 2 mm im Vergleich zu Zement

#### 3.2 Konzentration an metallischem Aluminium

Die Konzentration des metallischen Aluminiums in der untersuchten konventionell aufbereiteten HMV-Asche < 2 mm betrug 1,9%. Durch das stufenweise Mahlen und Sieben konnte das metallische Aluminium auf 0,35% gesenkt werden, was einer Reduktion von etwa 80% entspricht. Das verbleibende Aluminium liegt in Korngrößen von < 125 µm vor und konnte damit im Rahmen des stufenweisen Mahl- und Sieb-

verfahrens nicht abgetrennt werden. Bei einer Bindemittelsubstitution durch HMV-Asche im Bereich von 20 – 30% wären bei solchen Konzentrationen an metallischem Aluminium Schäden im Beton zu erwarten. So zeigten Aubert et al. (2012) bei 25% Zementsubstitution durch Flugaschen mit einer durchschnittlichen Konzentration an metallischem Aluminium von 0,23%, dass das enthaltene metallische Aluminium zum Quellen im Probekörper und damit zu niedrigerer Druckfestigkeit führte (Aubert et al. 2004). Die Wirkung des Quellens kann bei Betonen mit niedrigen Druckfestigkeiten jedoch vernachlässigbar sein (Aubert et al. 2004), was im weiteren Projektverlauf am Beispiel von Pflastersteinen mit einer Bindemittelsubstitution von bis zu 30% untersucht wird. Außerdem werden im weiteren Projektverlauf zusätzliche Aufbereitungsschritte zur Abreicherung des metallischen Aluminiums in der Feinstasche untersucht.

## Danksagung

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

## Literatur/Quellen

- Aubert, J. E.; Husson, B.; Vaquier, A. (2004): Metallic aluminum in MSWI fly ash: quantification and influence on the properties of cement-based products. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 24 (6), S. 589–596. DOI: 10.1016/j.wasman.2004.01.005.
- Destatis (2018): Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Anlagenart. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis).
- ITAD (2021): Jahresbericht 2021. Hg. v. ITAD – Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.
- Joseph, Aneeta Mary; Snellings, Ruben; van den Heede, Philip; Matthys, Stijn; Belie, Nele de (2018): The Use of Municipal Solid Waste Incineration Ash in Various Building Materials: A Belgian Point of View. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 11 (1). DOI: 10.3390/ma11010141.
- Loginova, E.; Schollbach, K.; Proskurnin, M.; Brouwers, H.J.H. (2021): Municipal solid waste incineration bottom ash fines: Transformation into a minor additional constituent for cements. In: *Resources, Conservation and Recycling* 166, S. 105354. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105354.
- Šyc, Michal; Simon, Franz Georg; Hykš, Jiri; Braga, Roberto; Biganzoli, Laura; Costa, Giulia et al. (2020): Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments. In: *Journal of hazardous materials* 393, S. 122433. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122433.

## Kontakt

Iveta Vateva, M.Sc., Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Universität Kassel, Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik

Tel.-Nr.: 0561 804-3804

E-Mail: [iveta.vateva@uni-kassel.de](mailto:iveta.vateva@uni-kassel.de)

Homepage: [www.uni-kassel.de/go/RMAT/](http://www.uni-kassel.de/go/RMAT/)

# Vergleich der Qualität und Menge an Wertstoffen in Schlacken aus Rost- und Wirbelschichtfeuerung von Siedlungsabfällen

**Abstract:** Im Zuge eines Forschungsprojekts wurden die Quantität und Qualität der verwertbaren Materialien in der Schlacke einer Wirbelschichtfeuerungsanlage und einer Rostverbrennungsanlage verglichen. Beide Anlagen befinden sich in derselben Stadt in Österreich und verwerten hauptsächlich feste Siedlungs- und ähnliche Gewerbeabfälle aus dieser Stadt. Dieser Umstand erlaubt einen aussagekräftigen Vergleich der Schlacken aus diesen beiden Anlagen. Es wurden die Korngrößenverteilung, der Gehalt an wiederverwertbaren Metallen, Glas und Mineralien in verschiedenen Korngrößenfraktionen sowie der Gesamt- und Auslaugungsgehalt von verschiedenen Elementen in der Mineralikfraktion untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die meisten Wertstoffe in der Schlacke, welche in der Wirbelschichtfeuerung anfällt, von besserer Qualität sind. Basierend auf dem Input in die Verbrennungsanlagen können potentiell mehr Aluminium und deutlich mehr Glas aus der Schlacke der Wirbelschichtfeuerung zurückgewonnen werden.

## 1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit basiert auszugsweise auf der Publikation *Comparing the quantity and quality of glass, metals, and minerals present in waste incineration bottom ashes from a fluidized bed and a grate incinerator* von Blasenbauer et al. (2022), welche eingereicht wurde und sich derzeit in Überarbeitung befindet.

Der massenmäßig größte Anteil fester Rückstände aus der Abfallverbrennung sind Flugasche und Schlacke. Je nach Feuerungstechnologie (Rostfeuerung, Wirbelschichtfeuerung, Drehrohrföfen) werden 1-10 m.% des Inputs in die Verbrennungsanlage in die Flugasche übertragen, und etwa 15-25 m.% werden als Schlacke ausgetragen (Purgar et al., 2016). Schlacke besteht im Wesentlichen aus mineralischen Bestandteilen (80-85 m.%) und aus Metallen (8-15 m.%), welche als Sekundärrohstoffe in der Bau- und Metallindustrie verwendet werden können (Chimenos et al., 1999; Holm und Simon, 2017; Huber et al., 2020).

Im Zuge dieser Arbeit werden die Zusammensetzung und das Recyclingpotential von Schlacken aus zwei Anlagen mit unterschiedlicher Verbrennungstechnologie untersucht.

## **2 Methodik**

### **2.1 Anlagenbeschreibung**

Eine der untersuchten Anlagen ist als Rostfeuerung (Typ: horizontaler Gegenlauf-Überschubrost, nasser Schlackeaustrag, Kapazität 250.000 t/a), die andere als Wirbelschichtfeuerung (Typ: stationäre, rotierende Wirbelschicht, „ROWITEC-Technologie“, trockener Schlackeaustrag, Kapazität 100.000 t/a) ausgeführt. Die beiden Anlagen werden hauptsächlich (>90 m.%) mit Hausmüll aus derselben Stadt in Österreich beschickt, was diese ideal für einen Vergleich ihrer Outputfraktionen macht. Die Wirbelschichtfeuerung verbrennt neben geringen Mengen an Klärschlamm (5-10 m.% des Inputs) nur vorbehandelte Siedlungsabfälle. Die Rostfeuerung verbrennt neben unbehandeltem Hausmüll sogenannte „siedlungsähnliche Gewerbeabfälle“.

### **2.2 Probenahme, Charakterisierung und Analytik**

Die Probenahmen der Schlacken erfolgte über ein Jahr, dreimal pro Anlage, zu verschiedenen Jahreszeiten und an verschiedenen Wochentagen. Bei jeder Probe handelte es sich um 20 t frisch angelieferter (nicht gealterter) Schlacke, aus der 3 t Proben entnommen wurden. Die weitere Probenaufbereitung bestand aus einer Trocken- und Nasssiebung. Die Waschsuspension, welche aus dem Unterkorn der Nasssiebung, den gelösten Feststoffen und dem Waschwasser besteht, wurde filtriert. Der Gesamtgehalt an gelösten Feststoffen wurde durch Trocknen des Filtrats bei 105°C bestimmt.

Die Fraktionen >2 mm wurden anhand ihres Aussehens und ihrer magnetischen Eigenschaften von Hand sortiert. Dabei wurden Metalle sowie metallenthaltende Teile (z.B. Elektromotoren), Batterien, mineralisches Material (Glas, mineralisches Material) und unverbranntes Material unterschieden. Die Ergebnisse werden für Aluminium, magnetische Eisenmetalle, schwachmagnetische Eisenmetalle, Kupfer, Messing, Glas, unverbranntes organisches Material und mineralisches Material quantitativ dargestellt.

Mineralisches Material und Glas wurden weiters auf ihre chemische Zusammensetzung und ihr Auslaugungsverhalten analysiert. Die Analysen umfassten Röntgenfluoreszenz-Analysen (RFA), Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) und Ionenchromatographie (IC). Die Ergebnisse dieser Analysen können in Blasenbauer et al. (2022) eingesehen werden.

## **3 Resultate**

Eine Materialflussanalyse zeigt, dass die gesamte Ascheproduktion (Schlacke + Flugasche) bezogen auf den Input in beide Anlagen, mit 21% bei der Rost- und 24% bei der Wirbelschichtfeuerung, sehr ähnlich ist. Signifikante Unterschiede zeigen sich jedoch beim Verhältnis von Schlacke zu Flugasche. Dieses beträgt bei der Rostfeuerung 19% Schlacke zu 2% Flugasche und bei der Wirbelschichtfeuerung 14% Schlacke zu 10% Flugasche. Der wesentlich höhere Anteil an Flugasche bei der Wirbelschichtfeuerung ist einerseits auf die Vorbehandlung (Zerkleinerung, Klassierung, Fe- Metallentfernung) des Abfalls zurückzuführen, und andererseits auf feuerungsspezifische Eigenschaften, welche einen Übergang in das Rauchgas begünstigen.

Wie man in Tabelle 1 sehen kann, besteht die Schlacke aus der Rostfeuerung zu einem großen Teil aus mineralischem Material (67 m.%), gefolgt von Glas (17 m.%) und magnetischen Eisenmetallen (10 m%).



Die Wirbelschichtfeuerungsschlacke besitzt einen wesentlichen höheren Glasanteil (47 m.%), gefolgt von mineralischem Material (38 m.%) und ebenso magnetischen Eisenmetallen. In beiden Schlacken sind wesentliche Anteile an Aluminium 3,3 und 5,7 m.% vorhanden, wobei dieser Wert in der Wirbelschichtfeuerungsschlacke sehr schwankungsbehaftet ist. Messing und Kupfer sind in beiden Schlacken in ähnlichen Größenordnungen vorhanden.

*Tabelle 1: Mittlere gewichtete Zusammensetzung der Rostfeuerungs- und Wirbelschichtschlacken*

	Rostfeuerung		Wirbelschichtfeuerung	
Fraktion	Gewichteter Mittelwert [m. %]			
Aluminium	3,3	±0,3	5,7	±3,6
Magnetische Eisenmetalle	10	±0,26	8	±0,91
Schwachmagnetische Eisenmetalle	0,46	±0,21	1,3	±1
Messing	0,42	±0,045	0,55	±0,19
Kupfer	0,24	±0,068	0,32	±0,12
Glas	17	±2,1	47	±3,4
Unverbranntes	0,39	±0,21	0	-
Mineralisches Material	67	±1,3	38	±2,9

Da die Verbrennungsanlagen sehr unterschiedliche Mengen an Schlacke produzieren, ist ein direkter Vergleich und eine Bewertung, mit welcher der beiden Technologien mehr Wertstoffe zurückgewonnen werden können, nicht zweckmäßig. Daher wird das Verwertungspotenzial von Aluminium, magnetischen Eisenmetallen, schwachmagnetischen Eisenmetallen, Messing, Kupfer und Glas aus Schlacke auf den Input in die jeweilige Verbrennungsanlage bezogen. Diese Methode berücksichtigt die unterschiedlichen Mengen an produzierter Schlacke und vergleicht die beiden Verbrennungstechnologien direkt im Hinblick auf die stoffliche Verwertung.

Der bemerkenswerteste Unterschied ist bei Glas zu beobachten. Aus der Wirbelschichtschlacke können potentiell 62 kg/1000 kg Abfallinput zurückgewonnen werden. Im Vergleich dazu liegt dieses Potential bei der Rostfeuerung bei 32 kg/1000 kg Abfallinput. Dies entspricht einem etwa 92% höherem Verwertungspotential für Glas aus der Wirbelschichtschlacke. Deutliche Unterschiede können auch bei Aluminium gesehen werden, wo 7,5 kg/1000 kg Abfallinput bzw. 34% mehr Aluminium aus der Wirbelschichtschlacke zurückgewonnen werden können. Wie zuvor bereits erwähnt, ist der Aluminiumgehalt zum Teil aber starken Schwankungen unterlegen. Etwa 40% mehr magnetische Eisenmetalle können aus der Rostfeuerungsschlacke rückgewonnen werden. Dies liegt daran, dass diese bei der Vorbehandlung des Abfalls vorm Wirbelschichtofen teilweise entfernt werden. Basierend auf dem Input sind Messing und Kupfer in der Wirbelschichtschlacke um 3% bzw. 1% mehr vorhanden. Diese Materialien unterliegen jedoch ebenso gewissen Schwankungen, wodurch davon ausgegangen werden kann, dass in den Schlacken beider Anlagen in etwa gleich hohe Rückgewinnungspotentiale für Messing und Kupfer vorhanden sind. Eine Wirbelschichtschlackenprobe enthielt ca. fünfmal mehr schwachmagnetische Eisenmetalle als die anderen Proben, was sich im Gesamtgehalt widerspiegelt. Wenn dieser Ausreißer aus der Berechnung ausgeschlossen wird, reduziert sich der Unterschied zwischen Rost- und Wirbelschichtfeuerung auf 12 %.

Die Ähnlichkeiten und Unterschiede zeigen zwei Dinge: (1) ähnliche Verwertungspotenziale für Kupfer, Messing und schwachmagnetische Eisenmetalle können darauf hinweisen, dass der Input in beide Verbrennungsanlagen relativ ähnlich ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Materialien durch die raue Umgebung in einer Verbrennungsanlage weniger beeinträchtigt werden als andere Materialien und daher nahezu unverändert durch die Anlage gehen. (2) Die Unterschiede können zeigen, dass bei einigen Materialien, wie Aluminium und Glas, die Art der Verbrennungstechnologie die Verwertbarkeit dieser Materialien beeinflussen kann. Niedrigere, homogenere Temperaturen, wie sie in der Wirbelschichtfeuerung auftreten, erzeugen weniger Schmelzprodukte, führen in Verbindung mit einem trockenen Schlackeaustrag zu einer geringeren Oxidation und lassen die Teile in ihrer Größe nahezu unverändert.

## **4 Schlussfolgerungen**

Aus recyclingtechnischer Sicht hat Wirbelschichtschlacke gewisse Vorteile gegenüber jener aus Rostfeuerungsanlagen. Zurückgewonnene Metalle sind qualitativ besser für das Recycling geeignet, da sie weniger oxidiert sind. Diese Metalle sind in größeren Partikelgrößenfraktionen konzentriert, was eine Rückgewinnung erheblich erleichtert. Dies ist aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht von Bedeutung, da Metalle einen erheblichen Geldwert haben und die Primärproduktion von Metallen eine größere Umweltbelastung darstellt als das Recycling. Eine hohe Rückgewinnungsrate von Metallen erleichtert auch die Verwertung von Glas und mineralischen Fraktion, da beides geringe Metallgehalte erfordert. Da die Wirbelschichtschlacke zu fast 50 m.% aus Glas besteht, lohnt es sich, die Qualität und Verwertungsmethoden dieses Materials näher zu untersuchen. Für die Verwertung im Bausektor sind die Mineralikfraktion aus der Wirbelschichtschlacke aufgrund des geringeren Gesamtgehalts an Schwermetallen und ihres besseren Auslaugungsverhaltens ebenfalls vielversprechender.

Bezogen auf den Input kann aus der Wirbelschichtschlacke mehr Aluminium und deutlich mehr Glas zurückgewonnen werden. Bei anderen Metallen hat die Verbrennungstechnologie keinen wesentlichen Einfluss auf das Rückgewinnungspotenzial.

Viele der Vorteile der Wirbelschichtschlacke sind auf eine Kombination aus einem homogenen Input (z.B. Vorbehandlung des Abfalls), den Bedingungen in der Verbrennungsanlage (z.B. niedrigere Betttemperatur, homogenere Temperaturverteilung) und dem trockenen Schlackeaustrag zurückzuführen.

Welche Verbrennungstechnologie im Sinne der Kreislaufwirtschaft und unter Umweltgesichtspunkten besser ist, lässt sich jedoch nicht allein anhand eines Vergleichs der Schlacken beurteilen. Dazu müssen die gesamten Verbrennungsprozesse einschließlich ihrer Vorprozesse (z.B. Vorbehandlung von Siedlungsabfällen) und die Anwendungsmöglichkeiten für die Schlackebestandteile berücksichtigt werden.

## **Danksagung**

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Forschungsinitiative CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der TU Wien. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Chris-

tian Doppler Forschungsgesellschaft. Gleichzeitig bedanken wir uns bei unseren Unternehmenspartnern Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoffrecycling Austria AG, Borealis AG, Brantner Österreich GmbH, Lenzing AG, Linz Service GmbH, MM Board and Paper AG, OMV Downstream GmbH, Wien Energie GmbH und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H., sowie bei der Magistratsabteilung Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien (MA 48).

## Literatur/Quellen

- Blasenbauer, D., Huber, F., Mühl, J., Fellner, J., Lederer, J., 2022 (in Review). Comparing the quantity and quality of glass, metals, and minerals present in waste incineration bottom ashes from a fluidized bed and a grate incinerator. *Waste Management*.
- Chimenos, J.M., Segarra, M., Fernández, M.A., Espiell, F., 1999. Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. *Journal of Hazardous Materials* 64, 211-222, [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(98\)00246-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(98)00246-5).
- Holm, O., Simon, F.-G., 2017. Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany. *Waste Management* 59, 229-236, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.004>.
- Huber, F., Blasenbauer, D., Aschenbrenner, P., Fellner, J., 2020. Complete determination of the material composition of municipal solid waste incineration bottom ash. *Waste Management* 102, 677-685, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.036>.
- Purgar, A., Winter, F., Blasenbauer, D., Hartmann, S., Fellner, J., Lederer, J., Rechberger, H., 2016. Main drivers for integrating zinc recovery from fly ashes into the Viennese waste incineration cluster. *Fuel Processing Technology* 141, 243-248, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.10.003>.

## Kontakt

*Dipl.-Ing., Dominik Blasenbauer, Projektassistent*

Technische Universität Wien / Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften, Christian Doppler Labor für eine Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft

Tel.-Nr. +43 1 58801 740028

E-Mail: [dominik.blasenbauer@tuwien.ac.at](mailto:dominik.blasenbauer@tuwien.ac.at)

Homepage: <https://www.tuwien.at/tch/icebe>



## Thermische Klärschlammbehandlung an dezentralen Standorten – Versuchsbetrieb einer Wirbelfeuerung

**Abstract:** Im Projekt VerKlär<sup>2</sup> (Verwertungskonzept für energieautarke und ressourcenschonende Kläranlagen: Integrierte Klärschlamm- und Klärgasverwertung) wird die Wirbelfeuerung als innovatives Verbrennungsverfahren zur dezentralen Verwertung von Klärschlamm erprobt. Die Wirbelfeuerung ermöglicht durch die räumliche Trennung in Haupt- und Nachbrennkammer eine gestufte Verbrennung bei hohen Verweilzeiten und die Einstellung unterschiedlicher Temperaturen in den beiden Brennräumen. Durch die Möglichkeit der Einstellung niedriger Verbrennungstemperaturen in der Hauptbrennkammer bieten sich einerseits Vorteile bei der Verbrennung von Brennstoffen mit ungünstigen Ascheerweichungseigenschaften. Andererseits können Stickoxidemissionen beim Einsatz von Brennstoffen mit hohen Stickstoffanteilen bereits durch Primärmaßnahmen (gestufte Verbrennung) weitestgehend gemindert werden. Beide Eigenschaften – ungünstiges Ascheerweichungsverhalten und hohe Stickstoffanteile – sind typische Charakteristika von Klärschlamm, sodass sich das gewählte Feuerungskonzept der Wirbelfeuerung in besonderem Maße für diesen Brennstoff eignet.

### 1 Einleitung

Die Verbrennung bietet durch die vollständige Oxidation organischer Schadstoffe eine sichere und umweltgerechte Entsorgungsmöglichkeit für Klärschlamm. Bei der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung besteht hingegen das Risiko eines Eintrags von Schadstoffen, wie z. B. Arzneimittelrückständen, endokrinen Disruptoren, Krankheitserregern oder per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in die Umwelt (Roskosch und Heidecke 2018). Entsprechend wird die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung zukünftig weitestgehend beendet. Gleichzeitig wird zur Erhöhung der Ressourceneffizienz eine Pflicht zur Phosphorrückgewinnung eingeführt. Dadurch werden neben der landwirtschaftlichen Verwertung auch bisher etablierte thermische Entsorgungspfade für Klärschlamm, wie die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, Zementwerken und Müllverbrennungsanlagen, stark eingeschränkt. In Deutschland bestehen infolgedessen zahlreiche Pläne und Projekte zur Errichtung neuer thermischer Klärschlammbehandlungsanlagen, welche zumeist als große zentrale Monoverbrennungsanlagen ausgeführt sind. Während sich die stationäre Wirbelschicht als Standardverfahren für die großtechnische Umsetzung etabliert hat, existiert für ländliche Regionen und kleinere Kläranlagen kein vergleichbar bewährtes Verfahren. Die Skalierbarkeit der bisher eingesetzten Verfahren zur Klärschlammverbrennung auf kleinere Baugrößen ist insbesondere ökonomisch limitiert. In kleineren Maßstäben vorhandene alternative Verfahren wie die Pyrolyse und Vergasung können aufgrund der nicht vollständigen Zersetzung organischer Schadstoffe zu problematischen Rückständen führen, welche zudem nicht als Phosphorrezyklate zugelassen sind (Schnell und Quicker, 2021). Allerdings

bieten dezentrale Verfahren auch eindeutige ökologische Vorteile, z. B. durch Vermeidung langer Transportdistanzen, die Einbindung in das lokale Energiekonzept und die regionale Schließung von Stoffkreisläufen (Phosphorrückgewinnung).

Die bisher am Markt verfügbaren Verfahren zur dezentralen thermischen Klärschlammbehandlung bewegen sich in einem Leistungsbereich ab ca. 1.000 Mg Trockenmasse (TM) pro Jahr. Durch die modulare Anlagenauslegung der Wirbelfeuerung mit Baugrößen ab etwa 100 kW wird die minimale Behandlungskapazität auf ca. 250 Mg TM pro Jahr und Modul herabgesetzt. Damit wird auch auf kleineren Kläranlagen ein kontinuierlicher Betrieb einer Klärschlammverbrennung ermöglicht. Die technische Zielsetzung des Projekts VerKlär<sup>2</sup> umfasst die Konzeption, Umsetzung, Inbetriebnahme, technische Prüfung, Optimierung und langfristige Demonstration einer Wirbelfeuerung als dezentrales modulares Verbrennungsaggregat für Klärschlamm im Dauerbetrieb. Als Anwendungsbeispiel wird im Rahmen des Projektes auf der Kläranlage der Stadt Haßfurt, mit einer Ausbaugröße von 27.500 Einwohnergleichwerten, eine Wirbelfeuerung zur Klärschlammverbrennung errichtet und in das vorhandene energetische Konzept integriert.

## **2 Aufbau der Wirbelfeuerung**

### **2.1 Funktionsprinzip**

Das dezentrale Verfahren der Wirbelfeuerung nutzt den hervorragenden Wärme- und Stoffübergang zwischen Brennstoff und Verbrennungsluft des Wirbelschichtprinzips für die Umsetzung von Reststoffen, ohne den Einsatz zusätzlichen inerten Wirbelbettmaterials. Die Wirbelfeuerung besteht im Wesentlichen aus zwei aufeinanderfolgenden Brennkammern, der Hauptbrennkammer (HBK) und der Nachbrennkammer (NBK). In der vertikalen HBK wird der Festbrennstoff über eine Schleuse zentral am Kopf der Feuerung zugeführt und am Ofenboden durch eintretende Primärluft fluidisiert. Der Brennstoff bildet mit der Gasströmung aufgrund vertikal im Brennraum angeordneter Strömungsleitplatten zwei rotierende Wirbel. Rauchgas und Flugasche verlassen die HBK mit dem Gasstrom über eine Öffnung in der Rückwand und werden in der Nachbrennkammer durch Zugabe weiterer Verbrennungsluft (Sekundärluft) nachoxidiert. Größere Aschepartikel werden am Boden der Hauptbrennkammer, Flugaschepartikel am Boden der Nachbrennkammer jeweils mit Schnecken ausgetragen. Die Wärmeübertragung auf einen Wasserkreislauf erfolgt über den Wassermantel beider Brennkammern sowie mittels Wärmeübertrager im hinteren Teil der NBK. Das Abgas wird mithilfe eines Saugzuges durch eine Abgasreinigungsanlage und den Kamin abgeführt.

Das Prinzip der Wirbelfeuerung erlaubt durch die räumliche Trennung der beiden Brennkammern eine gestufte Verbrennung bei hoher Verweilzeit. Hierdurch lassen sich unterschiedliche Temperaturen in den beiden Verbrennungszonen und damit vergleichsweise niedrige Temperaturen in der ersten Stufe realisieren. Dies bietet Vorteile bei der Verbrennung von Brennstoffen mit ungünstigen Ascheerweichungseigenschaften sowie von Brennstoffen mit hohem Stickstoffanteil, wie z. B. Klärschlamm. Der Effekt kann durch die Option zur Rezirkulation von Rauchgas hinter der Nachbrennkammer in die Hauptbrennkammer noch verstärkt werden. Dadurch ist die Einstellung unterstöchiometrischer Bedingungen (Reduktionszone mit  $\lambda < 1$  in der HBK) möglich. Trotz reduzierender Atmosphäre gebildete Stickoxide werden auf diese Weise noch in der HBK durch reduzierend wirkende Komponenten (CO) abgebaut. Der vollständige Ausbrand der oxidierbaren Gasbestandteile wird in der NBK (bei  $\lambda > 1$ ) sichergestellt. Die Stickoxidemissionen bei Verbrennungsversuchen mit Klärschlamm konnten im gestuften Betrieb beispielsweise von ca.



siert. Die in der HBK und NBK über Schnecken ausgetragene Asche wird in zwei getrennten Behältern gesammelt. Das Rauchgas aus der NBK wird teilweise als Rezigas in die HBK zurückgeführt. Das restliche Rauchgas wird über eine Abgasreinigung, bestehend aus einer Trockensorption mit Kerzenfilter und einem Saugzug in den Kamin geleitet. An diversen Positionen im Versuchsaufbau befinden sich Messstellen für die Aufnahme von Temperaturen, Drücken, Sauerstoff- und Schadgaskonzentrationen, die einerseits zur Anlagenregelung bzw. -steuerung genutzt sowie andererseits für die Versuchsauswertung aufgezeichnet werden.

### 3 Versuchsbetrieb und -auswertung

Zur vollständigen Bilanzierung aller In- und Outputströme werden als Massen- bzw. Volumenströme der zugeführte Brennstoff, die Primär- und Sekundärluft, die anfallenden Aschemengen sowie das Abgas erfasst. Die Aufnahme des Brennstoffmassenstroms erfolgt über die Aufzeichnung der prozentualen Leistung des Motors der Brennstoffschnecke. Mithilfe einer zuvor aufgenommenen brennstoffspezifischen Förderkennlinie werden über die Leistung des Schneckenmotors der Durchsatz sowie die Brennstoffwärmeleistung berechnet. Für die Erfassung bzw. Berechnung der Luft- und Abgasvolumenströme sind Staudrucksonden zur Messung des Differenzdruckes in den jeweiligen Rohrleitungen installiert. Die an den Wasser- bzw. Kühlkreislauf abgegebene Wärme wird einerseits über die Aufzeichnung der Vor- und Rücklauftemperaturen und andererseits mithilfe eines Wärmemengenzählers erfasst.

Die anfallende Asche aus HBK und NBK wird in getrennten Behältern gesammelt und gewogen. Entnommene Ascheproben werden zur Bewertung des Brennstoffausbrandes hinsichtlich des Glühverlustes analysiert. Zudem werden die Phosphor- und Schwermetallgehalte mittels Röntgenfluoreszenzanalyse ermittelt. Die Zusammensetzungen der beiden getrennt erfassten Aschen unterschieden sich für bisher durchgeführte und ausgewertete Versuche nicht signifikant, wohingegen optisch deutliche Unterschiede erkennbar sind, wie Abbildung 2 veranschaulicht. Während die Asche der HBK auch nach der Verbrennung noch in Pellet- bzw. Granulatform vorlag, war die Asche aus der NBK pulverförmig.

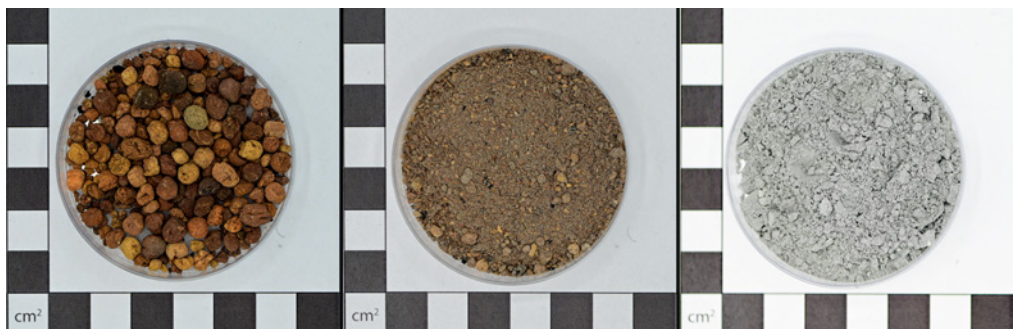


Abbildung 2: Rückstände der Verbrennung von Klärschlamm-pellets aus der Wirbelfeuerung:  
Asche aus der HBK (links), Asche aus der NBK (Mitte), Filterstaub mit Rauchgasreinigungsrückständen (rechts)

Beim Versuchsbetrieb des Prototyps der Wirbelfeuerung wird die Abgaszusammensetzung kontinuierlich mit einem Emissionsmessgerät analysiert und aufgezeichnet. Je nach Versuchsziel können sowohl die



Roh- (vor Abgasreinigung) als auch die Reingaszusammensetzung (nach Abgasreinigung) gemessen werden. Die Emissionsgrenzwerte für CO, NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub> werden im ungestuften Betrieb der Wirbelfeuerung teilweise deutlich überschritten. CO und NO<sub>x</sub> können allein durch Primärmaßnahmen (gestufte Verbrennung) so weit gemindert werden, dass die Grenzwerte der 17. BImSchV eingehalten werden. Für NO<sub>x</sub> wurde im bisherigen Versuchsbetrieb eine Minderung von über 1.000 mg/m<sup>3</sup> auf 70-150 mg/m<sup>3</sup> erzielt. Die grundsätzliche Funktionalität der Emissionsminderung für die Stickoxide durch die gestufte Verbrennung in der Wirbelfeuerung, bei gleichzeitig gutem Gasausbrand (CO-Konzentration), konnte somit bereits bestätigt werden.

Zur Bewertung der SO<sub>2</sub>-Minderung wurden zudem Reingasmessungen hinter der Abgasreinigung durchgeführt. Das Abgas wurde in den Versuchen über einen Kerzenfilter geleitet, welcher einerseits zur Staubabscheidung genutzt wurde. Andererseits wurde der Filter mit Sorbens (NaHCO<sub>3</sub> und Herdofenkoks) zur Emissionsminderung beschichtet. Durch das Precoating des Filters, also die Beschichtung des Filters mit Sorbens vor der ersten Beaufschlagung mit Abgas, wurde bereits eine deutliche Abnahme der SO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht. Nach erneutem Anstieg der SO<sub>2</sub>-Emissionen wurde weiteres Sorbens vor dem Filter eingeblasen. Hierdurch konnten die SO<sub>2</sub>-Emissionen im bisherigen Versuchsbetrieb bereits von über 2.500 mg/m<sup>3</sup> auf 20–40 mg/m<sup>3</sup> im Reingas gemindert werden.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Im bisherigen Versuchsbetrieb der Wirbelfeuerung konnte die grundsätzliche Funktionalität der Technik für die Verbrennung von Klärschlamm bzw. Klärschlammpellets als Einsatzstoff bestätigt werden. Die CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen konnten allein durch Primärmaßnahmen (gestufte Verbrennung) so weit gemindert werden, dass die Einhaltung der Grenzwerte der 17. BImSchV möglich war. Die Minderung der einsatzstoffbedingt hohen SO<sub>2</sub>-Emissionen durch Trockensorption, unter Verwendung von NaHCO<sub>3</sub> als Sorptionsmittel, auf Werte unterhalb des in der 17. BImSchV geforderten Grenzwertes war ebenfalls möglich.

Im weiteren Versuchsbetrieb soll die Prozessstabilität verbessert werden, wofür unter anderem die Durchführung von Langzeitversuchen vorgesehen ist. Zudem soll auf Basis bereits durchgeführter Voruntersuchungen zum Phosphor-Recycling der Einsatz von Additiven bei der Klärschlammverbrennung in der Wirbelfeuerung erprobt werden. Ziel ist die Herstellung einer qualitativ hochwertigen Asche, die entweder direkt als Düngemittel oder als schwermetallarmer Ausgangsstoff mit hoher Löslichkeit des enthaltenen Phosphors für die Düngemittelherstellung genutzt werden kann.

## Danksagung

Das Projekt VerKlär<sup>2</sup> wird in Kooperation mit der Stadt Haßfurt, der Firma Spanner Re<sup>2</sup> sowie dem Institut für Energietechnik an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden bearbeitet und im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramm durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert.

## Literatur/Quellen

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

Schnell, M.; Stark, K.; Quicker, P.: Thermische Klärschlammbehandlung an dezentralen Standorten – Zwischenergebnisse zum Versuchsbetrieb einer Wirbelfeuerung. In: Holm, O. et al. (Hrsg.) Verwertung von Klärschlamm 5. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 2022, ISBN 978-3-944310-65-7, S. 164-182

Roskosch, Andrea; Heidecke, Patric (2018): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. vollständig überarbeitete Auflage. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Schnell, Matthias; Quicker, Peter (2021): Alternative Verfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung. In: Müll und Abfall (2). DOI: 10.37307/j.1863-9763.2021.02.04.

Stark, Kirsten; Schnell, Matthias; Quicker, Peter (2022): Dezentrale Klärschlammverbrennung in einer Wirbelfeuerung: Vorversuche zur Schwermetallabscheidung durch Additivierung. In: Anke Bockreis et al. (Hrsg.): 11. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft. Innsbruck: innsbruck university press, S. 229–233.

## Kontakt

*Matthias Schnell, M. Sc. , Arbeitsgruppenleiter Biomasse*

Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER), RWTH Aachen University

Tel.-Nr.: 02418090714

E-Mail: [schnell@teer.rwth-aachen.de](mailto:schnell@teer.rwth-aachen.de)

Homepage: [www.teer.rwth-aachen.de](http://www.teer.rwth-aachen.de)

# TEIL 5

## Kreislaufwirtschaft II

Leitung:

Prof. Dr. Sabine Flamme



## Charakterisierung von Abfällen aus dem öffentlichen Raum – Fallstudie der Stadt Krems

**Abstract:** Öffentliche Abfälle aus Parks, Fußgängerzonen, Promenaden oder Plätzen sind ein sichtbarer, jedoch bislang wenig erforschter und genutzter Abfallstrom. Um Qualität und Quantität des Abfallstroms zu erheben und die Bewertung von dessen Wertstoffpotential zu ermöglichen, wurde im Zuge dieser Fallstudie eine detaillierte Abfallanalyse in der Stadt Krems (25.000 Einwohner) durchgeführt. Insgesamt wurden dazu 969 kg aus drei Teilgebieten der Stadt sortiert. Die Erkenntnisse bilden eine wichtige Grundlage für weiterführende Analysen, wie Stoffstromanalysen (MFA) oder Ökobilanzen (LCA), und dienen als Wissensbasis für die Abfallwirtschaftsplanung.

### 1 Einleitung

Der steigende Außer-Haus-Konsum sowie der Trend zu mehr Convenience führen zu einem kontinuierlichen Anstieg an Einweg- und Verpackungsmüll. Um die daraus resultierenden Umweltauswirkungen zu reduzieren, werden im EU-Kreislaufwirtschaftspaket ambitionierte Sammel- und Recyclingziele vorgegeben. So müssen bis 2025 die Recyclingquoten für Kunststoffverpackungsabfälle auf 50 % und bis 2030 auf 55 % erhöht werden (EC, 2018), was in Österreich ungefähr einer Verdoppelung entspricht (ARA, 2019; van Eygen et al., 2018). Die begleitende Einwegkunststoffrichtlinie (2019/904/EG) enthält weitere Vorschriften für bestimmte Kunststoffprodukte, wie Take-away Verpackungen, Plastikbesteck und Getränkebecher. Diese reichen von Sensibilisierungs- und Kennzeichnungsvorschriften, Zielen für die Verbrauchsreduzierung, Quoten für die getrennte Sammlung, Produktverboten und Maßnahmen zur Ausweitung der Herstellerverantwortung (EPR).

Eine flächendeckende getrennte Abfallsammlung kann einen essenziellen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leisten, indem möglichst sortenreine Abfallströme für ein stoffliches Recycling gesammelt werden. Gerade im öffentlichen Raum, wo viele Wertstoffe wie Kunststoffverpackungen anfallen, werden Abfälle größtenteils gemischt gesammelt und somit in der Regel nicht recycelt. Die getrennte Sammlung ist auf bestimmte Fraktionen, wie Zigaretten, oder auf bestimmte Orte, die von privaten Betreibern verwaltet werden, z. B. Bahnhöfe, Flughäfen, Einkaufszentren und Museen, beschränkt (EC, 2021).

Im Gegensatz zu Haushaltsabfällen, welche in regelmäßigen Abständen im Rahmen von Restmüllsortierungen erhoben und veröffentlicht werden, stehen aktuell kaum Daten zu Mengen, Zusammensetzung und Wertstoffpotential von öffentlichen Abfällen zur Verfügung. Um diese Wissenslücke zu schließen, wurde im Rahmen dieser Fallstudie eine umfassende Abfallanalyse in der Stadt Krems an der Donau (Einwohnerzahl ca. 25.000) durchgeführt.

## 2 Methodik

### 2.1 Sammlung und Probenahme

Um mögliche strukturelle Unterschiede in der Abfallzusammensetzung abzubilden, wurde das Stadtgebiet grob in drei Teilgebiete unterteilt: Straßen (S), Parks und Freizeitgebiete (P) und öffentlicher Verkehr (PT). Um saisonale Schwankungen zu berücksichtigen, wurden zwei Analysen, jeweils über eine Woche, durchgeführt. Der erste Durchgang (1.DG) fand im Spätwinter/Frühling statt, der zweite Durchgang (2.DG) im Spätsommer/Herbst. Der Abfall aus dem Stadtgebiet wurde über diesen Zeitraum, getrennt nach Teilgebiet, von den Abfallsammeltruppen der Stadt Krems gesammelt und bereitgestellt. Insgesamt wurde bei der Analyse eine Abdeckung > 90 % erreicht. Es waren 661 der 720 Abfallbehälter aus dem Stadtgebiet, 19 davon für die getrennte Leichtverpackungssammlung, und alle 12 Trennbehälter (je 4 Sammelfraktionen) aus dem Bahnsteigbereich inkludiert.

Um eine repräsentative Probe für die Sortierung zu erhalten, wurde der gemischte Abfall auf eine große Kunststoffplane entleert (je rund 50 - 100 kg Abfall), homogenisiert und die Masse durch Kegeln und Teilen bzw. Vierteln reduziert. Offensichtlich unautorisierte Abfälle, wie Sperrmüll und Haushaltsmüllsäcke, wurden vorab ausgeschleust und sind somit nicht in der Probe enthalten. Getrennte Sammelfraktionen (LVP, Papier, Metall und Kunststoff) wurden nicht beprobt, sondern gänzlich sortiert.

### 2.2 Sortierpraxis

Die entnommenen Proben wurden gewogen, auf einen Sortiertisch geladen und manuell sortiert. Es wurde keine Siebung durchgeführt. Um eine Vergleichbarkeit mit bundesweiten Abfallanalysen zu ermöglichen, wurde der Sortierkatalog aus dem österreichischen Leitfaden für Restmüll-Sortieranalysen (TA Sortieranalysen, 2017) übernommen, und für öffentliche Abfälle adaptiert bzw. erweitert. Er ist in 12 Hauptfraktionen; *Biogene Abfälle, Papier, Leichtverpackungen (LVP), Glas, Metalle, Hygienepapier, Elektro- und Elektronikaltgeräte, Batterien und Akkus, Problemabfälle, Hundekot, sonstige Abfälle und Sortierrest*, und weiter auf mehreren Ebenen in 88 Unterfraktionen unterteilt. Ein Fokus lag auf Wertstoff- und Verpackungsfraktionen. Um eine detaillierte Auswertung bezüglich relevanter Qualitätsparameter (Restinhalte, Feuchtegehalt, Lebensmittelkontakt, Beschichtungen etc.) sowie Einwegkunststoffanteil (lt. Richtlinie 2019/904/EG) zu ermöglichen, wurden relevante Fraktionen in weiteren Unterebenen nachsortiert, gereinigt und/oder getrocknet. Die Sortierkataloge für getrennte Sammlung waren auf die entsprechenden Zielfraktionen fokussiert, und außerhalb dieser weniger detailliert. Unautorisierte Abfälle wurden verwogen und dokumentiert, aber nicht weiter untersucht.

Alle leicht trennbaren Objekte wurden zerlegt (z.B. Taschentuch aus Verpackung). Gefüllte Verpackungen wurden bis auf ihren Restinhalt entleert. Anhaftende Packhilfsmittel (Verschlüsse, Etiketten etc.) wurden auf den Verpackungen belassen und sind in der jeweiligen Fraktion der Hauptkomponente enthalten. Nach der Sortierung wurde die Masse der sortierten Fraktionen dokumentiert und mit der Gesamtmasse der Probe verglichen.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Mengenerhebung

Insgesamt wurden in zwei Wochen 3747 kg gemischte Abfälle und 195 kg getrennte Abfälle gesammelt. Es zeigten sich deutliche saisonale Schwankungen, mit einem Anstieg von 30 % während des zweiten Durchgangs. Hochgerechnet ergibt sich daraus ein Aufkommen von ca. 4,1 kg pro Einwohner und insgesamt 103 Tonnen an öffentlichen Abfällen pro Jahr. Verglichen mit der jährlichen Menge an gemischten Siedlungsabfällen in Krems (153 kg pro Einwohner) macht dies 2,7 % und 0,8 % im Vergleich zum Gesamtabfallaufkommen ohne Bauschutt (496 kg) aus (Land Niederösterreich, 2020). Der Anteil an identifiziertem unautorisiertem Abfall beträgt rund 8 %.

#### 3.2 Abfallzusammensetzung

Insgesamt wurden in den beiden Durchgängen 735 kg aus dem Stadtgebiet (P+S) und 234 kg Abfälle aus dem öffentlichen Verkehr (PT) sortiert. Die Auswertung des Restmülls zeigt, dass saisonale sowie strukturelle Schwankungen in den Teilgebieten P und S zwar erkennbar, jedoch gering sind. So ist beispielsweise der Anteil an biogenen Abfällen und Kunststoffverpackungen, insbesondere PET-Flaschen in der wärmeren Jahreszeit tendenziell höher und das anteilmäßige Aufkommen an Hundekot im Abfall geringer. Insgesamt sind die größten Fraktionen Hundekot, gefolgt von Papier, Karton und Pappe (PPK), biogenen Abfällen und Glas (siehe Abbildung 1). Bei der biogenen Fraktion handelt es sich überwiegend um vermeidbare Lebensmittelabfälle (12,6 %), einschließlich Flüssigkeiten und Getränke-resten. In der PPK-Fraktion sind hauptsächlich Druckerzeugnisse (6,1 %), gefolgt von Karton- (5,1 %) und Papierverpackungen (2,7 %) enthalten. Glas beinhaltet zum Großteil farbige Getränkeflaschen (9,3 %) und Metall zum Großteil Aluminiumgetränkedosen (4,1 %). Bei den Leichtverpackungen dominieren PET-Getränkeflaschen (5,1 %), Kunststoffhohlkörper (3,1 %), Verbundverpackungen samt Getränkekartons (2,6 %) und Folienverpackungen (2,1 %).

Verglichen mit der Zusammensetzung des Hausmülls in Niederösterreich (Merstallinger, 2019) wird deutlich, dass sich der öffentliche Abfall durch wesentlich geringere Mengen an biogenen Abfällen und höhere Mengen an Wertstoffen unterscheidet. So beträgt der Anteil an Glas, PPK, Metall und LVP gesamt 51,4 % (Vgl. Hausmüll NÖ: 25,3 %), das meiste in Form von Verpackungsabfällen (43,6 %). Werden Feuchtigkeit und Restinhalte berücksichtigt, ergibt sich ein Netto-Verpackungsanteil von 38,6 %. Der Anteil an Einwegkunststoffprodukten, im Sinne der Richtlinie (2019/904/EG), liegt bei 14,1 %.

In den getrennt gesammelten Fraktionen aus dem Bahnsteigbereich weist der Restmüll (als eine der Fraktionen) einen sehr hohen Anteil an Glas (29 %) und biogenen Abfällen (27,4 %) auf. Am besten getrennt wurde Papier (84,2 % PPK), gefolgt von Kunststoff (56,2 % Kunststoff- und sonstige LVP, exkl. Metallverpackungen) und Metall (42,3 % Metall). Die getrennt gesammelten LVP-Behälter aus dem Stadtgebiet enthalten insgesamt 44 % Leicht- und Metallverpackungen.

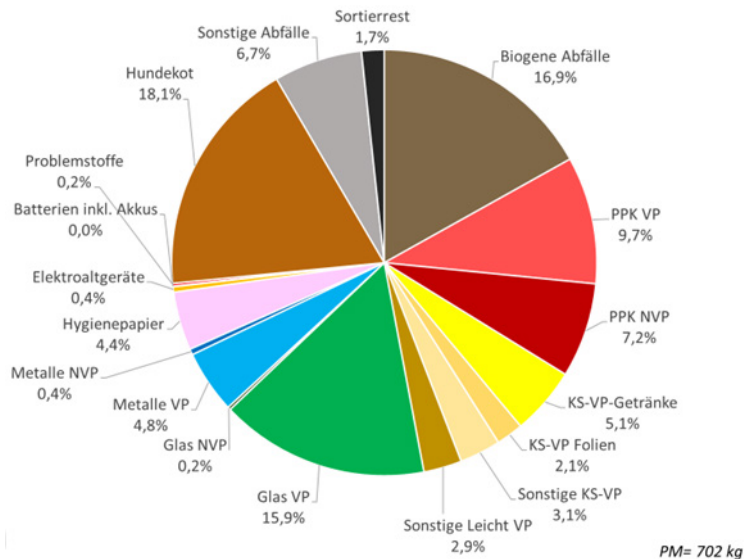


Abbildung 1: Zusammensetzung des öffentlichen Restmülls in Krems (gesamt); PM = Probemenge, VP = Verpackung, NVP = Nicht-Verpackung, KS = Kunststoff, PPK = Papier, Karton, Pappe

## 4 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der Abfallanalyse implizieren ein hohes Wertstoffpotential des öffentlichen Abfalls. Um mögliche Nutzungsszenarien wie zum Beispiel eine Ausweitung der getrennten Sammlung im öffentlichen Raum und dessen Umweltauswirkungen zu bewerten, benötigt es weiterführende Analysen (LCA, MFA). Dabei gilt es zukünftige EU-weite und nationale Maßnahmenkonzepte, wie zum Beispiel in Österreich die Einführung des Pfandsystems für Einweggetränkeverpackungen mit 2025, und deren Auswirkungen auf den Abfallstrom zu berücksichtigen. Einflüsse auf das Trennverhalten im öffentlichen Raum werden im Rahmen des Forschungsprojekts „UrbanWaste“ (ESR20-019) durch Kooperationspartner\_innen der Donau-Universität Krems erhoben und ein mögliches Gestaltungskonzept der Abfallinfrastruktur von der Universität für Angewandte Kunst Wien erarbeitet.

## Danksagung

Die Arbeiten werden durch den Wiener Wissenschafts-, Forschungs- und Technologiefonds (WWTF) und das Land Niederösterreich im Zuge des Projektes „UrbanWaste“ (ESR20-019) gefördert. Die Autorinnen danken zudem den Mitarbeiter\_innen der städtischen Abfallwirtschaft Krems für die tatkräftige Unterstützung.



## Literatur/Quellen

- ARA (2019). Altstoff Recycling Austria AG – Transparenz und Nachhaltigkeitsbericht 2019.
- EC (2021). Study to support the development of implementing acts and guidance under the Directive on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment: WP 6: final report on developing guidelines on litter clean-up costs. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2779/270147>
- EC (2018). Richtlinie (EU) 2018/ des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle. Amtsblatt der Europäischen Union. L 150, 141-151.
- Land Niederösterreich (2020). Abfallwirtschaft Niederösterreich Daten 2019.
- TA Sortieranaysen. (2017). Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranaysen. Adaptierte Version (Oktober 2021).
- Van Eygen, E., Laner, D., & Fellner, J. (2018). Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in Austria. *Waste Management*, 72, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.040>

## Kontakt

*MSc., Veronika Kladnik, Projektmitarbeiterin*  
TU Wien / Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement  
Tel.-Nr.: +43 1 58 801 226 43  
E-Mail: [veronika.kladnik@tuwien.ac.at](mailto:veronika.kladnik@tuwien.ac.at)  
Homepage: [iwr.tuwien.ac.at/ressourcen](http://iwr.tuwien.ac.at/ressourcen)





NASS können zudem weitere positive Aspekte hervorbringen: Geringere Kosten als das konventionelle System, neue Formen der Wertschöpfung, Reduktion von Antibiotikaresistenzen im Wasserkreislauf, Erhöhung des Gewässerschutzes, Erhöhung der Wassersicherheit und die Vermeidung klimarelevanter Gase (Vgl. DWA Arbeitsgruppe KA-1.8 (2011); vgl. Starkl et al. (2005); vgl. Oldenburg (2007)).

Trotz dieser Vorteile finden NASS bisher eine sehr geringe Umsetzung und verharren in der Position einer Nischeninnovation (Vgl. Hoffmann et al. (2020)). Die gegenwärtige Betrachtung von Abwassersystemen mit rein sektoraler Fokussierung, räumlich abgetrennten administrativen Einheiten (Gemeinden) oder die Nicht-Berücksichtigung der aus NASS resultierenden Produkte stellen substantielle Hemmnisse zur stärkeren Umsetzung von NASS dar (Vgl. Rost et al. (2015); vgl. Lüthi et al. (2011)).

Setzte man die NASS-Produkte in den Fokus, wären die abwasserbeseitigungspflichtigen Produzenten verschiedener Produkte, die sie auf einem Markt absetzen könnten. Damit einher ginge ein Perspektivwechsel – von einem Akteur der Sicherung der Daseinsvorsorge zu einem Marktakteur, der die Produkte möglichst effizient produzieren und absetzen möchte. Die diesem Aufsatz zugrundeliegende Dissertation fokussiert die Konzeption einer Entscheidungsunterstützung zur effizienten Verwertung der Produktoptionen aus NASS und die mit ihnen, je nach spezifischen lokalen Voraussetzungen, realisierbaren Geschäftsmodelle (Vgl. Lück (2022)).

## **2 Methodik**

Theoretischer Bezugsrahmen ist die Transitionstheorie bzw. die Multi-Level-Perspektive (MLP) als spezifischer Teil dessen (Vgl. Lück (2022)). Die MLP dient dabei als ein auf verschiedenen Theorien beruhender Analyserahmen, womit erklärt und konzeptionalisiert werden kann, wie Veränderungen in einem sozio-technischen System herbeigeführt werden können (Vgl. Köhler et al. (2019)). Die MLP unterscheidet drei Analyseebenen: Die sozio-technische Landschaft, das sozio-technische Regime und Nischeninnovationen (Vgl. Rip und Kemp (1998); vgl. Geels (2011); vgl. Köhler et al. (2019)). Zur Analyse der sozio-technischen Landschaft und des sozio-technischen Regimes wird die PESTEL-Analyse angewandt. Für die Analyse der Branchenumwelten der NASS-Produkte wird auf die Branchenstrukturanalyse nach Porter zurückgegriffen, einhergehend mit einer Markt- und Kundenanalyse für die NASS-Produkte (Siehe Lück (2022)).

Grundlage der marktorientierten Entwicklung der NASS-Geschäftsmodelle bildet die Ontologie der Business Model Canvas nach Osterwalder (Siehe Osterwalder (2004); Osterwalder und Pigneur (2013)). Die Entwicklung des Entscheidungsmodells fußt methodisch auf der Nutzwertanalyse (Siehe hierzu insbesondere Zangemeister (1976)).

## **3 Ergebnisse**

Die Arbeit hat – erstmalig für den globalen Norden – verschiedene Geschäftsmodelle für die Verwertung der Produkte aus NASS entwickelt. Dabei konnten anhand der Ontologie der Business Model Canvas elf NASS-Geschäftsmodelle für verschiedene NASS-Produkte und variierende Kundensegmente entwickelt werden (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: NASS-Geschäftsmodelle (Lück (2022))

Geschäftsmodelle nach Produktgruppen		
Wasser	Nährstoffe	Energie
GM 1 Brauchwassernutzung in Haushalten	GM 6 Nährstoffrückgewinnung zum lokalen Einsatz	GM 8 Co-Vergärung in land-/abfallwirtschaftlichen Biogasanlagen
GM 2 Brauchwassernutzung Gewerbe	GM 7 Nährstoffrückgewinnung zum überregionalen Einsatz	GM 9 Wärmegewinnung durch Schwarzwasservergärung
GM 3 Brauchwassernutzung in der Landwirtschaft		GM 10 Stromgewinnung durch Schwarzwasservergärung
GM 4 Brauchwassernutzung für die Bewässerung von Grünflächen		GM 11 Biomethangewinnung durch Schwarzwasservergärung
GM 5 Brauchwassernutzung für Grundwasseranreicherung bzw. Niedrigwasseraufhöhung		

Zur Einschätzung des Erfolgspotenzials der NASS-Geschäftsmodelle wurden das sozio-technische System der Abwasserwirtschaft in Deutschland und die Branchenumwelten der NASS-Produkte analysiert (Lück (2022)).

Um für einen lokalen Betrachtungsraum das NASS-Geschäftsmodell mit dem höchsten Erfolgspotenzial zu identifizieren, wurde ein Entscheidungsmodell entwickelt. In diesem Modell wurden Bewertungskriterien der Branchenstrukturen der NASS-Produkte sowie der einzel- und gesamtwirtschaftlichen Effizienz der Geschäftsmodelle berücksichtigt. Bestehende Entscheidungsmodelle wurden um die Bewertung der Branchenstrukturen sowie die Nebenbedingungen zu Angebots- und Nachfragesituationen der NASS-Produkte erweitert. Damit erfolgte erstmals eine Bewertung von Abwasserinfrastrukturkonzepten aus einer marktorientierten Geschäftsmodellperspektive für Deutschland (für die jeweilig erzielbaren Ergebnisse der Bewertungsebenen siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Bewertungsebenen des Entscheidungsmodells und seine erzielbaren Ergebnisse (Lück (2022))

Unterziel	Ergebnis	Aggregation
<b>Begünstigende Makroumwelt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bewertung drückt aus, ob ein NASS-begünstigendes Makroumfeld vorliegt</li> <li>▪ Bewertung gibt an, ob ausreichend Faktoren für die Weiterverfolgung von NASS sprechen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Bewertung erfolgt über alle Produktgruppen</li> <li>→ Aggregation nicht zielführend, da K.-o.-Kriterien vorliegen können</li> </ul>
<b>Begünstigende Branchenstruktur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bewertung drückt aus, für welches Produkt die Branchenstruktur am begünstigendsten ist</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Rangfolgenbildung innerhalb Produktgruppen möglich</li> <li>→ Rangfolgenbildung für alle GM möglich, wobei innerhalb der Produktgruppen Wasser und Nährstoffe dieselben Teilnutzen eingehen</li> </ul>
<b>Einzelwirtschaftliche Effizienz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bewertung drückt aus, welches GM höchsten Kapitalwert aufweist</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Rangfolgenbildung innerhalb Produktgruppen möglich</li> <li>→ Rangfolgenbildung für alle GM möglich</li> </ul>
<b>Gesamtwirtschaftliche Effizienz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bewertung drückt aus, welches GM höchsten gesamtwirtschaftlichen Effekt aufweist</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Rangfolgenbildung nur innerhalb Produktgruppen zielführend</li> <li>→ Rangfolgenbildung für alle GM möglich, jedoch geringe Aussagekraft, da Bewertungskriterien teilweise für Produktgruppen variierend</li> </ul>

Mithin wird ein Perspektivwechsel für Entscheidungssituationen zur Implementierung von Abwasserinfrastrukturen vollzogen. Die (lokalen) Entscheider können zunächst die Branchenumwelt sowie die Angebots- und Nachfrage der generierbaren Produkte betrachten und für sie ein effizientes Geschäftsmodell in Verbindung mit der entsprechenden Infrastruktur identifizieren. Mit der Konzeptionierung in dieser Arbeit wird eine Grundlage gelegt, die das sozio-technische Regime der Abwasserwirtschaft grundlegend verändern und den Eingang von NASS als bisherige Nischeninnovation stärken kann.

## Literatur/Quellen

- Baron, Silja (2018): Transformationsstrategien für die Wasserver- und Abwasserentsorgung im ländlichen Raum. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (2014): Grundsätze für die Planung und Implementierung Neuartiger Sanitärsysteme (NASS). Unter Mitarbeit von Thomas Dockhorn, Jörg Felmeden, Thomas Hillenbrand, Inka Kaufmann-Alves, Bernd Kirschbaum, Günter Langergraber et al. Juni 2014. Hennef (Sieg): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e. V (DWA-Regelwerk, A 272).
- Dockhorn, Thomas (2007): Stoffstrommanagement und Ressourcenökonomie in der kommunalen Abwasserwirtschaft. Habilitationsschrift. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig. Institut für Siedlungswasserwirtschaft.

- DWA Arbeitsgruppe KA-1.8 (2011): Bedarf für Forschung und Entwicklung im Bereich Neuartiger Sanitärsysteme (NASS). Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KA-1.8 „F+E-Bedarf“ im Fachausschuss „Neuartige Sanitärsysteme“. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 58 (7), S. 646.
- DWA-Arbeitsgruppe KA-1.6 „Bemessungshinweise“ (2017): Neuartige Sanitärsysteme (NASS). Eine Bilanzierung von Nährstoffen, Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emission. In: *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* (12), S. 1074–1082.
- Geels, Frank W. (2011): The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. In: *Environmental Innovation and Societal Transitions* 1 (1), S. 24–40. DOI: 10.1016/j.eist.2011.02.002.
- Hoffmann, Sabine; Feldmann, Ulrike; Bach, Peter M.; Binz, Christian; Farrelly, Megan; Frantzeskaki, Niki et al. (2020): A Research Agenda for the Future of Urban Water Management: Exploring the Potential of Nongrid, Small-Grid, and Hybrid Solutions. In: *Environmental science & technology* 54 (9), S. 5312–5322. DOI: 10.1021/acs.est.9b05222.
- Köhler, Jonathan; Geels, Frank W.; Kern, Florian; Markard, Jochen; Onsongo, Elsie; Wiecek, Anna et al. (2019): An agenda for sustainability transitions research: State of the art and future directions. In: *Environmental Innovation and Societal Transitions* 31, S. 1–32. DOI: 10.1016/j.eist.2019.01.004.
- Londong, Jörg; Hartmann, Matthias (2014): Angepasste Einzelfalllösungen unter wegweisenden politischen Rahmenbedingungen statt detaillierter administrativer Vorgaben - ein Plädoyer für die Ingenieur- und Rechtskunst. In: Johannes Pinnekamp und Verena Kölling (Hg.): 47. Essener Tagung für Wasser und Abfallwirtschaft „Ist unsere Wasserwirtschaft zukunftsfähig“. 19. bis 21. März 2014 in der Messe Essen Ost. Aachen: Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V (Gewässerschutz, Wasser, Abwasser, 234), 29/1-29/14.
- Lück, Andrea (2022): Modell zur Wahl von Geschäftsmodellen für Produkte neuartiger Sanitärsysteme. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar, Weimar. Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infrastruktursysteme.
- Lüthi; Christoph.; Panasar; Arne; Schütze; Thorsten et al. (2011): Sustainable Sanitation in Cities. A framework for action. 1. Auflage. Rijswijk: Papiroz Publishing House, Niederlande.
- Markard, Jochen (2017): Sustainability Transitions: Exploring the emerging research field and its contribution to management studies. Online verfügbar unter [https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/sustainability-and-technology/PDFs/Markard\\_Theme26\\_Full\\_Paper.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/sustainability-and-technology/PDFs/Markard_Theme26_Full_Paper.pdf), zuletzt geprüft am 12.06.2019.
- Oldenburg, Martin (2007): Final cost calculation report for the demonstration project “Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater “ (SCST). Online verfügbar unter <https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/593?pgid=1>, zuletzt geprüft am 02.06.2020.
- Osterwalder, Alexander (2004): The Buisness Model Ontology. A Proposition in a Design Science Approach. Dissertation. Université der Lausanne. Sciences Politique.
- Osterwalder, Alexander; Pigneur, Yves (2013): Business model generation. A handbook for visionaries, game changers, and challengers. New York: Wiley&Sons (Strategyzer series).
- Rip, Arie; Kemp, René (1998): Technological change. In: Steve Rayner (Hg.): Human choice and climate change. Columbus, Ohio: Battelle Press, S. 327–399.
- Rost, Grit; Maier, Kirsten; Böhm, Martin; Londong, Jörg (2015): Auswirkungen eines technischen Paradigmenwechsels auf die wasserwirtschaftliche Organisation in strukturschwachen ländlichen Räumen. In: *Raumforschung und Raumordnung* 73 (5), S. 343–356.
- Starkl, Markus; Binner, Erwin; Fürhacker, Maria; Holubar, Peter; Koeck, Stefan; Lenz, Konrad et al. (2005): Nachhaltige Strategien der Abwasserentsorgung im ländlichen Raum – SUS-SAN. Hg. v. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien.

- Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, Bauhaus-Universität Weimar (2009): Neuartige Sanitärsysteme: Begriffe, Stoffströme, Behandlung von Schwarz-, Braun-, Gelb-, Grau- und Regenwasser, Stoffliche Nutzung. 1. Aufl. Kromsdorf: Bauhaus-Universitätsverlag als Imprint von VDG Weimar.
- Wittneben, Bettina B. F.; Okereke, Chukwumerije; Banerjee, Subhabrata Bobby; Levy, David L. (2012): Climate Change and the Emergence of New Organizational Landscapes. In: *Organization Studies* 33 (11), S. 1431–1450. DOI: 10.1177/0170840612464612.
- Wolf, Mario; Londong, Jörg (2022): Die Konstellationsanalyse als Instrument zur Strategieentwicklung für eine gemeinschaftliche Daseinsvorsorge. In: Jan Abt, Lutke Blecken, Stephanie Bock, Julia Diringen und Katrin Fahrenkrug (Hg.): Von Beteiligung zur Koproduktion. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (Stadtforschung aktuell), S. 43–71.
- Zangemeister, Christof (1976): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 4. Aufl. München: Wittemann.

## **Kontakt**

*Dr.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing. Andrea Lück, wissenschaftliche Mitarbeiterin*

Bauhaus-Universität Weimar, Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infrastruktursysteme

Tel.-Nr. +49 3643-584672

E-Mail: [andrea.lueck@uni-weimar.de](mailto:andrea.lueck@uni-weimar.de)

Homepage: [www.uni-weimar.de/bis](http://www.uni-weimar.de/bis)



## Comparative study of demand forecasting methods for efficient food waste reduction using real data from small and medium-sized bakeries in Germany

**Abstract:** *In order to achieve target 12.3 of the Sustainable Development Goals (SDGs), which aims to halve per capita food waste at the retail and consumer levels by 2030, introducing accurate demand forecasting in the food industry could be one approach. Forecasting models offer a solution for accurate planning. However, it is rarely investigated with real data to reduce food waste. The main objective of our study is to identify the food waste reduction potential through improved demand forecasting using historical data provided by three bakery chains in Germany. Three forecasting models, random forest (RDF), support vector machine (SVM), and autoregressive integrated moving average (ARIMA) are evaluated. The models are analyzed by forecasting different days, products, and stores in four scenarios. The forecasting models show a high potential for food reduction. The best fit forecasting model, ARIMA, achieves an average expected food reduction of 75,8% ( $\pm 10,3$ ) for the four scenarios evaluated.*

### 1 Introduction

Food waste has become a significant concern, especially after the 2030 Agenda for Sustainable Development, adopted by the United Nations (UN) in 2015. SDG number 12 aims to ensure sustainable consumption and production patterns. Specific target 12.3 aims to halve food waste by 2030 at the retail and consumer level and reduce food losses along production and supply chains (United Nations, 2015). The Food and Agriculture Organization estimates that each year, one-third of the food produced is wasted or lost worldwide (FAO, 2011). In Germany, an essential part of the diet is covered by bread and baked products; the amount consumed yearly per household is around 56 kg. According to the World Wide Fund For Nature (WWF), between 12% and 15% of the pastry produced in German bakeries is unsold, which corresponds with an estimated 1.7 million tons of food waste in the bakery sector annually.

According to a national study, the amount of food waste from German bakeries was approximately 0,69 ( $\pm 0,14$ ) million tons, and the avoidable parts reached 0,38 ( $\pm 0,07$ ) million tons (Leverenz et al., 2021). Despite technological advances, planning in some bakeries is still based on personal experience rather than software-based (Contreras-Choccata et al., 2020). Smart forecasting could be used as a tool to predict the demand for products precisely and adapt production quantities accordingly. Various forecasting models have been used in the food sector. However, there are few reports applied for demand forecasting in bakeries. (Du et al., 2013) presented promising results of demand forecasting for perishable products on daily sales data. Another study reports multivariate ARIMA to improve the prediction of the daily demand for perishable goods and fresh food (Huber et al., 2017).

## 2 Methodology

### 2.1 Data Selection

Three German bakery chains provided data about daily sales and food waste volumes during a period of eight months. The dataset contains information about a variety of products, which have been classified into different groups. Figure 1 shows the four main groups of each bakery with their corresponding returned percentages. The top sellers in all bakery chains are bun and bread. It can be observed that buns present the highest rate of returned pieces reaching 59% (bakery chain 1, B1), 78% (bakery chain 2, B2), and 74% (bakery chain 3, B3). In order to illustrate the potential of different forecasting methods, we focused our study on the group of top selling products, namely buns.

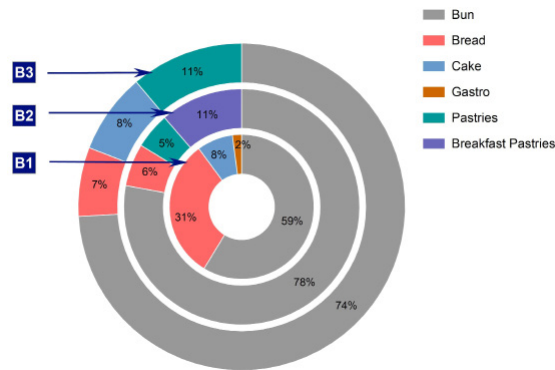


Figure 1. Percentage quantity of returns in the three bakery chains.

### 2.2 Pre-process dataset

To ensure the data quality and the forecasting results we prepared the dataset by cleaning data errors and discarding outliers. For cleaning the dataset, two assumptions were made:

- Delivered quantity needs to be  $> 0$
- $0 < \text{Sold quantity} + \text{returned quantity} \leq \text{Delivered quantity}$

Outliers were removed using the Grubbs test tool in the statistical software XLSTAT (Addinsoft, 2021).

### 2.3 Descriptive analysis

In order to predict the demand for a store according to the article and day of the week, we clustered the datasets into groups of the same category, namely store, product, and day-wise format. It is essential to make a descriptive analysis to verify the dependency between variables, trends, and seasonality of the data. Therefore, we used correlation/association tests in XLSTAT.

## 2.4 Comparison forecasting models

We used the data to conduct predictions using models available on the XLSTAT program, such as ARIMA, SVM, and RDF. We compare the predictive quality of the forecasting models within four scenarios:

- Different types of stores for bakery chain 1.
- Different days for bakery chain 2.
- Different articles for bakery chain 3.
- Same article in a random store for the three bakery chains.

## 2.5 Performance evaluation

In order to evaluate and compare the predictive performance of the forecasting methods, error indicators and expected food waste reduction will be used. Model accuracy measures include mean absolute error (MAE), and mean absolute percentage error (MAPE). The accuracy of the model can be considered good or acceptable when the MAPE value stays below 5% (Ahram et al., 2020). Another study shows a high forecasting ability when this value stays below 10% (El Kafazi et al., 2016). Hence, we aim to achieve a predictive performance that reaches a maximum MAPE of 10%.

# 3 Results

## 3.1 Descriptive analysis

The analysis of four scenarios in the three bakery chains showed that all models provided significantly better predictive performance compared to the current demand forecasting of the bakeries, which is mainly based on their business experience. The forecasting models tested with our dataset achieved an expected food waste reduction of 37% to 89%. Figure 2 shows the performance of the forecasting models for the best case in each scenario (Store in shop for bakery chain 1, Saturday for bakery chain 2, split bun for bakery chain 3, and bakery chain 1 evaluated for Wednesday and cheese bun for the last scenario). The plot shows the delivered quantity, i.e., the number of pieces supplied to the store for sale; the actual demand, i.e., the sold quantity during the evaluated day, and the forecasting quantity for the different models. The blue and red areas in the plot represent the reduction potential of food waste, which corresponds to the difference between the delivered and forecasted amount. The red area also represents insufficient forecasting demand, which means there is an underestimation during these observations. The green area represents sufficient forecasting demand. The graphic shows the potential of all the forecasting models to prevent food waste with a pre-processing of the dataset.

The indicators established for assessing the performance of the models are shown in Table 1. The percentages for the best scenarios range between 77% and 89%. The error indicator, MAPE, stays below 10 in most cases, which matches what has been reported in the literature to be considered an adequate forecasting model. The model which presents better results for the different scenarios analyzed is ARIMA. Our results provide new insights regarding the potential of demand forecasting to reduce food waste in small and medium-sized bakeries, preventing potential avoidable food waste and therefore contributing to meeting target 12.3 of the SDGs.

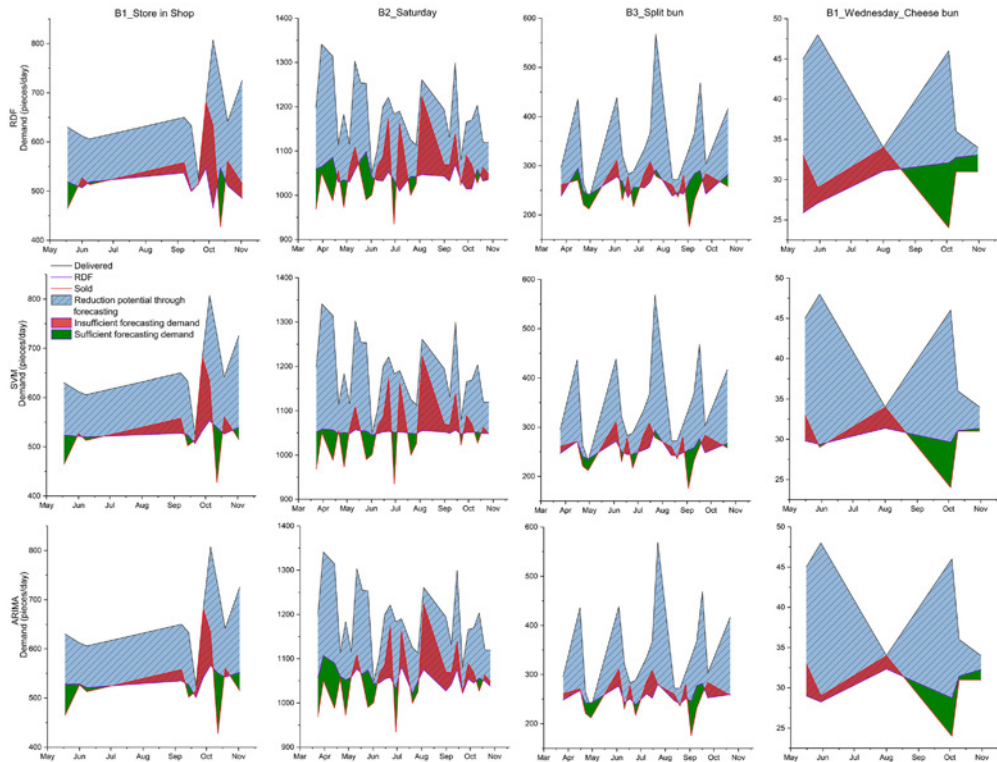


Figure 2. Performance of the three forecasting models for the best case in each scenario.

Table 1. Expected food waste reduction and error indicators for the best case in each scenario.

Model/ Indicator	RDF	SVM	ARIMA	RDF	SVM	ARIMA	RDF	SVM	ARIMA	RDF	SVM	ARIMA
Scenario	B1_Store in Shop			B2_Saturday			B3_Split bun			B1_Wed_Cheese bun		
MAE [pieces/day]	55,3	48,5	47,3	59,3	48,3	48,0	34,4	26,3	24,5	4,0	2,1	2,2
MAPE [%]	10,0	8,9	8,9	5,6	4,5	4,5	14,2	10,8	10,1	13,9	7,3	7,5
Expected food waste reduction [%]	86,4	83,2	80,7	81,4	83,1	81,4	77,6	85,6	86,4	80,4	89,5	89,4

## References

- Addinsoft. XLSTAT: Statistical and data analysis solution; 2021.
- Ahram T, Karwowski W, Vergnano A, Leali F, Taiar R, editors. Intelligent Human Systems Integration 2020. Cham: Springer International Publishing; 2020.
- Contreras-Chocata D, Sotelo-Raffo J, Raymundo-Ibañez C, Rivera L. Demand Management Model Based on Quantitative Forecasting Methods and Continuous Improvement to Increase Production Planning Efficiencies of SMEs Bakeries. In: Ahram T, Karwowski W, Vergnano A, Leali F, Taiar R, editors. Intelligent Human Systems Integration 2020. Cham: Springer International Publishing; 2020. p. 760–765.
- Du XF, Leung SC, Zhang JL, Lai KK. Demand forecasting of perishable farm products using support vector machine. *International Journal of Systems Science* 2013;44(3):556–67. <https://doi.org/10.1080/00207721.2011.617888>.
- El Kafazi I, Bannari R, Abouabdellah A. Modeling and forecasting energy demand. In: 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC); 14/11/2016 - 17/11/2016: Marrakech: IEEE; 2016.
- FAO. Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention, 2011. <https://www.fao.org/3/i2697e/i2697e.pdf>.
- Huber, Jakob; Gossmann, Alexander; Stuckenschmidt, Heiner (2017): Cluster-based hierarchical demand forecasting for perishable goods. In *Expert Systems with Applications* 76, pp. 140–151. DOI: 10.1016/j.eswa.2017.01.022.
- Leverenz D, Schneider F, Schmidt T, Hafner G, Nevárez Z, Kranert M. Food Waste Generation in Germany in the Scope of European Legal Requirements for Monitoring and Reporting. *Sustainability* 2021;13(12):6616. <https://doi.org/10.3390/su13126616>.
- United Nations. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development: A/RES/70/1; 2015.

## Contact

*Cinthyä Lara, M.Sc., Research assistant*

Institute for Sanitary Engineering, Water Quality, and Solid Waste  
Tel.-Nr. +49-711/685 65456

E-Mail: [cinthya.lara@iswa.uni-stuttgart.de](mailto:cinthya.lara@iswa.uni-stuttgart.de)

Homepage: <https://www.iswa.uni-stuttgart.de/afw/team/>



# TEIL 6

## Bio

Leitung:

Prof. Dr. Michael Nelles





## Investigation of in-situ hydrogen biomethanation of food waste

**Abstract:** *The process of anaerobic fermentation is a promising alternative to conventional energy production from fossil fuels such as natural gas and crude oil. Recovered biogas from anaerobic digestion shall be upgraded in order to achieve high-quality substitute natural gas (SNG) for further injection into natural gas grid. One of the possible technologies could be an in-situ biomethanation by reducing internally produced  $\text{CO}_2$  in biogas digesters into  $\text{CH}_4$  via injecting externally derived  $\text{H}_2$ . In this paper, two lab-scale continuous stirred-tank reactors (CSTR) processing food waste were investigated at the loading rate of  $1.5 \text{ gVS L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ .  $\text{H}_2$  was injected in one of the CSTR to examine the influence of the stoichiometric hydrogen volume and the injection frequency, while another CSTR was set without  $\text{H}_2$  addition. Hydrogen was injected in a ratio of 1:1 and 4:1 to the amount of  $\text{CO}_2$  produced in the steady state. The methane concentration increased with increasing hydrogen volume and with multiple additions per day. With fully stoichiometric addition of hydrogen and multiple injections per day, it was possible to enhance the methane concentration by 34.5 % to a maximum value of 75.8 %.*

### 1 Introduction

The power-to-gas concept aims to use renewable or surplus energy to provide gaseous energy for the provision of gaseous, storable energy carriers. Obtained by water electrolysis hydrogen is the core element of this method.  $\text{H}_2$  can either be used directly as an energy carrier or in various processes to produce other energy carriers (Wulf, Linßen, & Zapp, 2018). Biomethanation is a biological method for biogas upgrading utilizing exogenous  $\text{H}_2$ . The biological reduction of the carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) contained in the biogas to methane ( $\text{CH}_4$ ) is carried out by hydrogenotrophic, methanogenic archaea according to the Sabatier reaction. The reaction results in a higher  $\text{CH}_4$  content in the biogas and thus increases its calorific value. Compared to regular biogas production, the biogas can reach the quality of natural gas through biomethanation and can thus be supplied to the public gas grid (Voelklein, Rusmanis, & Murphy, 2019).

The aim of this study is to obtain initial insight into the operation of lab scale CSTRs processing food waste as a substrate while implementing in-situ hydrogen biomethanation. The amount of  $\text{H}_2$  and the frequency of injection are to be varied.

## 2 Materials and methods

### 2.1 Substrate and inoculum characterization

Due to the reason that food waste is a subject to a large variation (regional and seasonal differences) in composition, a synthetic food waste (SFW) was used as a representative substrate with same characteristics. The fractions and it's proportions are based on the composition of food waste in average household according to (Zhang, Torrella, Banks, & Heaven, 2019) and can be found in Table 1.

Table 1. SFW composition (wet basis for each food waste fraction)

Fraction	Total (%)	Sub-fraction			
Vegetables & Fruits	40.50	Potatoes 19.24	Apples 11.65	Tomatoes 4.84	Lettuce 4.77
Bakery	18.10	Bread 13.84	Flour 4.26		
Ready meal	14.10	Pasta 9.26	Pizza 4.84		
Dairy	12.10	Yoghurt 8.23	Mayonnaise 2.06	Cheddar 1.81	
Dry food	8.50	Chips 3.71	Chocolate 1.80	Cereal 1.55	Eggs 1.44
Meat & Fish	6.70	Burger 3.91	Chicken 1.66	Fish 1.13	

The more detailed procedure for substrate preparation is described by (Kosheleva et al., 2023). The SFW characterized in terms of TS (total solids), VS (volatile solids), pH, TOC (total organic carbon), TKN (total Kjeldahl nitrogen) as well as elementary and organic compounds analysis.

An anaerobic sludge from a wastewater treatment plant (Hamburg-Köhlbrandhöft, Germany) was used as inoculum source. Before the start of the experiment, it was degased for at least 7 days at 37 °C and sieved with 2 mm mesh to ensure that the inoculation culture in the reactor was free of coarse solids. Then it was characterized for TS, VS, pH, VOA/TIC (ratio of volatile organic acids to total inorganic carbonate).

### 2.2 Semi-continuous test

Two parallel lab-scale CSTRs with a working volume of 1.6 L were used for the scope of this study: one (R1) with hydrogen addition and another one (R2) without. R2 had a feeding inlet as well as liquid sample outlet pipes and a septum for the gas sample analysis. The reactor was equipped with a Ritter MilliGascounter (MGC-1, RITTER Apparatebau, Germany) for off-gas volume measurement. In addition to the above-described set-up, R1 was supplied with a hydrogen control flowmeter and a continuous pH and temperature measurement. Both reactors were connected to the nitrogen gasbags to ensure the anaerobic conditions and pressure balance.

An overview of the reactors operation and the varied parameters is shown in Table 2.

Table 2. Experimental procedure for the reactors

Reactor	Time [d]	Name of the phase	OLR [gVS / L d]	Stirrer speed [rpm]	H <sub>2</sub> Injection [mL/d]	Injection frequency
R1	1-7	I Enrichment	-	250	180	1 x day
	8-17	II Steady state	1.5	250	0	-
	18-25	III 1:1	1.5	250	369	1 x day
	26-32	IV 1:1 (,pulse')	1.5	250	369	4 x day
	33-39	V 4:1	1.5	250	1475	1 x day
	40-47	VI 4:1 (,pulse')	1.5	250	1475	4 x day
R2	1-47	-	1.5	250	0	-

In R1, enrichment took place during the first week of reactor operation. The injection of H<sub>2</sub> activated the methanogenic metabolic pathway. The selected H<sub>2</sub> volume was based on the experiments of (Jiang et al., 2021). At this point, no substrate was added. However, 228 mL of the medium was removed daily and replaced by fresh inoculum in order to increase the buffer capacity of the medium and to maintain the high concentration of active microorganisms. The enrichment phase was followed by the phase I, in which substrate addition started. When a constant biogas production was achieved, the H<sub>2</sub> supply was initially started at a ratio of 1:1, corresponding to the amount of CO<sub>2</sub> formed. After varying the injection frequency at this feed ratio, the H<sub>2</sub> feed was increased to a fully stoichiometric feed ratio and the influence of the varied injection frequency is also observed under these conditions.

In order to monitor the effect of varying the methanation parameters, the gas composition in the headspace of the reactors was analyzed daily by means of gas chromatography system (Hewlett-Packard 6890, Agilent). The FOS/TAC ratio, the ammonium concentration, the COD (chemical oxygen demand) and the concentration of VFAs (volatile fatty acids) were also analyzed at intervals using HPLC. The detailed description of all analytical methods performed during this study can be found in (Kosheleva et al., 2023).

### 3 Results and Discussion

#### 3.1 Substrate and inoculum characterization

Table 3 reports the results of the characterization of SFW and inoculum.

Table 3. Substrate characterisation

Sample/ Parameter	TS, %	VS, % TS	TOC, %	TKN, mg/g	C/N	pH	VOA, mg/L	TAC, mg/L	VOA/TAC
SFW	98.97	96.78	42.82	25.46	16.82	5.10			
Inoculum	2.95	62.70				7.72	1120	6968	0.16
	C, %	H, %	O, %	N, %	S, %	Lipids, %	Proteins, %	Carbohydrates, %	
SFW	48.00	7.60	38.00	2.70	0.20	10.45	16.13	58.70	

### 3.2 Semi-continuous test

Figure 1 depicts the concentrations of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2$  in the biogas over time. In addition, the hydrogen volume added on the respective days is plotted on the secondary axis. Until the steady state (phase III) has been reached the  $\text{CH}_4$  concentration is a subject to the fluctuations due to gas evolution from the inoculum in the enrichment phase and start of substrate addition in the II phase. Up the beginning of the third phase and  $\text{H}_2$  injection,  $\text{CH}_4$  content reaches  $56.17 \pm 0.43\%$  and  $\text{CO}_2$   $43.83 \pm 0.43\%$ , respectively. With the start of  $\text{H}_2$  supply  $\text{CH}_4$  concentration increases in average by  $5.00\%$  to  $58.97 \pm 0.65\%$  (phase III) and with the start of pulse  $\text{H}_2$  addition in average by  $7.50\%$  to  $60.37 \pm 0.74\%$  (phase IV). With the beginning of phase V, a rapid increase in the  $\text{CH}_4$  concentration becomes noticeable, the  $\text{CH}_4$  content rises to  $71.42 \pm 1.49\%$ , which is an average increase of  $27.15\%$  with respect to the concentration before methanation. The variation of the injection frequency caused a renewed increase in the concentration of  $\text{CH}_4$  to  $74.49 \pm 0.94\%$ . The highest  $\text{CH}_4$  content determined was  $75.80\%$ .

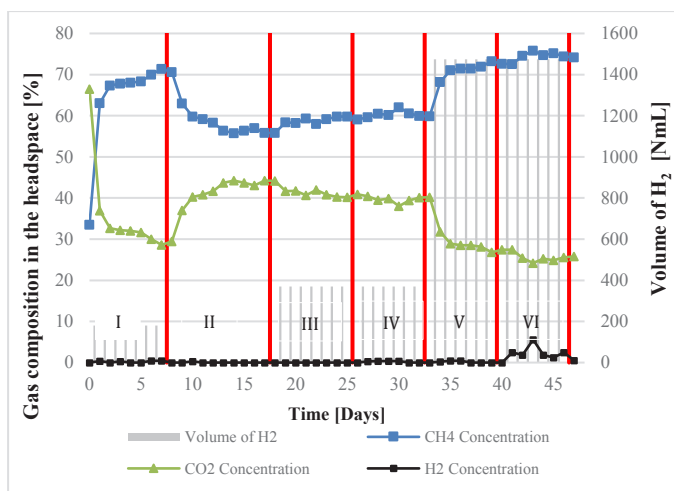


Figure 1. Composition of biogas in relation to amount of  $\text{H}_2$  added in different phases (R1)

Figure 2 shows the daily  $\text{CH}_4$  production in the various phases of the process as a function of the reaction time. As the  $\text{CH}_4$  concentration increases, so do the daily  $\text{CH}_4$  production rates.

The increase in the  $\text{CH}_4$  concentration and  $\text{CH}_4$  production rates due to the variation of the stoichiometric feed ratio can be explained not only by the associated higher  $\text{H}_2$  quantity, but also by a longer residence time of the hydrogen in the reaction medium and the headspace. This means that the system not only has more  $\text{H}_2$  available for methanation, but that this state is also maintained over a longer period of time.

The reference reactor (R2) was operated without hydrogen addition. The average  $\text{CH}_4$  content and daily production rate in the steady state reaches  $56.36 \pm 0.53\%$  and  $344.08 \pm 26.60 \text{ NmL L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , respectively.

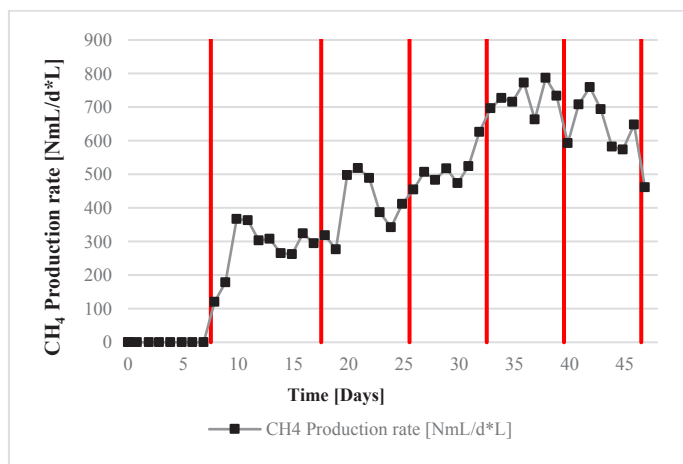


Figure 2. Daily CH<sub>4</sub> production of R1

## 4 Conclusion

The results presented in this study demonstrate the increase in the CH<sub>4</sub> content through methanation with H<sub>2</sub> and food waste as substrate. The best results are achieved with the full-stoichiometric ratio of H<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>. The highest methane concentration detected is 75.80 %, which is 34.50 % higher than the average concentration without methanation, under identical reaction conditions. Furthermore, it can be demonstrated that with a pulse injection of H<sub>2</sub>, a significant improvement in the mass transport limitation can be achieved. The results also reveal that the full-stoichiometric addition of H<sub>2</sub> causes an overproportional increase in concentration compared to the lower input ratio.

## References

- Jiang, H.; Wu, F.; Wang, Y.; Feng, L.; Zhou, H., & Li, Y. (2021): Characteristics of in-situ hydrogen biomethanation at mesophilic and thermophilic temperatures. *Bioresource technology*, 337, 125455.
- Kosheleva, A.; Gadaleta, G.; Gisi, S. de; Heerenklage, J.; Picuno, C.; Notarnicola, M., et al. (2023): Co-digestion of food waste and cellulose-based bioplastic: From batch to semi-continuous scale investigation. *Waste management (New York, N.Y.)*, 156, 272–281.
- 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.
- Wulf, C.; Linßen, J.; & Zapp, P. (2018): Review of Power-to-Gas Projects in Europe. *Energy Procedia*, 155, 367–378.
- Zhang, W.; Torrella, F.; Banks, C. J., & Heaven, S. (2019): Data related to anaerobic digestion of bioplastics: Images and properties of digested bioplastics and digestate, synthetic food waste recipe and packaging information. *Data in brief*, 25, 103990.

## **Kontakt**

*M.Sc. Arina Kosheleva, wissenschaftliche Mitarbeiterin*

Technische Universität Hamburg (TUHH) / Institute of Circular Resource Engineering and Management (CREM)

Tel.-Nr. +49/40/42878-4046

E-Mail: [arina.kosheleva@tuhh.de](mailto:arina.kosheleva@tuhh.de)

## Adsorption of dissolved organic materials from biotreated landfill leachate onto biochars

**Abstract:** Four types of wood biochar, including raw biochar (RB), HB (H<sub>2</sub>O activated), CB (CO<sub>2</sub> activated), and PB (pyrolytic biochar) were produced with different activation methods and applied to remove dissolved organic material (DOM) from the effluent of a deammonification plant. Different analytical techniques were applied to study the adsorption behavior of different fractions of the DOM. CB and HB had the highest performance in COD removal, whereas RB had the worst performance. Results also revealed that the adsorption of organic compounds onto biochars was in correlation with biochar production techniques. However, biochar activation methods did not impact their performance in DOM removal. This study promotes the application of gasification biochars in treatment of bio-treated landfill leachate.

### 1 Introduction

With the development of industry, agriculture, and living standards, more pollutants are released into the water bodies, threatening public health and the environment (Goswami et al., 2019). Having considerable amounts of pollutants, landfill leachate and anaerobic digestate are a primary source of pollution, which can cause severe negative impacts on the public health and environment if disposed of improperly (Lamolinara et al., 2022; Renou et al., 2008). To tackle these pollutants, different wastewater treatment technologies are of foremost importance.

Adsorption can be considered one of the simplest, most reliable, economical, and efficient methods among conventional wastewater treatment technologies for refractory compounds (Li et al., 2020; Liu et al., 2021). Recently, biochar (BC) as an adsorbent with low production costs has drawn significant attention.

Previous studies have showed that biochar can effectively adsorb DOM from wastewater (Ahmed et al., 2018). However, the hydrophobicity of biochar affects the adsorption efficiency of hydrophilic DOM removal (Peng et al., 2017; Teixidó et al., 2011), while hydrophilic substances account for a large proportion of DOM in wastewater originated from landfill leachate. Therefore, targeted modification is a must.

BCs have been widely used to remove various organic pollutants from wastewater (Liu et al., 2020; Mian & Liu, 2020; Shi et al., 2020; Shimabuku et al., 2017). While the effects of BC on the removal of specific organic contaminants from wastewater have been partially addressed in these studies, there is little knowledge on the impacts of BCs on the reduction of different fractions of dissolved organic matter (DOM) from wastewater. Furthermore, little information about the effects of activation methods of biochars (BCs) on removing DOM fractions from wastewater and possible underlying mechanisms can be found. Although using

various BCs proved to significantly impact the removal of organic pollutants, the effects of the BCs derived from wood on the removal of DOM fractions have also not been addressed.

Considering this, the target of this study was to study the adsorption of DOM using biochars produced with different techniques.

## **2 Material and Methods**

### **2.1 Wastewater Source and Characteristics**

The wastewater was taken from the effluent of the deammonification plant at the wastewater treatment plant "Unteres Wipptal" in the district Innsbruck-Land, located 15 km south of Innsbruck, Tyrol, Austria. The deammonification plant is fed by a wastewater combination of landfill leachate and anaerobic digestate produced on-site in the same wastewater plant.

### **2.2 Biochar Production**

Four differently produced BCs were used in the adsorption experiments. Pristine biochar originated from a gasification plant using a floating fixed bed reactor (Huber et al., 2016) developed by SynCraft® and operated by the IKB, Innsbruck. RB was collected on March 16<sup>th</sup>, 2021, at operating conditions of 836.3 °C. The biochar was first dried in an oven at 105 °C for 24 h and subsequently cooled to room temperature in a desiccator. The biochar was screened using a 2 mm sieve. The coarse fraction was ground with a planetary ball mill at 400 rpm for 10 min, with intermittent changes in milling direction in 1-minute intervals. Afterward, the ground and fine samples were mixed and stored hermetically.

To produce the CO<sub>2</sub> (CB) and H<sub>2</sub>O (HB) activated biochars, pristine biochar was used as the precursor. Both biochars were produced using a laboratory-scale fluidized bed reactor through activation using CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O gases, according to the method described in detail in (Gurtner, 2021).

PB was originated from waste wood of a municipal resource and was produced according to the method mentioned in (Bosch et al., 2022).

## **3 Results and Discussion**

COD measurements show that the biochar activation methods and characterizations significantly impacted the COD removal from the wastewater. While RB had the worst performance in COD removal with roughly 48% of the removal efficiency at 7 g/L of the biochar, HB and CB with nearly 78% of the COD reduction had the highest removal efficiencies. In the lower biochar concentrations up to 2 g/L, the HB had the most reduction in COD value with around 48% removal. For the similar biochar concentrations, COD removal efficiencies for PB and CB were 41% and 40%, respectively. By gradually increasing the biochar concentrations up to 7 g/L, RB preserved its least performance for the removal of COD from the wastewater, while activated gasification biochars exhibited the best efficiency in the removal of the COD. The behavior of PB was in the middle of the RB, CB, and HB, despite having a high surface area.



Biochar surface area and porosity exert a substantial impact on biochar applications. Biochar sorption capability is highly correlated with surface area and porosity. Markedly, the adsorption of different compounds requires different pore size distributions due to the different accessibility caused by the distinctive kinetic diameters of the adsorbate. RB, HB and CB had a high share of mesopores whereas PB was mainly consisted of micropores.

## Reference

- Ahmed, M.B., Johir, M.A.H., Khourshed, C., Zhou, J.L., Ngo, H.H., Nghiem, D.L., Moni, M., Sun, L. 2018. Sorptive removal of dissolved organic matter in biologically-treated effluent by functionalized biochar and carbon nanotubes: importance of sorbent functionality. *Bioresource technology*, **269**, 9-17.
- Bosch, D., Back, J.O., Gurtner, D., Giberti, S., Hofmann, A., Bockreis, A. 2022. Alternative feedstock for the production of activated carbon with ZnCl<sub>2</sub>: Forestry residue biomass and waste wood. *Carbon Resources Conversion*, **5**(4), 299-309.
- Goswami, L., Kumar, R.V., Pakshirajan, K., Pugazhenth, G. 2019. A novel integrated biodegradation—microfiltration system for sustainable wastewater treatment and energy recovery. *Journal of hazardous materials*, **365**, 707-715.
- Gurtner, D. 2021. Thermochemical activation optimization for high porous powdered carbon production from gasification residues. in: *Environmental, Process and Energy Engineering, Vol. Master, MCI*, The Entrepreneurial University. Innsbruck.
- Huber, M., Huemer, M., Hofmann, A., Dumfort, S. 2016. Floating-fixed-bed-gasification: From Vision to Reality. *Energy Procedia*, **93**, 120-124.
- Lamolinara, B., Pérez-Martínez, A., Guardado-Yordi, E., Fiallos, C.G., Diéguez-Santana, K., Ruiz-Mercado, G.J. 2022. Anaerobic digestate management, environmental impacts, and techno-economic challenges. *Waste Management*, **140**, 14-30.
- Li, X., Wu, L., Lu, S., Yang, H., Xie, W., Zhao, H., Zhang, Y., Cao, X., Tang, G., Li, H. 2020. Treatment of cooling tower blowdown water by using adsorption-electrocatalytic oxidation: Technical performance, toxicity assessment and economic evaluation. *Separation and Purification Technology*, **252**, 117484.
- Liu, H., Liu, Y., Tang, L., Wang, J., Yu, J., Zhang, H., Yu, M., Zou, J., Xie, Q. 2020. Egg shell biochar-based green catalysts for the removal of organic pollutants by activating persulfate. *Science of The Total Environment*, **745**, 141095.
- Liu, Y., Sun, Y., Wan, Z., Jing, F., Li, Z., Chen, J., Tsang, D.C. 2021. Tailored design of food waste hydrochar for efficient adsorption and catalytic degradation of refractory organic contaminant. *Journal of Cleaner Production*, **310**, 127482.
- Mian, M.M., Liu, G. 2020. Activation of peroxymonosulfate by chemically modified sludge biochar for the removal of organic pollutants: Understanding the role of active sites and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, **392**, 123681.
- Peng, H., Zhang, D., Pan, B., Peng, J. 2017. Contribution of hydrophobic effect to the sorption of phenanthrene, 9-phenanthrol and 9, 10-phenanthrenequinone on carbon nanotubes. *Chemosphere*, **168**, 739-747.
- Renou, S., Givaudan, J., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P. 2008. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of hazardous materials*, **150**(3), 468-493.
- Shi, Y., Hu, H., Ren, H. 2020. Dissolved organic matter (DOM) removal from biotreated coking wastewater by chitosan-modified biochar: Adsorption fractions and mechanisms. *Bioresource technology*, **297**, 122281.

Shimabuku, K.K., Paige, J.M., Luna-Aguero, M., Summers, R.S. 2017. Simplified modeling of organic contaminant adsorption by activated carbon and biochar in the presence of dissolved organic matter and other competing adsorbates. *Environmental Science & Technology*, **51**(17), 10031-10040.

Teixidó, M., Pignatello, J.J., Beltrán, J.L., Granados, M., Peccia, J. 2011. Speciation of the ionizable antibiotic sulfamethazine on black carbon (biochar). *Environmental science & technology*, **45**(23), 10020-10027.

## Contact

Tayyeb Zeirani Nav (PhD Student)

University of Innsbruck

E-Mail: t.zeirany@gmail.com

## Von Abfallbiomasse zum Biokraftstoff – geeignete Katalysatoren für eine direkte Biogasmethanisierung

**Abstract:** *Biogas ist mit seinem hohen Gehalt an  $\text{CO}_2$  ein idealer Einsatzstoff für die katalytische Methanisierung. Mit einem geeigneten Katalysator und Wasserstoff lässt sich das Biogas ohne vorherige Separation des  $\text{CO}_2$  vom  $\text{CH}_4$  fast vollständig zu Methan umwandeln. In Vorversuchen für eine Pilotanlage wurden geeignete Betriebsparameter für sechs Katalysatoren aus Ni oder Ru auf  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oder  $\text{CeO}_2$  bestimmt und anschließend in Langzeitversuchen validiert. Durch einen Stresstest mit dem Katalysatorgift  $\text{H}_2\text{S}$  wird außerdem die Schwefelresistenz zwischen den Katalysatoren verglichen. So lassen sich Unterschiede im Vergleich der Katalysatoren finden, die insbesondere auf das Trägermaterial, aber auch auf die Beladung der aktiven Metallkomponente zurückzuführen sind. Dadurch wird deutlich, welche Katalysatoren besser für eine direkte Biogasmethanisierung geeignet sind als andere.*

### 1 Einleitung

Die Verwertung ungenutzter biogener Abfall- und Reststoffe aus dem städtischen oder ländlichen Raum (z. B. Bioabfall oder Stroh) kann zur Produktion von erneuerbarem Kraftstoff und damit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor beitragen. Im Projekt *Pilot-SBG* wird eine mögliche Prozesskette für dieses Ziel untersucht und als Forschungsanlage im Pilotmaßstab aufgebaut. Das produzierte Biogas besteht hauptsächlich aus Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ). Nach einer Abtrennung von katalysatorschädigenden Bestandteilen wie Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) wird dem Biogas Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) beigemischt, der mit dem vorhandenen  $\text{CO}_2$  zu  $\text{CH}_4$  reagiert. So wird der Methangehalt im Produktgas erhöht und es kann nach einer weiteren Aufreinigung als fortschrittlicher Kraftstoff verwendet werden (mehr Infos unter <https://www.dbfz.de/projektseiten/pilot-sbg/start>).

Durch die Nutzung von Biogas als Kohlenstoffquelle für die Methanisierung ergeben sich zwei besondere Fragestellungen für Katalysatoren: Welchen Einfluss hat der hohe Gehalt an  $\text{CH}_4$  im Eduktgas auf den erreichbaren Umsatz und wie kann die Toleranz von Katalysatoren gegenüber schwefelhaltigen Molekülen, die nicht vollständig aus dem Gas entfernt werden können, gesteigert werden (Nieß et al. 2022)? Kommerzielle Methanisierungskatalysatoren bestehen meistens aus einem aktiven Metall, das fein verteilt auf einem oxidischen Trägermaterial vorliegt. Ruthenium (Ru) gilt als das aktivste Metall für die Methanisierung, jedoch hat das Edelmetall einen hohen Preis. Kostengünstiger ist Nickel (Ni), das die höchste Selektivität für Methan aufweist und außerdem auch eine hohe Aktivität für die Methanisierung besitzt (Rönsch et al. 2016).

Das Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe von Vorversuchen im Labormaßstab einen geeigneten Katalysator für den späteren Pilotbetrieb auszuwählen. Für den Pilotbetrieb ist es wichtig, dass der Katalysator eine hohe Standzeit aufweist, möglichst tolerant gegenüber schwefelhaltigen Verunreinigungen ist und ein Produktgas erzeugt, das nach einer Abtrennung des unreaktierten  $\text{CO}_2$  den Kraftstoffanforderungen entsprechend DIN EN 16723-2 entspricht.

## 2 Methodik

Die Vorversuche im Labormaßstab werden in einem adiabaten Festbett-Rohrreaktor durchgeführt. Die sechs untersuchten Katalysatoren bestehen aus Ni oder Ru geträgert auf  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oder  $\text{CeO}_2$ . Bei der Benennung der Katalysatoren steht die Zahl im Namen für die Konzentration des aktiven Metalls auf dem Trägermaterial. Bei  $\text{Ni}20/\text{Al}_2\text{O}_3$  sind beispielsweise 20 Ma.-% Ni auf  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vorhanden.

Vor der Synthesereaktion werden die Katalysatoren mit 50/50  $\text{H}_2/\text{N}_2$  über Nacht aktiviert. Die Eingangsgaszusammensetzung für die Methanisierungsversuche im Labormaßstab entspricht einem Biogas mit variabler Wasserstoffbeimischung, bei dem das entstehende Produktgas mit Faktor 4 rezirkuliert wurde. Die Rückführung des Produktgases dient der Verdünnung und Hot-Spot Vermeidung im Katalysatorbett. Das Eingangsgas weist dementsprechend einen hohen  $\text{CH}_4$ -Gehalt von 81 - 83 Vol.-% auf. Das entstehende Produktgas wurde alle 4 Minuten mit einem GC-WLD analysiert, das neben Kohlenwasserstoffen,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ , CO und  $\text{O}_2$  auch  $\text{H}_2\text{S}$  detektieren kann.

### 2.1 Statistische Versuchsplanung zum Erreichen der Kraftstoffanforderungen

In Vorversuchen wurde für jeden Katalysator eine Temperaturrampe aufgenommen, um den Temperaturbereich zu definieren, in dem der Katalysator am aktivsten ist. Zwei weitere Betriebsparameter, die im Pilotbetrieb variabel sein werden, sind die Raumgeschwindigkeit (GHSV) und das  $\text{H}_2/\text{CO}_2$ -Verhältnis. In den Laborvorversuchen werden diese drei voneinander unabhängigen Variablen als Faktoren für die statistische Versuchsplanung verwendet. Ziel der statistischen Versuchsplanung ist es, für jeden untersuchten Katalysator eine geeignete Kombination aus diesen drei Faktoren zu finden, durch die die folgenden Zielforderungen erreicht werden: die Konzentration von  $\text{H}_2$  soll unter 2 Vol.-% liegen,  $\text{CH}_4$  soll möglichst hoch und  $\text{CO}_2$  möglichst niedrig sein.

Für die drei Parameter wurden jeweils ein Minimum (min) und Maximum (max) definiert. Diese liegen bei  $1776 \text{ h}^{-1}$  und  $5327 \text{ h}^{-1}$  für die GHSV, bei 2,9 und 4,7 für das  $\text{H}_2/\text{CO}_2$ -Verhältnis und bei  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  für die Temperatur (T) mit Ausnahme von  $\text{Ru}0,3/\text{Al}_2\text{O}_3$  mit  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der Versuchsplan setzt sich aus den in Abbildung 1 dargestellten Kombinationen der drei Faktoren zusammen und beinhaltet einen Zentrums- sowie Flächenmittelpunkte des aufgespannten Würfels. Alle Versuchspunkte wurden zweifach, der Zentrums- und Flächenmittelpunkte vierfach, in randomisierter Reihenfolge nacheinander am gleichen Katalysator untersucht. Anhand der Ergebnisse wurde per Software zur statistischen Versuchsauswertung (*Design Expert*) das Optimum für die Kombination der drei Parameter ermittelt. Für den Versuch mit  $\text{Ru}0,3/\text{Al}_2\text{O}_3$  wurde nur ein reduzierter Versuchsplan ohne die Flächenmittelpunkte aus Abbildung 1 untersucht.

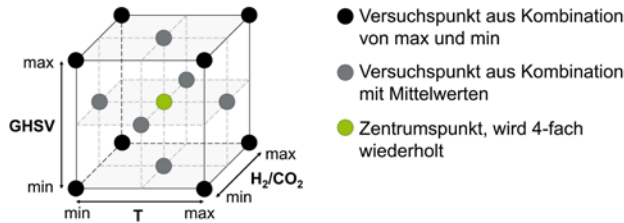


Abbildung 1: Allgemeine Darstellung der Versuchspunkte für die Vorversuche, die sich aus verschiedenen Kombinationen der zwei Level und deren Mittelwerte von T, GHSV und  $H_2/CO_2$ -Verhältnis ergeben.

## 2.2 Gezielte Katalysatorvergiftung durch $H_2S$ -Zugabe

Die Ergebnisse aus der statistischen Versuchsplanung werden in dieser zweiten Versuchsreihe durch Langzeitversuche validiert. Dafür wird nach der Katalysatoraktivierung das rechnerisch ermittelte Optimum und anschließend das experimentell ermittelte Optimum für die Kombination von T, GHSV und  $H_2/CO_2$ -Verhältnis angefahren. Die Kombination, die zu einer  $H_2$ -Konzentration von  $< 2$  Vol.-% im Produktgas sowie einer höheren  $CH_4$  Konzentration führt, wird für den Langzeitversuch ausgewählt, der ca. 70 h andauert und Erkenntnisse über die Stabilität des Katalysators und der Reaktion ohne  $H_2S$ -Zugabe liefert. Direkt im Anschluss wird die gezielte Vergiftung mit 500 ppm  $H_2S$  begonnen.

Ziel der Vergiftungsversuche ist es, die Katalysatoren auf ihre Eignung für einen Biogasstrom zu testen und ihre erreichten Standzeiten miteinander zu vergleichen. Die Vergiftung kann durch den sinkenden Umsatz und durch die Detektion von  $H_2S$  im Produktgas über die Zeit verfolgt werden. Zur Ableitung der Standzeit mit anderen  $H_2S$  Konzentrationen im Eingangsgas werden die Versuche für bestimmte Katalysatoren bei 250 ppm  $H_2S$  wiederholt.

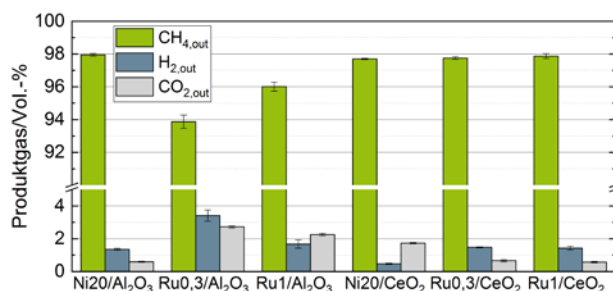
## 3 Ergebnisse

### 3.1 Ermittelte Versuchsparameter zum Erreichen der Kraftstoffanforderungen

Die experimentell ermittelten Kombinationen aus T, GHSV und  $H_2/CO_2$ , die für die jeweiligen Katalysatoren die besten Produktgase erzielen, sind in Tabelle 1 dargestellt. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, erfüllen fünf der sechs Katalysatoren die Bedingungen an das Produktgas zur weiteren Nutzung als Kraftstoff (hohe  $CH_4$ - und niedrige  $CO_2$ -Konzentration,  $H_2$ -Konzentration  $< 2$  Vol.-%). Nur bei  $Ru_{0,3}/Al_2O_3$  wird das Limit der  $H_2$ -Konzentration überschritten. Im Vergleich der beiden Trägermaterialien fällt auf, dass die Katalysatoren auf  $CeO_2$  schon bei niedrigeren Temperaturen eine hohe Aktivität erreichen.

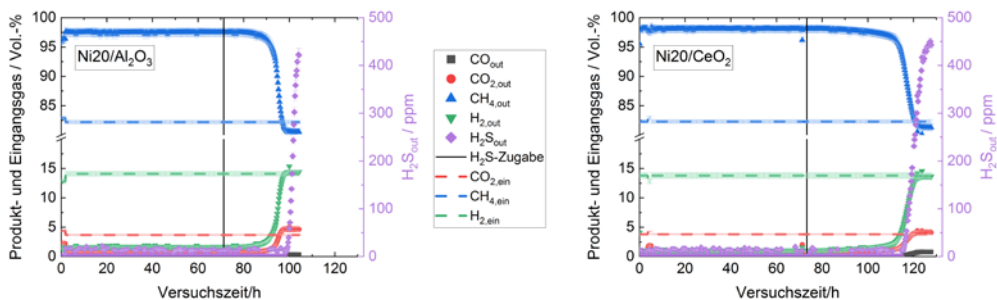
Tabelle 1: Betriebsparameter für die sechs Katalysatoren zum Erreichen der Kraftstoffanforderungen

	Ni20/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ru0,3/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ru1/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ni20/CeO <sub>2</sub>	Ru0,3/CeO <sub>2</sub>	Ru1/CeO <sub>2</sub>
T/°C	300	400	350	250	300	300
GHSV/h <sup>-1</sup>	1776	1776	1776	1776	1776	5327
H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	3,8	2,9	2,9	2,9	3,8	3,8

Abbildung 2: Vergleich der erzielten Produktgaszusammensetzungen durch die beste Kombination aus T, GHSV und H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-Verhältnis. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an.

### 3.2 Vergiftungskurven durch H<sub>2</sub>S-Zugabe

Bei den beiden bisher getesteten Katalysatoren Ni20/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Ni20/CeO<sub>2</sub> kam es während des Langzeitversuches über 70 h zu keinem Aktivitätsverlust (s. Abbildung 3). Erst durch die Zugabe von H<sub>2</sub>S wird nach weiteren 16 h bzw. 34 h eine Deaktivierung deutlich, die mit einem Anstieg der H<sub>2</sub>S-Konzentration im Produktgas korreliert. Im Vergleich der Katalysatoren geträgert auf Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und CeO<sub>2</sub> zeigt sich, dass mit CeO<sub>2</sub> die Zeit bis zum vollständige Aktivitätsverlust um etwa 18 h verlängert wird. CeO<sub>2</sub> trägt somit zu einer höheren H<sub>2</sub>S-Toleranz als Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bei. Die Versuchsreihe wird aktuell mit den anderen vier Katalysatoren weitergeführt. Bei Versuchen mit 250 ppm H<sub>2</sub>S konnte bei beiden Ni-Katalysatoren ungefähr eine Verdopplung der Zeit bis zur vollständigen Vergiftung beobachtet werden.

Abbildung 3: Langzeitversuch bis ca. 70 h und anschließende Vergiftung durch die Zugabe von 500 ppm H<sub>2</sub>S (schwarze Linie) mit Ni20/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (links) und Ni20/CeO<sub>2</sub> (rechts).

## Danksagung

Die dieser Veröffentlichung zugrundeliegenden Arbeiten wurden im Auftrag des *Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur* durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt ausschließlich beim Autor.

## Literatur

Nieß, Selina; Armbruster, Udo; Dietrich, Sebastian; Klemm, Marco (2022): Recent Advances in Catalysis for Methanation of CO<sub>2</sub> from Biogas. In: *Catalysts* 12 (4), S. 374. DOI: 10.3390/catal12040374.

Rönsch, Stefan; Schneider, Jens; Matthischke, Steffi; Schlüter, Michael; Götz, Manuel; Lefebvre, Jonathan et al. (2016): Review on methanation – From fundamentals to current projects. In: *Fuel* 166, S. 276–296. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.10.111.

## Kontakt

*M. Sc., Selina Nieß, wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin*  
Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH  
Tel.-Nr.: 0341 24 34 420  
E-Mail: selina.niess@dbfz.de





## Wirkung von Pyrolysekohle in der batchbetriebenen Bioabfallvergärung

**Abstract:** *Durch Technikumsversuche im halbtechnischen Maßstab soll untersucht werden, inwieweit der Ertrag von bioabfallbetriebenen Feststoffvergärungen durch den Einsatz von Biokohle als Prozessadditiv optimiert werden kann. Dabei wird in realitätsnahen Gärversuchen durch die Beimengung von Pyrolysekohle in das Gärsubstrat evaluiert, ob die Kohlezugabe Auswirkungen auf Biogasmenge und -qualität durch die potentielle Eigenschaft als Prozess-optimierer aufweisen kann. Zum Einsatz kam Pyrolysekohle aus Strauchschnitt und Kuhdung, da hier die vergleichsweise größten spezifischen Oberflächen durch den Pyrolyseprozess erzielt werden konnten. Trotz einer ausreichenden Reaktorgröße von 18 Litern verursachte die Heterogenität des Bioabfalls erhebliche Schwierigkeiten bei der Vergleichbarkeit der Ergebnisse, was eine finale Bewertung erschwerte. So waren in den ersten beiden Versuchsreihen teilweise Steigerungen, in der letzten Versuchsreihe jedoch eine Reduktion des Biogasertrags auffällig.*

### 1 Einleitung

Unabsehbare Probleme durch den Klimawandel, zunehmende Ressourcenknappheit von Rohstoffen und ansteigende Kosten für Energie und Betriebstechnik stellen insbesondere die Abfallwirtschaft vor neue Herausforderungen. Neben massiven Bestrebungen zur lückenlosen Implementierung einer Kreislaufwirtschaft rückt auch die Optimierung der verfahrenstechnischen Prozessführung abfallwirtschaftlicher Systeme vermehrt in den Fokus wissenschaftlicher Betrachtungen. So bieten die erheblichen Anteile organischer Materialien im urbanen Abfallaufkommen vielfältige Potentiale für eine kaskadierte Weiterverwendung in verschiedenen Bereichen. Dies kann unter anderem durch eine Weiterverarbeitung der organischen Eingangsstoffströme mittels Pyrolyse zu Biokohle erfolgen, wobei zahlreiche Folgenutzungen [1] wie die Sequestrierung von Kohlenstoff durch die Biokohle [2] oder auch eine Nährstoffadsorption mittels Langzeit-Pufferwirkung durch Aktivierung der Kohle andenkbar sind [3]. Neben klassischen Behandlungsverfahren für Bioabfälle wie der sauerstoffbasierten Kompostierung kommen heutzutage auch anaerobe Prozessschritte mit energiefreisetzenden Stoffwechselvorgängen häufiger zum Einsatz. Die Entscheidungsfindung zwischen aeroben und anaeroben Technologien basiert dabei im Wesentlichen auf dem Struktur- und Wassergehalt des anfallenden Materials, wobei sich die feststoffbasierte Vergärung aufgrund des noch relativ jungen Verfahrens erst langsam durchsetzt. Um die Anforderungen an zukunftsorientierte Behandlungsverfahren zu gewährleisten, soll der Betrieb von bioabfallbetriebenen Feststoffvergärungen experimentell optimiert werden. Diese Aufgabenstellung wurde in einer kooperativen Forschergruppe aus dem Thüringer Innovationszentrum für Wertstoffe (ThiWert) von der Bauhaus-Universität Weimar und der Hochschule Nordhausen eingehender untersucht, wobei ein branchenübliches Gemenge aus Bioabfall und Inokulum vor dem Einbau zusätzlich

mit Biokohle vermischt wurde. Literaturquellen legen eine Adsorption biologischer Hemmstoffe sowie einen Aufwuchs sessiler Mikroorganismen in den Fraktalstrukturen der Kohleflocken nahe, was idealerweise zu einer Optimierung der Gaserträge bzw. -zusammensetzungen führen kann [4] [5] [6] [7].

## 2 Methodik

Zur Datenerhebung wurden drei Versuchsreihen im halbtechnischen Maßstab an einer Feststoffvergärung mit zwölf identischen Gärreaktoren je 18 Liter Fassungsvermögen durchgeführt. Die Reaktoren waren in einer Thermokammer aufgestellt, welche mittels Umluft-Heizgebläse auf kontinuierliche 40° C temperiert wurde. Am Reaktorfuß waren die Behälter jeweils durch Flanschverbindungen mit einem darunter befindlichen Perkolattank gasdicht verbunden. Zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Mikroorganismen- und Feuchteversorgung wurden die Reaktoren über die Versuchsdauer in regelmäßigen Intervallen mit Perkolat versorgt, welches über Inline-Kreiselpumpen oberhalb der Sockelplatte der jeweiligen Perkolattanks abgezogen und über eine Druckleitung und ein Verteilerblech gleichmäßig auf den Substratfüllungen verregnet wurde (siehe Abbildung 1). Unmittelbar nach dem Substrateinbau und vor dem eigentlichen Versuchsbeginn wurden die bis dato unperkolierten Reaktoren mit Stickstoff gespült, um anaerobe Verhältnisse herbeizuführen. Das entstandene Biogas wurde über eine außerhalb der Thermokammer installierte Kondensatfalle zu Trommelgaszählern geführt und quantitativ bestimmt. Im Anschluss wurde es in Gasbeuteln gesammelt und dessen Zusammensetzung täglich mit einem Gasanalysegerät erfasst.



*Abbildung 1: Ansicht der gesamten Versuchskonstellation mit Thermokammer und Messvorrichtung (links) sowie Gärreaktoren, Perkolatbehältern und Perkolatpumpen im Inneren einer zentral beheizten Thermokammer (rechts); Bilder: Florian Wehking*

Die Gärbehälter wurden jeweils im Dreifachansatz mit einem Substratgemisch aus frischem Bioabfall gefüllt und mit zuvor untergemischten Gärresten aus einer Trockenfermentationsanlage angeimpft. Dabei kam ein Mischungsverhältnis von einem Teil Bioabfall-Trockenrückstand (TR) auf zwei Teile Gärrest-Trockenrückstand zum Einsatz. Zur Homogenisierung des Korngefüges und zugunsten einer verbesserten Durchmischbarkeit wurden die Bioabfälle zusätzlich mit einem Zweiwellenzerkleinerer zerschnitten. Während drei Reaktoren als Nullansatz zur Vergleichbarkeit ohne Kohlebeimengung beladen waren, wurden je drei Reaktoreinbauten mit 5 Mas.-% bzw. je 10 Mas.-% und im letzten Versuchsdurchlauf mit 26 Mas.-% Biokohle (bezogen auf den Trockenrückstandsgehalt des Bioabfalls) versetzt. Zur Ermittlung der Restgasbildung aus dem Inokulum wurden drei weitere Reaktoren nur mit Gärrest beaufschlagt, während im Weiteren auch das Perkolat in Schraubglasflaschen mittels Dreifachansatz auf das Restgaspotential untersucht wurde. Die Biokohle wurde in einer hauseigenen Pyrolyseanlage bei 600 - 900° C unter kontinuierlicher Einspeisung von Stickstoff hergestellt. Zur Analyse der Kohlen erfolgte eine Oberflächenbestimmung mittels Stickstoffadsorption (BET), da die qualitative Auswirkung der Kohlen auf den Gärprozess mutmaßlich mit deren spezifischer Oberfläche korreliert.

### 3 Resultate

Die eingesetzte Biokohle hatte mäßige spezifische Oberflächen mit max. 307 m<sup>2</sup>/g (Kohle aus Kuhdung) im Vergleich zu handelsüblicher Aktivkohle mit weit über 800 m<sup>2</sup>/g [8]. Für die Gärversuche 2 und 3 wurde Kohle aus Strauchschnitt mit 90 bis 150 m<sup>2</sup>/g verwendet, da die angestrebte Nachproduktion der Kohle aus Kuhdung trotz identischer Prozessparameter deutlich geringere Oberflächenwerte aufwies und weit unterhalb der Empfehlung von 150 m<sup>2</sup>/g der European Biochar Foundation lag [8]. Alle Kohlen wurden im Pyrolyseprozess mit destilliertem Wasser aktiviert, wobei auf eine erfolgsversprechende, chemische Aktivierung bewusst verzichtet wurde, um einen potentiellen Schadstoffeintrag in die Gärsubstrate zu minimieren.

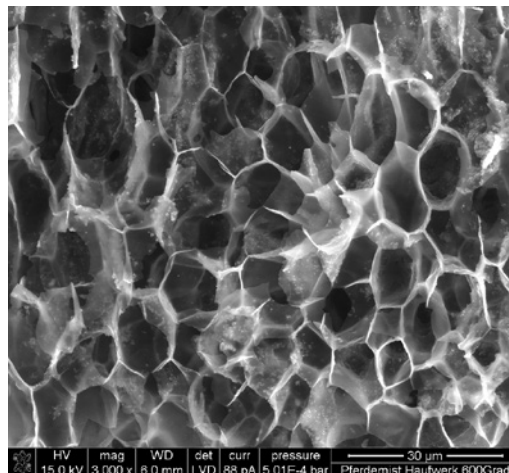


Abbildung 2: Pyrolysekohle aus offen gelagertem Pferdemist (Prozesstemperatur 600° C) bei Betrachtung mit einem Rasterelektronenmikroskop, Maßstab unten rechts; Bild: Christian Matthes

Die Versuchslaufzeit betrug im ersten Durchlauf 68 Tage, im zweiten Durchlauf 71 Tage und im dritten Durchlauf 28 Tage. Eine Ermittlung der aufgetretenen Abbaugrade wäre hier mit erheblichen Ungenauigkeiten verbunden, da durch die regelmäßige Substratperkolatation unweigerlich ein Austrag von Feinsedimenten in den Perkolattank erfolgt, was zu einer Beeinflussung der Feststoff- und Organikgehalte sowohl im Gärreaktor als auch im Perkolattank führen wird. Eine Gegenbilanz der u. a. durch Sedimenteintrag hervorgerufenen Organik im Perkolat kann ohne eigenständige Gasmengenbestimmung nicht quantitativ unterlegt werden, weshalb die nachfolgenden Angaben der Gaserträge auf die Frischmassen und organischen Trockenrückstände des eingebauten Bioabfalls bezogen sind. Bereits bei Auswertung des ersten Versuchsdurchlaufs waren sehr hohe Standardabweichungen bei den Gaserträgen innerhalb der Dreifachansätze auffällig. Der genutzte Bioabfall brachte trotz gründlicher Durchmischung je Charge eine äußerst heterogene und saisonal stark differierende Substratcharakteristik zu Tage, was eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Ergebnisse unter den einzelnen Versuchsdurchläufen stark erschwert (siehe Tabelle 1).

*Tabelle 1: Ergebnisse der drei Untersuchungsreihen zum Einfluss von Biokohle auf den Gasertrag*

	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2	Versuchsreihe 3
<b>Bioabfall:</b>			
- Schüttdichte [kg/l]	0,47	0,54	0,59
- TR / oTR [%]	46,2 / 38,5	39,4 / 60	35,3 / 61,9
<b>Inokulum (Gärrest):</b>			
- Schüttdichte [kg/l]	0,69	1,23	0,69
- TR / oTR [%]	33,8 / 45,1	27,8 / 48,9	34,6 / 56,9
<b>Perkolat:</b>			
- TR / oTR [%]	2,0 / 42,7	3,2 / 43,9	2,1 / 36,5
Ø Gasertrag Nullansatz [NL/kg FM <sub>Bioabfall</sub> ]	43	79	70
Ø Gasertrag Nullansatz [NL/kg oTR <sub>eingeb. Bioabfall</sub> ]	242	332	320
Abweichung Gasertrag Kohle 5 Mas.-% TS ggü. Nullansatz	-22,3 %	-8 %	-
Abweichung Gasertrag Kohle 10 Mas.-% TS ggü. Nullansatz	+15,2 %	+6 %	-
Abweichung Gasertrag Kohle 26 Mas.-% TS ggü. Nullansatz	-	-	-8,9 %

Für Folgeuntersuchungen zum Einfluss der Biokohle auf den Gärprozess sollten deshalb Eingangssubstrate mit homogenerer Materialbeschaffenheit herangezogen werden. Auch eine separate Gasmengenerfassung in räumlich entkoppelten Perkolattanks erscheint sinnvoll, um die Beeinflussung durch Sedimenteintrag quantitativ zu belegen. Alternativ wäre ein vorangehendes Durchmischen des Substrat-/Inokulumgemischs

mit dem Perkolat und ein vollständiger Verzicht auf die Intervallperkolation im Gärprozess andenkbar, um eine Vermeidung mechanisch induzierter Materialausträge zu gewährleisten.

## Literatur/Quellen

- [1] H.-P. Schmidt, „55 Anwendungen von Pflanzenkohle,“ *Ithaka Journal – Weinbau Ökologie Klimafarming*, pp. 99-102, 2012.
- [2] I. Teichmann, „Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten,“ ZBW – Leibniz-Informationssystem Wirtschaft, 2014.
- [3] M. Haubold-Rosar, T. Heinkele, A. Rademacher, J. Kern, C. Dicke, A. Funke, S. Germer, Y. Karagöz, G. Lanza, J. Libra, A. Meyer-Aurich, J. Mumme, A. Theobald, J. Reinhold, Y. Neubauer, J. Medick und I. Teichmann, Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2016.
- [4] S. Inthapanya, T. R. Preston und R. A. Leng, „Biochar increases biogas production in a batch digester charged with cattle manure,“ Luang Prabang, Lao PDR, 2014.
- [5] D. Meyer-Kohlstock, „Biochar as Additive in Biogas Production from Bio-Waste,“ in *Prospects for Biochar in a Bio-Waste Cascade*, 2017.
- [6] J. Mumme, F. Srocke, K. Heeg und M. Werner, „Use of biochars in anaerobic digestion,“ Elsevier, 2014.
- [7] J.-M. G. W. Rödger, A. Krieg, C. Roth und A. Loewen, „Steigerung des Biogasertrages durch die Zugabe von Pflanzenkohle,“ *Müll und Abfall*, Nr. 09, pp. 76-81, 2013.
- [8] Donau Carbon GmbH, „Aktivkohle und ihre Anwendung,“ Donau Carbon GmbH, 12 01 2018. [Online]. Available: <https://www.donau-carbon.com/Downloads/aktivkohle.aspx>. [Zugriff am 16 01 2023].
- [9] H.-P. Schmidt, S. Abiven, B. Glaser, C. Kammann, T. Bucheli, R. van Haren, I. Starman, Leifeld und Jens, „European Biochar Certificate - Richtlinien für die Produktion von Pflanzenkohle,“ European Biochar Foundation, 2012.

## Kontakt

M. Sc. David Gaeckle, wissenschaftlicher Mitarbeiter

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

Tel.-Nr. +49 (0) 36 43 / 58 48 53

E-Mail: [david.gaeckle@uni-weimar.de](mailto:david.gaeckle@uni-weimar.de)

Homepage: [www.uni-weimar.de/bis](http://www.uni-weimar.de/bis)



## KAPITEL II – POSTER





## Effectiveness of Traditional Waste Management System of Rural Communities: A Case Study in the Kwahu East District, Ghana

**Abstract:** *This study applied a combination of household survey, expert interviews and literature review to explore the dynamics of WM in the rural settings of Ghana using the Kwahu East District (KED) as a case example. It does this by 1) examining the traditional WM approaches; 2) accessing the perception of rural households on WM; and 3) exploring the existence and effectiveness of WM policies and or by-laws of rural communities in the KED. The results provide the following insight: i) the existence of diverse traditional WM measures which has minimal form of formal interventions from the district assembly; and ii) positive perception about WM practices in the rural households. Although, local community households hold positive perception about WM practices, this does not translate into positive attitude towards WM mainly due to the lack of formal support and/or WM facilities (e.g. waste bins) in the rural communities. Therefore, for a proper WM in the rural settings of the KED, there is the need for a multidimensional and multilevel WM approaches to identify and strengthen best WM practices taking into consideration the importance of formal WM interventions in the rural communities in the KED. From a policy standpoint, decentralized enforcement of WM by-laws is essential to guarantee long-term adoption of best practices.*

### 1 Introduction

Waste management (WM) remains a major challenge for most developing countries like Ghana where rapid population growth and urbanization influence the rise in annual waste generation. In developing countries, most solid WM subsectors are plagued with various problems of ineffectiveness and inefficiency (Marshall and Farahbakhsh, 2013). For instance, the WM decentralization program by the government of Ghana was primarily intended to improve efficiency and service delivery at the municipal level (Addaney and Oppong, 2015). Yet, disproportionate waste collection, waste overflow from bins, insufficient storage containers, and waste disposal in unauthorized areas still persist in most Ghanaian communities. On the flipside, countless policy initiatives and programs are developed and implemented at various levels (national to municipal) with the aim of achieving sustainable solid waste management (SWM) for safe and healthy human environment (UNEP, 2000). At the national level, WM programs such as the Ghana National Plastic Action Partnership, the Ghana National Sanitation Day, and the Ghana WASH Project, amongst others, reflects the commitment of the government for a proper WM.



themes extracted and organized. The data was analysed for interrelationships, trends and patterns to draw conclusions and empirical evidence for discussions. The semi-structured interviews were organized and analysed using Microsoft Excel and SPSS, respectively.

### **3 Results and Discussions**

#### **3.1 Socio-demographic characteristics of study participants**

Majority of persons (98.7%) responsible for managing household wastes were adult females. Only one male adult - (Father/Husband) representing 1.3% - was responsible for managing waste in all the households interviewed. Culturally, women are responsible for WM in typical Ghanaian households (Alhassan et al., 2020). This was not different in this study as majority of household waste managers were female adults (69.7%).

#### **3.2 Dynamics of household waste management**

Waste storage devices vary depending on the availability and the community. In this study, 74% of respondents reported plastic bags as storage material in their homes and the least storage material used was cardboard box (4%). According to Barnes and Milner (2005), plastic has superseded natural materials as the most significant development of the 20th century, since it is more affordable and practical for storing items (Essaw and Sasu, 2015). Similar to this, majority of families in the research area used plastic bags to collect and/or store their waste. This is probably because the study areas (rural communities) are considered economically poor and cannot afford high cost storage materials (Aboagye-Attah, 2019).

However, some respondents do not store their waste before final disposal. Thus, they directly disposed their waste to either refuse dump site or nearby bushes. Open dump sites popularly known as “bola” (Kyere et al., 2019) and dumping pits created by households were part of waste disposal techniques use in the rural communities. One of the challenges as in the study area is the absence of central waste bins (as described in Figure 2). Guerrero et al., (2013) argued that the absence of efficient waste management and recycling systems endangers public health in developing nations. This assertion is not far-fetched in the study area as some respondents complained of the breed of and spreading of mosquitoes especially during the wet seasons. In terms of waste separation, nearly all households (98.7%) do not separate waste before final disposal due to the absence of waste separation system in the communities. Nonetheless, majority of the households (89.5%) indicated their willingness to separate their waste if they were provided with different waste bins for that course.

It was apparent that most (82%) household respondents have positive perception about WM and its practices. This was evident when most respondents disagreed that waste cannot be dumped indiscriminately even when the appropriate facilities (e.g. waste bins) are not provided (Figure 3). However, lack of enforcing WM laws in the rural communities encouraged some residents to dump at unapproved areas (e.g. nearby bushes and undeveloped buildings). Although all respondents (100%) affirmed the existence of WM policies at the district and community levels, their enforcement they said were lacking. Therefore, the poor community attitudes regarding WM and its disposal are as a result of the district assembly's lack of provision of waste facilities and a fair and severe enforcement of WM and waste disposal legislation (Lissah et al., 2021).

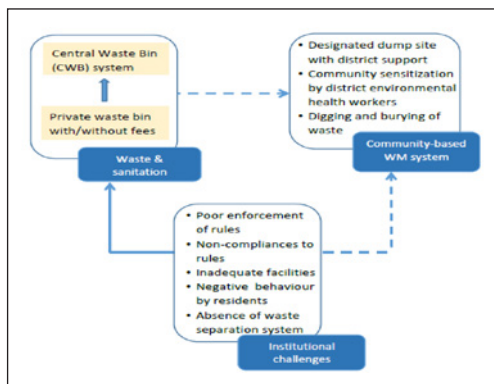


Figure 2: Peculiarities of WM and sanitation in the KED: the expert perspective (Source: author's construct, 2022).

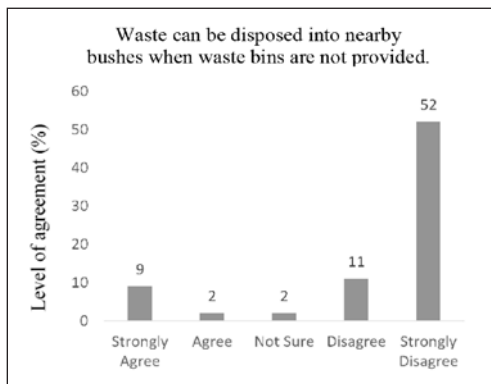


Figure 3: Respondents' understating of appropriate places of waste disposal (Source: field data, 2022).

## 4 Conclusion

The study illustrates that the approaches of WM in rural context of the KED are traditional in nature (which does not reflect modern WM approaches) and consistent across all study communities. It is evident that local residents will engage in proper WM practices if residents have access to WM facilities (e.g. waste bins) and the existing WM policies fully enforced. Therefore, the study recommends a multidimensional and multilevel WM approaches to identify and strengthen best WM practices, taking into consideration the importance of formal WM interventions in the rural communities in the KED.

## Acknowledgement

The authors are grateful to the study communities and the staff of the KED assembly, Ghana.

## Bibliography

- Aboagye-Attah, K. (2019). Socioeconomic correlates of poverty in Ghana using Ghana Living Standards Survey round 6 and 7 (Master's thesis, Norwegian University of Life Sciences, Ås).
- Addaney, M., & Oppong, R. A. (2015). Critical issues of municipal solid waste management in Ghana. *Jenrm*, 2(1), 30-36.
- Alhassan, H., Kwakwa, P. A., & Owusu-Sekyere, E. (2020). Households' source separation behaviour and solid waste disposal options in Ghana's Millennium City. *Journal of environmental management*, 259, 110055.
- Barnes, D. K., & Milner, P. (2005). Drifting plastic and its consequences for sessile organism dispersal in the Atlantic Ocean. *Marine Biology*, 146(4), 815-825.
- Essaw, D. W., & Sasu, R. G. (2015). Attitudes towards plastic waste management in the Ga East Municipality of Ghana.

- Ghana Statistical Service (2012) 2010 Population and Housing Census: Summary Report of Final Results. May, 2012. Accra, Ghana: Ghana Statistical Service. Available at: [http://www.statsghana.gov.gh/docfiles/2010phc/Census2010\\_Summary\\_report\\_of\\_final\\_results](http://www.statsghana.gov.gh/docfiles/2010phc/Census2010_Summary_report_of_final_results).
- Ghatak, S., & Sánchez-Fung, J. R. (2007). Monetary economics in developing countries. Macmillan International Higher Education.
- Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste management*, 33(1), 220-232.
- Kyere, R., Addaney, M., & Akudugu, J. A. (2019). Decentralization and solid waste management in urbanizing Ghana: moving beyond the status quo. In *Municipal Solid Waste Management*. IntechOpen.
- Lissah, S. Y., Ayanore, M. A., Krugu, J. K., Aberese-Ako, M., & Ruiters, R. A. (2021). Managing urban solid waste in Ghana: Perspectives and experiences of municipal waste company managers and supervisors in an urban municipality. *PloS one*, 16(3), e0248392.
- Marshall, R. E., & Farahbakhsh, K. (2013). Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste management*, 33(4), 988-1003.
- United Nation Environmental Programme (UNEP), (2000). International Source Book on Environmentally Sound Technologies for Municipal Solid Waste Management.

#### **Kontakt**

Ahunoabobirim Bosompem Agya

Technical University of Dresden, Germany

Mobile: +49 (0) 17673500860

Email: ahunoabobirim@gmail.com



## Faserrückgewinnung aus kommunalen Bioabfällen zur Herstellung kompostierbarer Pflanzentöpfe

**Abstract:** Im Rahmen des Green Deals der Europäischen Union stellt die Kreislaufwirtschaft einen wichtigen Baustein dar, um von der linearen Wirtschaftsweise hin zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft zu kommen. Bioabfall stellt einen Stoffstrom im urbanen Umfeld dar, aus welchem, Biogas, Gärrest und Kompost sowie weitere Sekundärrohstoffe und Produkte zu gewinnen sind. Im Projekt „Biowaste to Products“ werden aus kommunalem Bioabfall Sekundärrohstoffe und fertige Produkte erzeugt und gezeigt werden können, in welchem Umfeld diese verwendbar sind.

Im Biogasprozess sind ligninhaltige Bestandteile nur schwer abbaubar und die faserhaltigen Bestandteile verlassen den Prozess ohne biologischen Abbau. Eines der Ziele im Projekt BW2Pro ist es diese ligninhaltigen Bestandteile unter hohem Druck und hohen Temperaturen in einem Reaktor aufzuschließen und daraus einen Werkstoff herzustellen, welcher für höherwertige Produkte nutzbar ist. Dieser Werkstoff soll dann zu Fasertöpfen verpresst werden, die im Gartenbau einsetzbar sind und sich im Boden zersetzen um als Bodenverbesserer und Nährstoffdepot zu dienen.

### 1 Einleitung

Das BW2Pro-Projekt ist ein Projekt mit mehreren Teilnehmern, das in der Bioökonomie und ihren Anwendungen angesiedelt ist. Im Projekt „Biowaste to Products (BW2Pro)“ wird die Bioabfallbehandlung weiterentwickelt und in eine nachhaltige Bioraffinerie überführt. Zu diesem Zweck werden organische Abfälle aus der kommunalen Sammlung mit innovativen Verfahren (einschließlich thermischer Druckhydrolyse) behandelt. Im Ergebnis wird eine Reihe von stofflichen Produkten mit ökonomischem und ökologischem Mehrwert gewonnen, die durch sukzessive Verwertung letztlich einem effizienten Recycling- und Kreislaufwirtschaftskonzept zugeführt werden. Die konzeptionellen Arbeiten werden mit experimentellen Arbeiten und einem Pilotbetrieb kombiniert. Das Projekt besteht aus 8 verschiedenen unabhängigen Modulen. Jedes Modul kann unabhängig von der anderen arbeiten. Je nach Bedarf können auch weniger Module betrieben werden. Das Projekt wird von der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit weiteren Partnern und Institutionen durchgeführt.





## **2 Material und Methode**

### **2.1 Faseraufbereitung**

Die Pilotanlage wird voraussichtlich im März 2023 in Betrieb genommen. Die installierte Thermo-Druck-Hydrolyse (TDH) wird fünfmal täglich beladen. Organische Abfälle, die von den enthaltenen Fremdstoffen getrennt sind und eine Partikelgröße von weniger als 10 mm aufweisen, werden in das TDH-System geladen. Die notwendigen Bedingungen für das Funktionieren des TDH-Systems sind 20 % TS.

Im November 2022 wurde eine Untersuchung zur TDH in Zusammenarbeit mit der Universität Hohenheim durchgeführt. Die Abfälle aus der Biogasanlage in Backnang wurden mehrfach gewaschen. Der Zweck dieses Waschens besteht darin, Fremdstoffe aus dem Abfall zu entfernen.

Nach dem Waschvorgang wird die Flüssigkeit im Abfall abgetrennt. Anschließend werden die gewaschenen Abfälle in der Zerkleinerungsmaschine zerkleinert. Nach dem Zerkleinerungsprozess wurde eine größere Partikelgröße als erwartet erzielt. Dies beeinflusste auch die Menge an Fasern, die anschließend gebildet wurden.

Der in der Pilotanlage zu verarbeitende Abfall sollte sehr homogen sein und eine ähnliche Korngröße aufweisen. In der Pilotanlage werden die Abfälle 1 Stunde lang bei 160-170 Grad und 10 bar verarbeitet. Nach einer Stunde wird der Deckel des Behälters bei einem Druck von 10 bar geöffnet und der Abfall wird bei 1 bar in einen weiteren Behälter geleitet. Dieser herbeigeführte Druckunterschied bringt die Zellen zum Platzen. Auf diese Weise werden die Fasern leichter getrennt. Der behandelte Abfall im 1-bar-Behälter gelangt mit Hilfe einer Spirale zum Entstripper. Hier erfolgt eine Fest- und Flüssig-Fasertrennung. Die festen Fasern werden mit einem reduzierten Wassergehalt aus dem System entnommen.

Die flüssigen Fasern werden in einem weiteren Behälter gesammelt. Alle Verfahren dauern ca. 2 Stunden. In den Fasern, die als Feststoff aus dem System ausgeschieden wird, gibt es feine und dicke Fasern. Die Zellulose wird aus feinen Fasern hergestellt. Die dicken Fasern werden gepresst und für die Herstellung von Blumentöpfen verwendet. Die flüssigen Fasern gelangen in den Biogasreaktor.

### **2.2 Faseranalyse**

Eine Reihe von Analysen wurden an festen und flüssigen Fasern durchgeführt, die nach der TDH erhalten wurden. Die durchgeführten Analysen betrafen Wassergehalt, Glühverlust, AT4, pH-Wert, Leitfähigkeit und Biogasertrag.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Ergebnisse von Bioabfall und Fasern

Jeder Stichprobenzeitraum umfasst eine Woche innerhalb eines Monats. Die Proben wurden nach Verlassen des 80-mm-Häckslers entnommen.

*Tabelle 1: Bioabfall Oktober Mix*

Parameter	Ergebnisse
TS	33,59 %
oTS	78,27 %
Fremdstoffe	2,04 %
pH-Wert	5,4
Leitfähigkeit	1,9 ms/cm

*Tabelle 2: Flüssigphase von Fasern (extrem dünn)*

Parameter	Ergebnisse
TS	0,12 %
oTS	67,8 %
CH <sub>4</sub> -Ertrag	0,159 +/- 0,166 m <sup>3</sup> /kg oTS
pH-Wert	8,8
Leitfähigkeit	1 ms/cm

*Tabelle 3: Festphase von Fasern*

Parameter	Ergebnisse
TS	21,49 %
oTS	96,33 %
AT4	13 mg O <sub>2</sub> /g TS
CH <sub>4</sub> -Ertrag	0,173 +/- 0,010 m <sup>3</sup> /kg oTS
pH-Wert	6,2
Leitfähigkeit	67 µS/cm

Der im Oktober gesammelte Abfall wurde analysiert und aus Abfall des gleichen Zeitraums wurden Fasern zurückgewonnen. Die Veränderungen des Wassergehalts und des organischen Anteils sind in den Tabellen dargestellt.

### **3.2 Erwartete Ergebnisse**

Die erwarteten Ergebnisse sollen die Eignung der Grobfasern für die Herstellung von Pflanzentöpfen und die enthaltenen Pflanzennährstoffe aufzeigen. Weiters wird erwartet, dass die aus den Fasern hergestellten Töpfe die Pflanzen mit den Elementen versorgen, die sie zum Wachstum benötigen, oder dass weniger Mineraldünger zugesetzt werden muss.

### **Danksagung**

Das Projekt BW2Pro wird durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, kofinanziert durch die Europäische Union gefördert.

### **Kontakt**

*M.Sc. Ing. Mustafa Kemal Ak Wissenschaftliche Mitarbeiter*

Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abwasserwirtschaft

Tel.-Nr. 0711 68563709

E-Mail: [mustafa-kemal.ak@iswa.uni-stuttgart.de](mailto:mustafa-kemal.ak@iswa.uni-stuttgart.de)

Homepage: <https://www.iswa.uni-stuttgart.de/>



## Closed-loop recycling of plastics: Quality impacts on plastics circularity

**Abstract:** *The implementation of a circular economy on the plastic waste stream requires the collection of considerable quantities of acceptable qualities for recycling. However, plastic's quality deterioration is one of the main limitations to the application of closed-loop recycling. Hence, identifying the quality deterioration factors of mechanically recycled plastics could help in applying the best practices to manage the plastic waste stream. This paper provides an analysis of the indicators that should be considered along the plastics' value chain to boost the application of circular economy. The aim is to ensure the production of recyclates of high quality and safe for application.*

*The assessment indicates that the occurrence of impurities in plastics depends on many factors, including: intentional in the form of application to comply with design aspects and manufacturing needs, and non-intentional, which includes the utilisation needs of the product, the preservation conditions, and the disposal, collection and sorting conditions. In conclusion, controlling the source and quality of plastics put for recycling, high-quality and high-value recyclates can be obtained.*

### 1 Introduction

In the waste management sector, maintaining functionality and quality is a recycling-crucial factor. The quality of material in the waste stream is an important factor to be considered to meet the specifications of recycled products on the market (Hahladakis & Iacovidou, 2018).

The quality of plastic waste is a decisive factor for its management. For instance, plastics quality deterioration can be significantly limiting the application of the closed-loop recycling. Quality deterioration comes in the form of material degradation (Alassali, Fiore, & Kuchta, 2018; Alassali, Moon, Picuno, Meyer, & Kuchta, 2018; Alassali, Picuno, Bébien, Fiore, & Kuchta, 2020; Cooper & Corcoran, 2010; Wei et al., 2020) and/or contamination (Alassali, Barouta, Tirion, Moldt, & Kuchta, 2020; Alassali, Calmano, Gidarakos, & Kuchta, 2020; Eriksen, Pivnenko, Olsson, & Astrup, 2018).

Generally, plastics contamination can occur due to the design requirements (additives, and inks), due to usage (dust, oils, etc.), due to application (food, oils, pesticides, solvents, etc.), or due to products generated when the polymers undergo degradation (Pivnenko, Jakobsen, Eriksen, Damgaard, & Astrup, 2015).

Plastics' contamination and degradation take place throughout the plastics value chain, including the plastic waste processing steps. Hence, the adequacy of input material for recycling could be realised by incorporating systems that are capable of determining the material's quality and its degree of contamination and degradation. These systems could actively improve the quality of the output material and enhance the efficiency of the plastic waste management scheme. In this regard, identifying contaminants and their possible sources in the plastic waste fraction is a prerequisite for enhanced and effective plastic waste management. Consequently, the application of circular economy could be boosted in the plastic waste stream, while ensuring sustainability, high quality, and safety of products (Alassali, 2020).

In this paper, an analysis of the factors resulting in the plastics' quality-declining is provided. The aim is to investigate ways to maintain the plastic material quality throughout production and recycling.

## 2 The complexity of the plastic waste stream

Identifying the characteristics of the plastic waste is key for the application of the best management technologies. Additionally, this will allow to define the influence of these characteristics on the application of closed-loop recycling. The common attributes of the plastic waste stream are summarised below:

- Heterogeneity of the polymer types (Ragaert, Delva, & van Geem, 2017);
- A wide range of polymer grades, different polymers grades can be processed differently (Hopewell, Dvorak, & Kosior, 2009);
- Existence of several materials, also within the same product (Lahtela, Hyvärinen, & Kärki, 2019);
- Ununiformed thicknesses and dimensions of the plastic objects;
- A range of degradation degrees, which can be influenced by the processing and usage of the material;
- Presence of various chemical substances in the form of additives (Demets et al., 2020);
- Presence of impurities that were unintentionally added to the material (e.g. environmental contaminants).

The plastic waste stream is considered as a complex waste stream; this complexity is inherited from the organic nature of plastic – and hence being degradable. Additional aspects are the numerous applications sectors, plastic's functionality as a marketing frontage for many products, and the abundance and intrinsic diversity of the resins available on the market. Generally, the plastic waste complexity is attained by two main contributing factors: plastic's contamination and degradation. The impact of these two quality deterioration factors can happen simultaneously or consecutively, as indicated in Figure 1.

## 3 Contaminants accumulation through the plastic's value chain

As indicated in Figure 1, plastics accumulate contaminants throughout the entire value chain. These contaminants are defined by their source. For instance, through products' manufacturing, the material is exposed to all types of the here defined contamination sources. Although plastic degradation during the manufacturing stage can be inevitable, the contamination aspect could be better controlled. In Table 1 recommendations are provided to control the quality of the plastic waste stream.

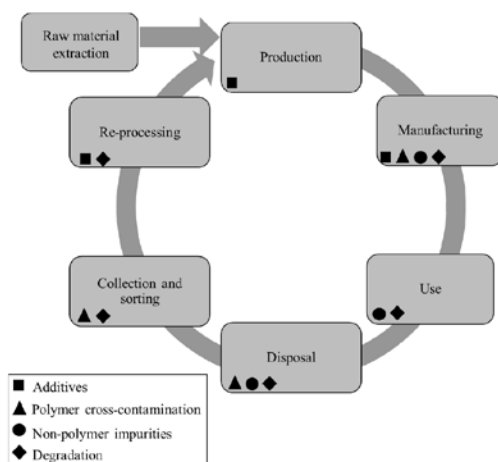


Figure 1: The source of plastic contamination across the plastics value chain.

Table 1: Recommendations to control the quality of the plastic waste stream

Factor	Plastic production	Product manufacturing	Product use	Waste disposal	Waste collection and sorting	Waste recycling
Additives	Control the types and quantities of additives	Control the types and quantities of additives	NA	NA	NA	Control the types and quantities of additives
Cross-contamination with other polymers	NA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enhance product designs</li> <li>- Limit the available polymer grades</li> </ul>	NA	Provide clear instructions to the user on the conditions before disposing off the material (e.g., separation of different elements)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Provide deposit systems for high-quality material for minimal cross-contamination</li> <li>- Develop and include advanced sorting technologies,</li> <li>- Ensure further sorting to the different polymeric grades</li> </ul>	NA

Impurities	NA	- Enhance the product designs by: (I) Limiting the types of inks and pigments used (II) Using labels that can be easily removed	- Provide clear instructions to the user	- Encourage the consumer to separate the product's residuals - Provide deposit systems for targeted products	- Provide collection points to collect plastics based on their application	NA
Degradation products	NA	Optimise the conditions of the manufacturing step	- Define the preservation conditions	Inform the consumer about the best preservation conditions	- Control the conditions around the collection points and deposit systems - Frequent material collection to avoid ageing	- Optimise the conditions applied during the washing and recycling steps

The recommendations provided in Table 1 are directly related to the quality-deterioration factors in the plastics value chain. Nonetheless, the material reaching the final stage (plastic waste reprocessing into recycled plastics) will need further actions to ensure high-quality products. These actions are mostly addressing the quality control and quality assurance before applying recycling:

- Ensure high purity of the sorted resins;
- Ensure efficient cleaning of the material, in other words enhanced cleaning processes are essential;
- Ensure a uniform mechanical of the sorted resin before applying the mechanical recycling

## 4 Conclusion

Plastic's quality deterioration is one of the main limitations to its closed-loop recycling. Identifying the quality deterioration factors of mechanically recycled plastics could help in applying the best practices to manage the plastic waste stream.

There is a strong correlation between the content of contaminants in the original material and the degree of contamination of the produced recycled plastics. Hence, by controlling the source and quality of plastics input for recycling, high-quality and high-value material can be obtained. This could be achieved by first enforcing rigid regulations on plastic products (e.g. through controlling the chemical additives used, forcing mono-material products, clear and transparent labelling, etc.) and waste (e.g. best management practices). Second by improving and expanding the plastic waste collection and sorting processes.

Nonetheless, harmonisation of legislations should be targeted to achieve sustainable and safe recycling. For instance, there are continuous discussions about investigating and assessing new chemicals in the plastic fractions originating from electrical waste. If the legislations fail to be harmonised, the amounts put for recycling will be significantly limited, not to neglect the confusion that can arise for the recyclers.



In order to obtain a better understanding to the contaminants limiting the plastic's closed-loop recycling, screening studies on diverse plastic waste streams are required. The screening should include the following research activities:

- Identifying substances in the plastic waste stream that are probably hazardous as per their physico-chemical properties;
- Investigating the sources of these contaminants;
- Defining the plastic types in which these chemicals are found;
- Defining the influence of the application requirements and the waste stream on the contaminants content.

## Literature

- Alassali, A. (2020). *Quality deterioration factors of the plastics closed-loop recycling*. Technische Universität Hamburg.
- Alassali, A., Barouta, D., Tirion, H., Moldt, Y., & Kuchta, K. (2020). Towards a high quality recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment through separation of contaminated fractions. *Journal of Hazardous Materials*, 387, 121741.
- Alassali, A., Calmano, W., Gidakos, E., & Kuchta, K. (2020). The degree and source of plastic recycles contamination with polycyclic aromatic hydrocarbons. *RSC Advances*, 10(73), 44989–44996.
- Alassali, A., Fiore, S., & Kuchta, K. (2018). Assessment of plastic waste materials degradation through near infrared spectroscopy. *Waste Management*, 82, 71–81.
- Alassali, A., Moon, H., Picuno, C., Meyer, R. S., & Kuchta, K. (2018). Assessment of polyethylene degradation after aging through anaerobic digestion and composting. *Polymer Degradation and Stability*, 158, 14–25.
- Alassali, A., Picuno, C., Bébian, T., Fiore, S., & Kuchta, K. (2020). Validation of near infrared spectroscopy as an age-prediction method for plastics. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104555.
- Cooper, D. A., & Corcoran, P. L. (2010). Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii. *Marine Pollution Bulletin*, 60(5), 650–654.
- Demets, R., Roosen, M., Vandermeersch, L., Ragaert, K., Walgraeve, C., & Meester, S. de (2020). Development and application of an analytical method to quantify odour removal in plastic waste recycling processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104907.
- Eriksen, M. K. [Marie Kampmann], Pivnenko, K. [Kostyantyn], Olsson, M. E., & Astrup, T. F. [Thomas Fruergaard] (2018). Contamination in plastic recycling: Influence of metals on the quality of reprocessed plastic. *Waste Management*, 79, 595–606.
- Hahladakis, J. N., & Iacovidou, E. (2018). Closing the loop on plastic packaging materials: What is quality and how does it affect their circularity? *Science of the Total Environment*, 630, 1394–1400.
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126.
- Lahtela, V., Hyvärinen, M., & Kärki, T. (2019). Composition of plastic fractions in waste streams: Toward more efficient recycling and utilization. *Polymers*, 11(1), 69.
- Pivnenko, K. [K.], Jakobsen, L. G., Eriksen, M. K. [M. K.], Damgaard, A., & Astrup, T. F. [T. F.] (Eds.) (2015). *Challenges in plastics recycling*. CISA Publisher: CISA Publisher.
- Ragaert, K., Delva, L., & van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>

Wei, R., Tiso, T., Bertling, J., O'Connor, K., Blank, L. M., & Bornscheuer, U. T. (2020). Possibilities and limitations of biotechnological plastic degradation and recycling. *Nature Catalysis*, 3(11), 867–871.

### **Contact**

*Dr.-Ing., Ayah Alassali, Oberingenieurin*

Institute for Circular Resource Engineering and Management

Technische Universität Hamburg

Tel.-Nr.: +49 40 428782438

E-Mail: [ayah.alassali@tuhh.de](mailto:ayah.alassali@tuhh.de)

Homepage: <https://www.tuhh.de/iue/forschung/forschungsgebiete/ag-sustainable-resource-and-waste-management.html>

## Zerkleinerung von NdFeB-Magneten im Labormaßstab – Ermittlung optimaler Betriebsparameter für eine schonende Zerkleinerung

**Abstract:** *Im Rahmen des GENESIS Projektes wird das Recycling von NdFeB Magneten über die pulvermetallurgische Route untersucht. Das Verpressen mit nachfolgendem Sintern erfordert die Zerkleinerung von Magneten auf Korngrößen kleiner 1,5 mm für den nachfolgenden Sinterprozess. Auf Grund der Sauerstoffaffinität der NdFeB-Legierung müssen die Magnete in Inertgasatmosphäre zerkleinert werden, da es sonst zu Oxidationsreaktionen auf der Kornoberfläche kommt. Hierzu wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der eine Zerkleinerung in einem Laborbackenbrecher in einer Inertgasatmosphäre zulässt. Dessen Aufbau und die Ergebnisse zum Einfluss der Betriebsparameter Spaltweite, Drehzahl und Füllgrad u.a. auf die Korngrößenverteilung werden im Beitrag vorgestellt.*

### 1 Einleitung

NdFeB-Magnete (Neodym – Eisen – Bor) finden Anwendung in Wirtschaftssektoren, die für die Energiewende von hoher Relevanz sind wie zum Beispiel in der Elektromobilität und der Energieerzeugung durch Windkraft. Im Rahmen des GENESIS-Projektes wird das Recycling von NdFeB-Magneten über die pulvermetallurgische Route, d.h. Verpressung mit nachfolgendem Sintern, untersucht. Hierbei kommen unterschiedliche Sinterverfahren zum Einsatz. Das Ziel ist, aus den Altmagneten wieder NdFeB-Magnete zu erzeugen, die in den ursprünglichen Anwendungen zum Einsatz kommen können. Gelingt die zirkuläre Nutzung der metallischen Rohstoffe, könnten geopolitische Abhängigkeiten gegenüber Importländern reduziert, Energie im Vergleich zur Neusynthese der NdFeB-Legierung eingespart und primäre Ressourcen geschont werden (Bram und Martin 2021). Die Altmagnete sind in Abbildung 1 zu sehen. Das Zerkleinern der Magnete in einem Laborbackenbrecher liefert das pulverförmige Inputmaterial für die verschiedenen Sinterverfahren. Letztere stellen spezifische Anforderungen an die Korngrößenverteilung (KGV) des Magnetpulvers, die zur Zeit der Erstellung dieses Beitrages noch untersucht werden. Tendenziell erfordern die Sinterverfahren Körnungen kleiner 1,5 mm. Die NdFeB Legierung weist eine hohe Affinität zu Sauerstoff auf. Voruntersuchungen in Luftatmosphäre zeigten, dass das Magnetpulver zu glühen beginnt, wenn Sauerstoff und Aktivierungsenergie in Form von Zerkleinerungsarbeit eingebracht wird. Oxidische Verunreinigungen auf der Kornoberfläche behindern den Stromfluss während des Sinterprozesses und erschweren die erneute Magnetisierung. Um die Bildung von Oxiden zu vermeiden, werden im Rahmen des Projektes zwei Strategien verfolgt. Erstens wird die Zerkleinerung in einer Stickstoffatmosphäre betrieben, sodass Luftsauerstoff als Reaktionspartner nicht zur Verfügung steht. Zweitens soll der Energieeintrag durch die Zerkleinerung und damit die Verfügbarkeit von Energie für eine mögliche Oxidationsreaktion minimiert werden.



Abbildung 1: a. Altmagnete unzerkleinert; b. Oxidationsreaktion des Magnetpulvers; c. Magnete zerkleinert

Die im Folgenden vorgestellten Versuche dienen der Untersuchung des Einflusses von Maschinen- sowie Betriebsparametern auf die KGV. In Abhängigkeit der geforderten Zielkorngröße sollen Einstellungsempfehlungen für eine schonende Zerkleinerung, d.h. einer Zerkleinerung auf die entsprechende Zielkorngröße mit möglichst geringer Kornbeanspruchung, abgeleitet werden.

## 2 Versuchsaufbau, Durchführung und Methodik

Für die Zerkleinerung in Inertgasatmosphäre wurde eine 180 cm x 58 cm x 76 cm große Arbeitskammer konstruiert, die in Abbildung 2 dargestellt ist. Die relevanten Anlagenteile sind beschriftet und werden im Folgenden erläutert. Im rechten Teil der Arbeitskammer ist der Laborbackenbrecher (siehe Nummer 4) aufgestellt. Die Befüllung, Entleerung des Backenbrechers und die Siebung werden über die mit langen Handschuhen bestückten Eingriffe (siehe Nummer 5) realisiert. Der Siebturm ist im mittleren Teil der Kammer positioniert (siehe Nummer 3). Im linken Teil der Arbeitskammer befindet sich das Sauerstoffanalysegerät sowie der Rechner für die kontinuierliche Dokumentation. Der rote Punkt (siehe Nummer 2) markiert die fixe Position der Sonde, mit der Gas in das Analysegerät für die Messung der Sauerstoffkonzentration gesaugt wird. Eine definierte Menge Flaschengas wird, über den mit einem Kugelhahn verschließbaren Einlass (siehe Nummer 6) in die Arbeitskammer geleitet.

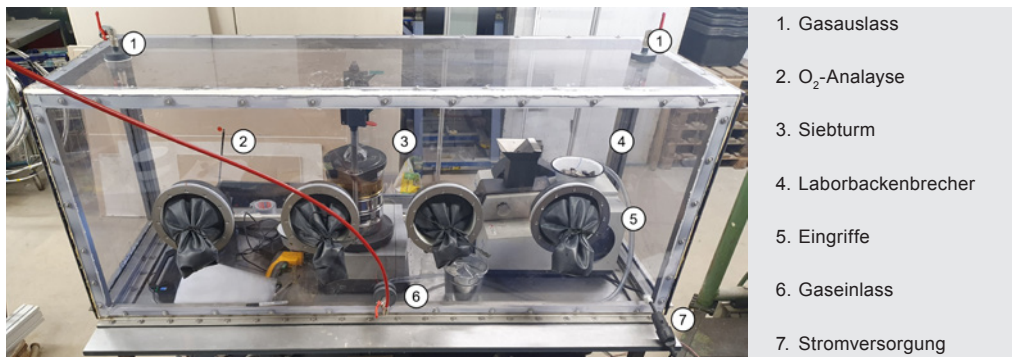


Abbildung 2: Prüfstand Magnetzerkleinerung

Für die Befüllung der Arbeitskammer mit dem Zerkleinerungsgut wird eine kurze Seite der Prüfstandseinhausung gelöst. Nach dem Einbringen aller Arbeitsutensilien wird die Arbeitskammer verschlossen und die Phase des Gasaustausches beginnt. Im Rahmen der hier vorgestellten Versuchsreihen wird Stickstoff

zur Erzeugung der Inertgasatmosphäre verwendet. In der Phase des Gasaustausches sind der Gaseinlass (siehe Nummer 6) sowie beide Gasauslässe (siehe Nummer 1) geöffnet und Stickstoff strömt in die Kammer. Sobald der Sauerstoffgehalt auf 3 % gesunken ist, werden die Gasauslässe geschlossen und die Stickstoffzufuhr auf wenige Liter pro Minute begrenzt. Da es nicht möglich war die Arbeitskammer unter vertretbarem Aufwand vollständig abzudichten, wird diese bei einem leichten Überdruck betrieben, um das Eindringen von Luftsauerstoff aus der umgebenden Atmosphäre zu verhindern. Die Magnete besitzen alle annähernd die gleichen Abmessungen von 40 mm x 18 mm x 3,5 mm und werden über den Einfülltrichter senkrecht in den Brechraum eingeführt. Das zerkleinerte Gut wird unterhalb des Brechraums in einer Schublade aufgefangen, die manuell entleert wird. Der Backenbrecher verfügt über ein Bedienfeld mit digitaler Anzeige, welches eine stufenlose Einstellung der Spaltweite und eine Veränderung der Drehzahl in Schritten von 50 1/min ermöglicht.

Als Indikator für die Kornbeanspruchung wurde im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse die KGV gewählt. Der Wahl liegt die Annahme zu Grunde, dass die Entwicklung eines hohen Feinkornanteils auf eine hohe Kornbeanspruchung bzw. einen hohen Energieeintrag durch die Zerkleinerung schließen lässt. Ziel des Versuchsplanes ist es, die Einflüsse der Faktoren Drehzahl, Spaltweite und Füllgrad auf die KGV isoliert voneinander abzubilden. Der Drehzahlbereich des Backenbrechers reicht von 550 1/min bis 950 1/min. Im Rahmen dieser Versuchsreihe werden die minimalen und maximalen Einstellungen der Drehzahl untersucht, um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Angesichts der Abmessungen der Magnete wurde die maximal einzustellende Spaltbreite auf 2,5 mm festgelegt. Für die Variation des Füllgrades wurden willkürliche Werte von einem, drei und fünf Magneten gewählt. In Tabelle 1 sind die Einstellung der Faktoren, die im Rahmen dieses Beitrages untersucht wurden und die entsprechende Bezeichnung des jeweiligen Versuches gelistet. Die Bezeichnung setzt sich aus der Nummerierung für Drehzahl und Spaltweite sowie der Anzahl der aufgegebenen Magnete zusammen. Diese Nomenklatur wird in der grafischen Darstellung der Ergebnisse wiederverwendet.

*Tabelle 1: Versuchsplan Magnetzerkleinerung*

Drehzahl in 1/min		Spaltweite in mm		Füllgrad in Anzahl Magnete			Bezeichnung des Versuches		
F1	550	1	0,5	1	3	5	F1.1.1	F1.1.3	F1.1.5
		3	1,5	1	3	5	F1.3.1	F1.3.3	F1.3.5
		5	2,5	1	3	5	F1.5.1	F1.5.3	F1.5.5
F5	950	1	0,5	1	3	5	F5.1.1	F5.1.3	F5.1.5
		3	1,5	1	3	5	F5.3.1	F5.3.3	F5.3.5
		5	2,5	1	3	5	F5.5.1	F5.5.3	F5.5.5

Für eine Drehzahl von 550 rpm wurden für die Spaltweiten 0,5 mm, 1,5 mm und 2,5 mm Füllgrade von jeweils einem, drei und fünf Magneten getestet. Analoge Versuche erfolgten bei einer Drehzahleinstellung von 950 1/min. Jede Versuchseinstellung wurde dreimal wiederholt. Für jeden Versuch wurde die KGV mit Hilfe einer Siebanalyse bestimmt. Folgende Siebschnitte wurden in Anlehnung an die DIN 66165 1 gewählt: 0,125 mm; 0,200 mm; 0,315 mm; 0,500 mm; 0,800 mm; 1,00 mm; 1,40 mm; 2,00 mm; 2,50 mm; 3,00 mm; 3,15 mm; 4,00 mm; 5,00 mm; 5,60 mm; 6,30 mm; 8,00 mm; 10,00 mm. Jeder Siebschnitt wies eine Quadratlochung auf. Aus den erhaltenen Massenanteilen wurden kumulierte Siebdurchgangslinien erstellt und ausgewertet.

### 3 Ergebnisdarstellung

Für die isolierte Betrachtung des Einflusses des Füllgrades wurden bei gleicher Drehzahl und Spaltweite ein Magnet, drei und fünf Magnete auf ein Mal in den Brechraum gegeben. Abbildung 3 zeigt die KGV in Anhängigkeit der Aufgabemenge, bei einer konstanten Spaltweite von 0,5 mm und einer konstanten Drehzahl von 550 1/min sowie 950 1/min.

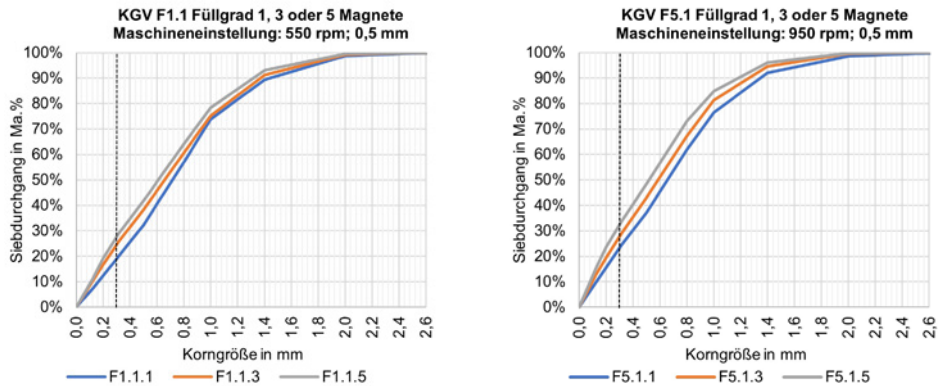


Abbildung 3: KGV bei konstanter Drehzahl und Spaltweite sowie variierender Aufgabemenge

Für die Diskussion der Ergebnisse wird der Durchgang bei einem Siebschnitt von 0,3 mm in Abbildung 3 durch eine gestrichelte schwarze Linie markiert betrachtet. Bei einer Drehzahl von 550 1/min, weist das Magnetpulver mit steigender Aufgabemenge einen höheren Feinkornanteil auf. Dies ist auch für eine Drehzahl von 950 1/min festzustellen. Im Vergleich zur Zerkleinerung von einem Magneten bei 550 1/min (F1.1.1) steigt der Anteil des Siebdurchgangs bei der gleichzeitigen Aufgabe von 3 Magneten (F1.1.3) um 5,71 Ma. %. Bei der gleichzeitigen Aufgabe von 5 Magneten (F1.1.5) steigt der Anteil des Siebdurchgangs im Vergleich zur Aufgabe von 3 Magneten um 3,22 Ma. %. Derselbe Vergleich (F5.1.1; F5.1.3; F5.1.5) für eine Zerkleinerung bei 950 1/min ergibt eine Steigerung von 4,69 Ma. % und 4,62 Ma. %.

Im Vergleich zu 550 1/min weist das bei 950 1/min zerkleinerte Magnetpulver unabhängig vom Füllgrad einen höheren Siebdurchgang auf. Bei der Aufgabe von einem Magnet steigt der Siebdurchgang um 4,55 Ma. %. Die Steigerung des Siebdurchgangs beträgt bei der Aufgabe von 3 Magneten 3,53 Ma. % und bei der Aufgabe von 5 Magneten 4,93 Ma. %.

In Abbildung 4 ist die KGV bei einem konstanten Füllgrad von 3 Magneten und variierender Spaltweite dargestellt. Die Siebdurchgangslinien in Blautönen (F1.1.3; F1.3.3; F1.5.3) zeigen die KGV für die Zerkleinerung bei 550 1/min und die Siebdurchgangslinien in den Farbtönen rot bis gelb (F5.1.3; F5.3.3; F5.5.3) zeigen diese für die Zerkleinerung bei 950 1/min.

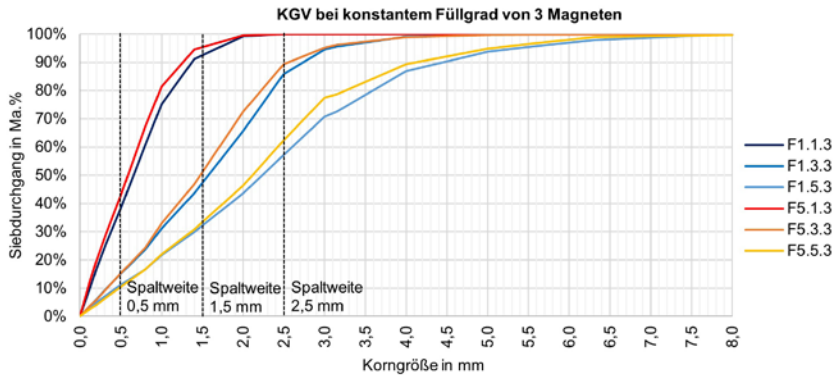


Abbildung 4: KGV bei konstanter Aufgabemenge von 3 Magneten und variierender Spaltweite (0,5 mm; 1,5 mm; 2,5 mm) sowie Drehzahl (550 1/min; 950 1/min)

Im Folgenden wird der Einfluss der eingestellten Spaltweite auf die KGV dargestellt. Die Spaltweite ist in Abbildung 4 mit einer schwarzen gestrichelten Linie gekennzeichnet.

Die KGV zeigt, dass circa zwischen 40 und 60 Ma. % des Magnetpulvers Abmessungen oberhalb der für die Zerkleinerung eingestellten Spaltweite aufweisen. Bei einer Spaltweite von 0,5 mm beträgt der Anteil des Durchgangs für einen Siebschnitt von 0,5 mm 38,33 Ma. % für eine Drehzahl von 550 1/min (F1.1.3) und 42,84 Ma. % und für eine Drehzahl von 950 1/min (F5.1.3). Der analoge Vergleich für eine Spaltweite von 1,5 mm ergibt einen Anteil des Siebdurchgangs von 43,63 Ma. % (F1.3.3) und 46,76 Ma. % (F5.3.3). Bei einer eingestellten Spaltweite von 2,5 mm zeigt die KGV, dass sich 57,18 Ma. % (F1.5.3) und 62,29 Ma. % (F5.5.3) im Siebdurchgang mit einer Maschenweite von 2,5 mm anreichern.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit zunehmender Spaltweite mehr Körner Abmessungen unterhalb der eingestellten Spaltweite aufweisen.

## 4 Auswertung

Die im Backenbrecher für die Zerkleinerung genutzte Beanspruchungsart ist die Druck Schubbeanspruchung. Dabei üben zwei Flächen Druck auf einen Partikel bzw. ein Partikelkollektiv aus. Die exzentrischer Bewegung der schwingenden Brechbacke sorgt für den Schub (Schubert 2003, S. 185).

Mit steigenden Drehzahlen pro Minute steigt die Feinkornentwicklung. Je höher die Drehzahl ist, desto häufiger öffnet und reduziert sich die Spaltweite auf den eingestellten Wert. Das Zerkleinerungsgut wird also häufiger, aber für eine kürzere Dauer der Beanspruchungsart Druck ausgesetzt. Ebenso häufiger, aber für eine kürzere Dauer hat ein Korn die Gelegenheit durch den geöffneten Spalt zu rutschen. Die Querschnittsfläche des Brechraumes ist kegelförmig und verjüngt sind in Richtung des Spaltes. Ist der Spalt nur für eine kurze Zeit geöffnet, kann diese Dauer für bereits zerkleinerte Körner nicht ausreichend sein, um von ihrer Position im Brechraum die Spaltöffnung zu erreichen und den Spalt schlussendlich zu passieren. In

der Konsequenz erfahren Körner, die die Spaltöffnung hinsichtlich ihrer Position bereits passieren könnten, eine weitere Druckbeanspruchung und werden dadurch kleiner als die Breite der Spaltöffnung zerkleinert.

Die KGV aus Abbildung 3 zeigt, dass der Feinkornanteil zunimmt, je mehr Magnete aufgegeben werden. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Körner im Brechraum den Brechwerkzeugen nicht als einzelne Körner präsentiert werden, sondern als Kollektiv. Der Druck wird dabei von der Brechbacke auf das direkt anliegende Korn übertragen. Dieses überträgt den Druck auf benachbarte Körner. Bei einem hohen Füllgrad im Brechraum werden mehr Körner einer Beanspruchung durch Druck von den benachbarten Körnern ausgesetzt. Das heißt die Zerkleinerung findet nicht nur in direkter Nähe der Spaltöffnung statt, sondern auch oberhalb des sich verjüngenden Brechraumes.

Dass der Feinkornanteil mit einer Reduzierung der Spaltweite steigt, ist ein gewünschter Effekt. Dieser erklärt sich damit, dass Körner in mindestens einer Dimension kleiner als die eingestellte Spaltöffnung sein müssen, um diese zu passieren. In Abbildung 4 wird ersichtlich, dass zwischen 40 bis 60 Ma. % der Körner größere Abmessungen als die eingestellte Spaltweite aufweisen. Die Spaltweite begrenzt die Maße der Körner in eine Dimension. Die Spaltbreite, die im vorliegenden Fall der Breite der Brechbacke entspricht, ist größer als die größte Abmessung der Magnete und beeinflusst das Zerkleinerungsergebnis nicht. In der Senkrechten begrenzt die Bauform des Backenbrecher die maximale Dimension der Körner ebenfalls nicht, sodass ein längliches 2D förmiges Objekt mit geringeren Abmessungen als die Spaltweite und die Spaltbreite, die Spaltöffnung theoretisch passieren könnte. Letzterer Aspekt gilt nur in der Theorie, da sich die Magnete spröde verhalten und daher auch durch Druck von den Seiten brechen. Die Quadratlochung des Analysesiebes begrenzt die Dimension von Partikeln in zwei Ebenen. Ein langes fadenförmiges Objekt könnte bei einem günstigen Auftreffwinkel auf eine Masche mit einer geringen Abmessung in den Siebdurchgang gelangen. Ein plättchenförmiges Korn, dass in einer Ausrichtung eine geringere Abmessung als die eingestellte Spaltweite aufweist und damit zurecht die Spaltöffnung passiert hat, ansonsten aber eine größere Abmessung als die Spaltweite besitzt, wird bei einer Siebung mit der entsprechenden Maschenweite im Siebrückstand angereichert. Des Weiteren können Körner deren geometrische Dimensionen die Spaltweite in jeder Richtung überschreiten beim Zurückschwingen der Brechbacke durch den geöffneten Spalt rutschen. Bei einer Siebung mit einem Siebschnitt, dessen Maschenweite der geschlossenen Spaltweite entspricht, werden diese Körner im Siebrückstand angereichert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen folgende Empfehlungen für die optimale Einstellung des Backenbrechers hinsichtlich des Zerkleinerungsziels zu: Hohe Füllgrade und hohe Drehzahlen führen tendenziell zu einer höheren Feinkornentwicklung. Sollte das Zerkleinerungsziel eine Begrenzung für den Feinkornanteil vorsehen, empfehlen sich geringe Drehzahlen und ein geringer Füllgrad. Die Untersuchungen zeigen, dass die Faktoren Drehzahl und Füllgrad die KGV signifikant beeinflussen. Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung ist nicht klar, ob die Entwicklung von Feinkorn ein sinnvoller Indikator für den Energieeintrag bei der Zerkleinerung ist, da die Oberflächenverunreinigungen durch Oxide noch nicht bestimmt wurden.



## Ausblick

Bei allen Zerkleinerungsversuchen, die diesem Beitrag zu Grund liegen, wurden unzerkleinerte Magnete aufgegeben. Zukünftige Untersuchungen könnten die Zerkleinerung von vorgebrochenen Magneten mit einer Spaltweite von 0,5 mm von beinhalten. Ein Vergleich könnte zeigen, ob eine Vorzerkleinerung die aus den finalen Maschineneinstellungen resultierende KGV beeinflusst. Des Weiteren könnte die Analyse der Temperatur des Zerkleinerungsgutes kurz nach dem Verlassen des Brechraumes ein Indikator für die Energieentwicklung während der Zerkleinerung sein. Eine Analyse des Energieverbrauchs des Backenbrechers während der Zerkleinerung könnte ebenfalls Rückschlüsse auf den Energieeintrag und die resultierende Kornbeanspruchung zulassen.

## Danksagung

Unser Dank gilt dem Projektträger Jülich und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, die diese Untersuchungen im Rahmen der Finanzierung des GENESIS Projektes (FKZ 03EI5009C) ermöglicht haben.

## Literatur/Quellen

Bram; Martin (2021): Vollantrag\_GENESIS\_Endversion.

Schubert, Heinrich (Hg.) (2003): Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik. Partikeleigenschaften, Mikroprozesse, Makroprozesse, Schüttgut. Weinheim: Wiley-VCH.

## Kontakt

*Anna-Caroline Assmann, M. Sc., Wissenschaftliche Mitarbeiterin*

RWTH Aachen / Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe

Tel.-Nr.: 0241-80-95717

E-Mail: [anna.assmann@ants.rwth-aachen.de](mailto:anna.assmann@ants.rwth-aachen.de)

Homepage: <https://www.ants.rwth-aachen.de/go/id/eeby/>



## Der „Gelbe 100-Teile-Sack“ – Probenchargen-Konzeption

**Abstract:** *Eine repräsentative Probencharge von Leichtverpackungen kann dazu verwendet werden, neue Sortiertechnologien mit realitätsnahen Probenmaterialien zu testen und zu validieren. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik, mit welcher der typische gelbe Sack in 100 Einzelteilen abgebildet werden kann. Als Datengrundlage wird hierfür eine 2019 durchgeführte Leichtverpackungsanalyse mit 21.380 Einzelteilen verwendet. Der eingesetzte Datensatz beschreibt sieben Verpackungseigenschaften mit zusammen 59 Ausprägungen und bildet so insgesamt 1.822 Kombination. Die Auswahl der 100 Einzelteile erfolgt in drei Varianten: Variante 1 verwendet die 100 häufigsten Kombinationen, Variante 2 zieht zufällig 100 Einzelteile und bei Variante 3 wird eine manuelle Auswahl vorgenommen. Für jede Variante wird ein Gesamtfehler bestimmt, um die Abweichung zum Ursprungsdatensatz zu beschreiben.*

### 1 Einleitung

Das deutsche Verpackungsgesetz fordert eine Erhöhung der Recyclingquote von Kunststoffen auf 65 Masseprozent zum Jahr 2022 (WDDb 2018; VerpackG). Über 30% der in Deutschland hergestellten Kunststoffe werden in Leichtverpackungen (LVP) eingesetzt (PlasticsEurope 2021), welche nach der Entsorgung über die Dualen Systeme eingesammelt und anschließend sortiert, aufbereitet und verwertet werden. Aktuelle Forschungsarbeiten und -projekte entwickeln verbesserte Sortiertechnologien für den LVP-Abfallstrom, um diesen einem höherwertigen Recycling zuzuführen. Beispiele für diese neuen Technologien sind Hyperspektral-Imaging-Technologien (Beel 2017), digitale Wasserzeichen (AIM o.J.), Tracer-Based-Sorting (Woidasky et al. 2020) oder Technologien basierend auf Objekterkennung (Recycleye o.J.). Die Mehrheit dieser neuartigen Sortiertechnologien befindet sich derzeit in der Prototypen-Phase. Um eine vergleichbare Bewertung der Leistungsfähigkeit neuer Sortier- und Verwertungstechniken zu ermöglichen, ist eine den typischen „gelben Sack“ repräsentierende Probencharge notwendig.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Zusammenstellung einer repräsentativen Probencharge der innerhalb Deutschlands entsorgten LVP, die lediglich 100 Einzelteile umfasst. Die Probencharge soll dabei den zugrundeliegenden Gesamtdatensatz aus der „Tiefencharakterisierung von Leichtverpackungen“ der Hochschule Pforzheim aus dem Jahr 2019 (Schmidt et al. 2021) in ihren Ausprägungen möglichst präzise beschreiben.

## 2 Methodik

Die Datengrundlage für die Erstellung der Probencharge bildet die Studie „Tiefencharakterisierung von Leichtverpackungen“ (Schmidt et al. 2021). In dieser Studie wurden in einem zweiwöchigen Zeitraum von Juli bis August 2019 LVP-Abfälle von insgesamt 249 deutschen Haushalten gesammelt und charakterisiert. Die Datenbasis umfasst 21.380 Einzelteile bzw. 207 kg Gesamtmasse. Es wurden über 20 verschiedene Verpackungseigenschaften erfasst, unter anderem die Masse, die Anzahl, das Packmittel mit dessen Werkstoff und Farben, die Füllgut-Typen sowie Etiketten-, Verschluss- und Überkappenvarianten. Um die repräsentative Probencharge zusammenzustellen, die aus Praktikabilitätsgründen lediglich 100 Einzelteile (Verpackungen) enthalten soll, werden aus den insgesamt 20 Verpackungseigenschaften sieben verschiedene Verpackungseigenschaften mit insgesamt 59 Ausprägungen ausgewählt (siehe Tabelle 1): Packmittel (21 Ausprägungen), Werkstoff (19) und Farbe (5) des Packmittels, Verpackungsabmessungen (5), Food-/Nonfood-Füllgüter (2) sowie das Vorhandensein von Etiketten/Bedruckungen (3) und Verschlüssen (2). Die Häufigkeiten dieser sollen durch die Probencharge möglichst präzise abgebildet werden.

Zur Bewertung der erstellten Probencharge wird der Gesamtfehler in Prozentpunkten berechnet. Dieser ist die Summe aller Abweichungen je Ausprägung. Beispielsweise beinhaltet der Datensatz 2,8% und die Probencharge 4,0% Flaschen, sodass die Abweichung für diese Ausprägung 1,2 Prozentpunkte beträgt.

Es werden drei Ansätze zur Probenzusammenstellung angewendet: Variante 1 verwendet die 100 anzahlreichsten Fraktionen, Variante 2 zieht zufällig 100 Einzelteile, wobei insgesamt 500 Ziehungen durchgeführt werden und die mit dem kleinsten Gesamtfehler ausgewählt wird, und Variante 3 erfolgt durch eine manuelle Auswahl der Einzelteile mit Hinblick auf die Minimierung des Gesamtfehlers. Neben den drei Varianten wird die theoretisch bestmögliche Zusammensetzung (Optimum) für jede einzelne Verpackungseigenschaft bestimmt und daraus der kleinstmögliche Gesamtfehler berechnet. Dieser bildet demnach die Summe aller Rundungsdifferenzen zum zugrundeliegenden Datensatz ab und beträgt 14,4 Prozentpunkte.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

Die systematische Auswertung der Merkmalsausprägungen aller untersuchten LVP zeigt, dass insgesamt 1.822 Kombinationen dieser sieben Verpackungseigenschaften nötig sind, um alle LVP zu beschreiben. Diese 1.822 möglichen Kombinationen werden anzahlbezogen priorisiert und die 100 häufigsten Kombinationen zur Zusammenstellung der Variante 1 (V1) verwendet. Die Erstellung der V1-Probencharge, bei der die 100 anzahlreichsten Fraktionen jeweils einmal vorkommen, resultiert in einem Gesamtfehler von 57,0 Prozentpunkten. In Variante 2 (V2) werden die Einzelteile zufällig gezogen. Diese V2-Probencharge beinhaltet 84 verschiedene Kombinationen und der Gesamtfehler beläuft sich auf 53,3 Prozentpunkte. Variante 3 (V3) umfasst 86 Kombinationen und erreicht einen Gesamtfehler von 18,5 Prozentpunkte. Die genaue Verteilung je Ausprägung für die verschiedenen Varianten ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Probencharge je Variante (V) und Verpackungsattribut

	LVP-Analyse	Optimum	V1: „Top 100“	V2: „Zufall“	V3: „Manuell“
N	21380	100	100	100	100
Gesamtfehler in Prozentpunkte		14,4%	57,0%	53,3%	18,5%
Kombinationen	1.822		100	84	86
<b>Packmittel (21)</b>					
Beutel	34,3%	34%	29%	34%	34%
Folie flächig	11,5%	12%	14%	10%	12%
Schale, Tray	10,1%	10%	10%	12%	10%
Separates Verschlusselement	8,7%	9%	8%	8%	10%
Becher	6,9%	7%	11%	8%	7%
Tüte	6,8%	7%	8%	9%	7%
Flüssigkeitskarton	4,7%	5%	5%	5%	5%
Flasche	2,8%	3%	3%	1%	3%
Dose	2,5%	2%	3%	2%	2%
Blister	2,5%	2%	4%	3%	2%
Nichtverpackungs-Artikel	2,1%	2%	0%	3%	2%
Skinverpackung	1,6%	2%	0%	1%	2%
Tube	1,2%	1%	1%	1%	1%
Netz	1,1%	1%	2%	1%	1%
Schachtel	1,0%	1%	1%	1%	1%
Restliche Kleinteile	0,9%	1%	1%	1%	1%
Starre Folie	0,5%	0%	0%	0%	0%
Sonstiges Verpackungselement	0,4%	0%	0%	0%	0%
Füllmaterial	0,3%	0%	0%	0%	0%
Wickelverpackung	0,1%	0%	0%	0%	0%
Verschraubter Tiegel	0,0%	0%	0%	0%	0%
<b>Werkstoff (19)</b>					
PP	25,8%	26%	26%	26%	26%
LDPE	10,8%	11%	11%	12%	11%
Multilayer	10,7%	11%	9%	12%	11%
PET	7,0%	7%	6%	9%	7%
Papier/Karton	6,0%	6%	7%	8%	6%
2V Kunststoff+Aluminium	5,6%	6%	6%	3%	6%
Sonstige-Kunststoffe	5,1%	5%	5%	5%	5%
HDPE	4,8%	5%	5%	5%	5%
Aluminium (Metall)	4,6%	5%	4%	4%	5%
Weissblech	4,1%	4%	6%	5%	5%
PS	4,0%	4%	5%	1%	4%

	LVP-Analyse	Optimum	V1: „Top 100“	V2: „Zufall“	V3: „Manuell“
3V Pappe/Papier+Metall+Kunststoff	3,6%	4%	4%	5%	4%
2V Papier/Karton + Kunststoff	3,0%	3%	2%	2%	2%
PVC	1,4%	1%	1%	0%	1%
2V Aluminium+Papier/Pappe	1,3%	1%	2%	0%	1%
Packstoff nicht bestimmbar	1,3%	1%	1%	2%	1%
Kunststoff+ Papier/Pappe unlamiert	0,5%	1%	0%	1%	0%
Sonstige Werkstoffe	0,2%	0%	0%	0%	0%
Papier/Karton (KEIN Verbund)	0,1%	0%	0%	0%	0%
<b>Packstoff-Farbe (5)</b>					
Transparent weiß	44,2%	44%	46%	38%	44%
Opak bunt	27,8%	28%	27%	40%	28%
Opak weiß	25,3%	25%	25%	22%	25%
Transparent bunt	1,4%	1%	0%	0%	1%
Schwarz und Tiefschwarz	1,3%	1%	1%	0%	1%
<b>Verpackungsabmessung (5)</b>					
kleiner A4	85,8%	86%	87%	87%	86%
kleiner A3	7,6%	8%	7%	9%	8%
kleiner 50x50 mm	4,5%	4%	4%	2%	4%
größer A3	1,6%	2%	1%	1%	1%
kleiner 20x20 mm	0,5%	0%	0%	1%	0%
<b>Food-/Nonfood-Füllgüter (2)</b>					
Food	67,7%	68%	70%	68%	68%
Non-Food	32,3%	32%	30%	32%	32%
<b>Vorhandensein von Etiketten/Bedruckungen (3)</b>					
Direktbedruckung	55,4%	55%	53%	66%	55%
Etikett vorhanden	23,6%	24%	23%	18%	23%
kein Etikett vorhanden	21,1%	21%	23%	16%	21%
<b>Vorhandensein von Verschlüssen (2)</b>					
kein Verschluss vorhanden oder vorgesehen	67,1%	67%	69%	67%	67%
Verschluss vorhanden	32,9%	33%	30%	33%	32%

V1 hat den Vorteil, dass diese die am häufigsten auftretenden Kombinationen beinhaltet. Dies wird bei der „manuellen“ V3 nur bedingt und bei V2 aufgrund der zufälligen Objektziehung überhaupt nicht berücksichtigt. Andererseits bildet V1 den zugrundeliegenden Datensatz mit einem Gesamtfehler von 57,0 Prozentpunkten am schlechtesten ab, jedoch hat V2 auch nur einen geringfügig geringeren Gesamtfehler. V3 erreicht mit 18,5 Prozentpunkten den kleinsten Gesamtfehler und ist nur 4,1 Prozentpunkte vom Optimum entfernt. Dieser Ansatz ist aufgrund der manuellen Auswahl jedoch nur bedingt reproduzierbar.

## 4 Fazit

Die Unterschiede in den Ergebnissen der drei Varianten zeigen, dass die Methodik zur Auswahl der Einzelteile vom verfolgten Ziel der Probencharge abhängig sein sollte. So repräsentiert V1 beispielsweise die größte Vielfalt an Kombinationen, während V3 den zugrundeliegenden Datensatz am präzisesten beschreibt. Die Zusammenstellung einer repräsentativen Probencharge erfordert demnach die genaue Formulierung des Zwecks. Neben den hier vorgestellten Varianten gibt es weitere Möglichkeiten Probenchargen zusammenzustellen, welche wiederum anderweitig verwendet und zur Beantwortung spezifischer Fragestellungen herangezogen werden können.

Die hier für den Gesamt-LVP-Datensatz vorgestellten Ansätze zur Auswahl von Probenchargen können einfach auf Teilchargen transferiert werden, um z. B. nur Kunststoffverpackungen oder Verpackungen mit bestimmten Füllgütern (z. B. Milchprodukte) näher zu untersuchen. Einen weiteren Ansatz stellt die Erstellung einer Probencharge basierend auf dem Gewicht der Einzelteile dar, was massenbasierte Auswertungen erlaubt.

Mithilfe von repräsentativen Probenchargen können alle abfallwirtschaftlichen Schritte bis hin zur vollständigen Kreislaufschließung mit realitätsnahen Probenmaterialien und mit angemessenem Versuchsaufwand getestet und verglichen werden. Sie sind damit u.a. auch für Demonstrations- sowie Ausbildungszwecke oder Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit gut geeignet.

## Literatur/Quellen

- AIM – European Brands Association (AIM) (Hg.) (o.J.): Digital Watermarks Initiative HolyGrail 2.0. Online verfügbar unter <https://www.digitalwatermarks.eu/>, zuletzt geprüft am 12.01.2023.
- Beel, H. (2017): Sortierung von schwarzen Kunststoffen mit Hyperspectral-Imaging-Technologie. In: K.J. Thomé-Kozmiensky, S. Thiel, E. Thomé-Kozmiensky und D. Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin: TK-Verlag, S. 175–191.
- PlasticsEurope (2021): Geschäftsbericht 2020. Hg. v. PlasticsEurope Deutschland e. V. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter <https://plasticseurope.org/de/knowledge-hub/geschäftsbericht-2020/>, zuletzt geprüft am 12.01.2023.
- Recycleye (Hg.) (o.J.): Recycleye Webseite. Online verfügbar unter <https://recycleye.com/de/>, zuletzt geprüft am 06.10.2022.
- Schmidt, J.; Auer, M.; Moesslein, J.; Wendler, P.; Wiethoff, S.; Lang-Koetz, C.; Woidasky, J. (2021): Challenges and Solutions for Plastic Packaging in a Circular Economy. In: Chemie Ingenieur Technik 93 (11), S. 1751–1762.
- VerpackG: Gesetz zur Fortentwicklung der haushaltsnahen Getrennterfassung von wertstoffhaltigen Abfällen. In: Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2017, Teil 1 Nr. 45, S. 2234–2261.
- Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages (WDDb) (2018): Neuregelungen durch das Verpackungsgesetz gegenüber der Verpackungsverordnung. Hg. v. Deutscher Bundestag.
- Woidasky, J.; Moesslein, J.; Wendler, P.; Kirchenbauer, D.; Wacker, D.; Gao, G.; Lang-Koetz, C. (2020): Kunststoffidentifikation und -sortierung in der Circular Economy durch Fluoreszenzmarker. In: Chemie Ingenieur Technik 92 (4), S. 1–12.

## **Kontakt**

*M.Sc., Maximilian Auer, wissenschaftlicher Mitarbeiter*

Hochschule Pforzheim, Fakultät für Technik, Arbeitsgruppe Nachhaltige Produktentwicklung

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

E-Mail: [maximilian.auer@hs-pforzheim.de](mailto:maximilian.auer@hs-pforzheim.de)



## A systematic review on Carbon Credits

**Abstract:** *In the last 20 years there has been a growing need for climate mitigation strategies. Starting with the Emission Trading in the Kyoto protocol in 1997, the concept of a carbon market arose. Carbon markets opened an avenue giving countries and businesses an opportunity to trade their emissions as a commodity. The Paris agreement has further acted as an incentive. This led to the introduction of the Carbon Credit. A single carbon credit has been defined as one ton of equivalent CO<sub>2</sub>, strategies to calculate a baseline for emissions and crediting systems followed. However, currently we still lack a universal method of estimation. There have been efforts by the UNFCCC's clean development mechanism, IPCC and the private sector to develop calculation mechanisms. Despite this, there have been issues in the credibility of these credits. With the Introduction of the non-compliance market there has been a growth of carbon credits in the voluntary markets. This leads to the basic question: Do scientific articles give insight into the existing carbon credit market? The presented study aims to answer the question, using the PSALSA method of systematic review analysis.*

### 1 Introduction

At present, we are in the fourth phase of fighting climate change. In the last decade, there has been a significant development in creating institution and regulating bodies for climate justice. It began with the establishment of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) in 1988 ("History of the IPCC" 1988). The IPCC is responsible for providing scientific data on climate change to governments and policy makers. The IPCC report published in 1990 suggested that climate change was real and could have devastating impacts on human life (Bajaj 2022). Based on this report at the Earth Summit of 1992, within the "Rio Conventions" the General Assembly of the United Nations established the Intergovernmental Committee of Negotiation, responsible for development of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (Godoy and Saes 2015; "The Rio Conventions" 1992). In the UNFCCC, which is also regarded as "The convention", it is noted that the historical share of greenhouse gas emissions originated in developed countries and that the share of GHG emissions in developing countries was low and would grow. It also recognised that developed countries were to take immediate action while developing countries were dependent on fossil fuels and needed resources to sustainable social and economic development ("United Nations Framework Convention on Climate Change" 1992). The UNFCCC commitments helped in dividing the countries into groups, Annex I the industrialized countries, members of the OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) in 1992, plus countries with economies in transition (the EIT Parties), including the Russian Federation, the Baltic States, and several Central and Eastern European States. There exists a second Annex II, which contains parties from Annex I excluding EIT parties. They were encouraged in providing financial aid to developing countries. Annex II was aiming at "practicable

steps" to increase the transfer and development of environmentally friendly technologies in EIT parties and developing countries (UNFCCC n.d.). An initial goal was to reverse the GHG emissions to 5 percent below 1990 levels by 2000 at the UNFCCC or the first meeting of what came to be known as the COP (conference of parties) in 1995. This led to a first climate agreement at COP 3, the Kyoto Protocol (KP). It was adopted in 1997 and enforced in 2005. The countries given in Annex 1, were legally obliged in taking steps to reduce their emissions. The KP brought the concept of units. Parties were allocated emission allowances, based on their emission targets given in annex B and the emissions from the chosen base for the first 5 years lasting between 2008 to 2012. Each allowance was referred to as "assigned amount units" (AAUs), each AAU represented one metric tonne of carbon dioxide equivalence ( $\text{tCO}_2\text{eq.}$ ). Within the Land Use Land Use Change and Forestry (LULUCF) it was mandatory for parties to report and account activities mentioned in article 3, paragraph 3 while activities mentioned in paragraph 4 were optional. LULUCF activities could provide emissions removal units or RMU's. RMU's could be added to the existing AAU's (UNFCCC, 2018). Besides, the KP had other mechanisms, under article 12 the Clean Development mechanism, under article 6 the Joint Implementation and under article 17 emission trading. These mechanisms provided countries flexibility in investing in lower cost emission reduction opportunities outside of their jurisdiction. However, to be eligible to participate in the mechanisms, countries were required to meet certain requirements stated in article 5 paragraphs 1 and 2, and article 7 paragraphs 1 and 4. Through the CDM, a project-based mechanism countries could claim "certified emission reductions". Two types of CER's exist, tCERs, or temporary CERs issues through afforestation and ICER's through reforestation. In the JI mechanism, parties belonging to Annex 1 could invest in emission reduction or removal projects happening in other Annex 1 parties. The units associated with JI were termed as emission reduction units or ERU. Though the ERUs were converted from existing AAUs and RMUs prior to the transfer. JI did not increase the reduction of emissions but only re-distributed the units. Together all the units mentioned were called the Kyoto Units. Finally, emission trading within KP, Annex 1 parties could implement their domestic or regional schemes. A minimum of units was required to be held by the national registry in its commitment period reserve. The trades needed to be reflected in the KP accounting (UNFCCC 2018).

In the context of EU, Calel 2013 and Sato et al.2022 explain the history and origins of emission trading in Europe. The EU Emission trading scheme was adopted in July 2003 and launched in 2005 (Calel, 2013). The ETS has often been associated with the phrase "cap and trade" suggesting a cap on the number of emissions on large facilities (power plants and industrial facilities) that met specific production capacity criteria. Each of the EU members states needed to develop a national allocation plan (NAP) that establishes the amount of GHG allowances or European Union Allowances (EUAs). A single EUA permits its owner to emit 1 ton of  $\text{CO}_2$  (Sato et al., 2022). Sato et al., 2022, explains that the EU ETS was applied in phases, the second phase coincided with the first commitment period of the KP. The EU ETS commission brought about a linking directive that determined the relationship between the two, thus providing a platform for trade (Godoy & Saes, 2015). The EU ETS helped in unification of climate policy, which the carbon tax was not able to achieve (Calel, 2013). The first commitment period of the KP came to an end in 2012. At COP18 the second commitment for the KP aimed to reduce the emissions by 18% during this period. The Doha Amendment was adopted that would last until 2020 (Thakur 2021; Bajaj 2022). Despite the legal obligations set by the KP, it did not succeed as one hoped. The UNFCCC was pushed to create a more flexible, non-binding agreement. The purpose of PA was reframing the goals of KP based on the discussions at Copenhagen Paris Agreement, stated that each party would communicate and maintain successive nationally determined contributions that each intended to achieve. Parties shall pursue domestic mitigation measure with the aim of achieving the objective of contributions. The Paris agreement adopted in 2015

and in force since 2016, superseded the KP. Introducing a term Nationally determined contributions which are voluntary commitments by countries. NDC are not necessarily specified as emission reduction targets. Details of the NDCs and its trade are given in article 6 of the Paris agreement, providing a framework for linking with emission trading schemes (Verde and Borghesi 2022).

This trade of emission has given birth to a new currency called as the Carbon Credit. A carbon credit can be calculated based on the amount of GHG emissions released and converting it to a unit of CO<sub>2</sub> equivalence. Over the last years, the system has faced severe criticism. However, this has not hindered the development of a \$175 billion carbon market (Calel 2013). Several measures have been taken by private as well as governmental bodies to regulate the trade of emissions. The question remains whether have these policies made a difference in reducing climate change. An important task that comes with carbon trading is verification and validation of the carbon credit. Investors invest in projects that promise certain amount of reduction of emissions. At the start of the project estimations are made. The estimated reduction in emission is now owned by the investor. The investor may use this reduction for trading. Yet who is to confirm whether the emission reduction promised by the project was successful and the methodologies used were sufficiently researched? Without proper and scientifically approved verification, this might create an illusion of emission reduction. In turn, this might have a negative impact on the climate.

To better understand the system from a scientific point of view, a systematic review is being conducted to highlight the various sectors and actors involved within the frame of the European Union.

## 2 Material and Methods

A systematic review is being performed in the methods suggested by (Mengist, Soromessa, and Legese 2020). The PSALSAR method includes six steps. The first step entitled, "research protocol" suggests defining the scope of the study. In the present study, the evolution of the carbon credit within the EU. The second step was to identify search terms and create a search string that would find articles related to the context of carbon credits. "Clarivate Web of Science. © Copyright Clarivate 2022" was used as the search tool. When identifying search terms, synonyms of the topic were also accounted for and included in the search using the combination operator "OR" in between, See Table 1. To restrict the search to within the EU, every search performed was combined with the terms EU OR "European Union". A date range was set from 01-01- 1900 to 31-12-2021, to include all articles that were published before and after the several climate agreements. The search was performed in separate steps with a select few terms, keeping synonyms of "carbon credit" and "European Union" constant. This helps reflect which terms are more likely to be used. Number of articles within each search were recorded. The list of articles extracted were further combined and cleaned for duplicates. A final list of articles was used for screening. In the third step of "appraisal", exclusion and inclusion criteria were defined. The screening was divided into several steps. The initial screening began with segregating the literature into research articles and case studies. The research articles were further screened by reading the title and abstract, articles that were only in the context of the EU were included. Articles that were not in the scope of EU, in languages other than English, with insufficient references (less than 10), or not from peer reviewed journals were exclude. This helped in maintaining the quality of literature. Included articles were screened and categorised in groups by reading the abstract, as the fourth step of "synthesis". This step has only been performed for the journal articles; case studies are yet to be categorised. The last two steps of "analysis" and "reporting" remains to be conducted. To showcase the

different keywords/topics found in our study a preliminary bibliometric network is showcased in Fig. 1 created using VOS viewer (van Eck and Waltman 2017).

### 3 Results and Discussion

The preliminary results for the first four steps in PSALSAR have been presented below. In Table.1 the selected search terms have been showcased. For the search term “carbon credit” other terminologies that may be used by authors were included. In relation to carbon credits other search terms that are relevant to the topic at hand were also considered. It is apparent that in the last years, amount of scientific research on verification, validation, calculation procedures on the carbon credit is marginal. A bibliometric network is presented in Fig 1. The figure indicates the several terms used within literature associated with carbon credits. The hope of this study is to bridge the gap between policies and scientific procedures, that could eventually help streamline the trade of carbon credits.

*Table 1. Search term combination with the number of Journal Articles and Review Articles found.*

Search Term Combinations			Journal Articles	Review Articles
„carbon credit“ OR „verified carbon“ OR „verified emissions“ OR „verified carbon standard“ OR „certif* carbon“	“European Union”	Method* OR calculat*	32	2
		„carbon sink“ OR „c\$sink“	3	1
		„carbon offset*“	5	2
		„Clean Development Mechanism“ OR CDM	19	2
	OR  EU	„carbon remov*“ OR „carbon sequestration“ OR „carbon capture“	16	2
		„carbon account*“	105	6
		„emission trad*“ OR ETS	48	4
		„carbon market\$“	31	5
		„voluntary carbon market*“	0	0
		„carbon avoid*“	0	0
		legislation OR polic* NOT Police OR government* OR scheme\$ OR legal*	62	6

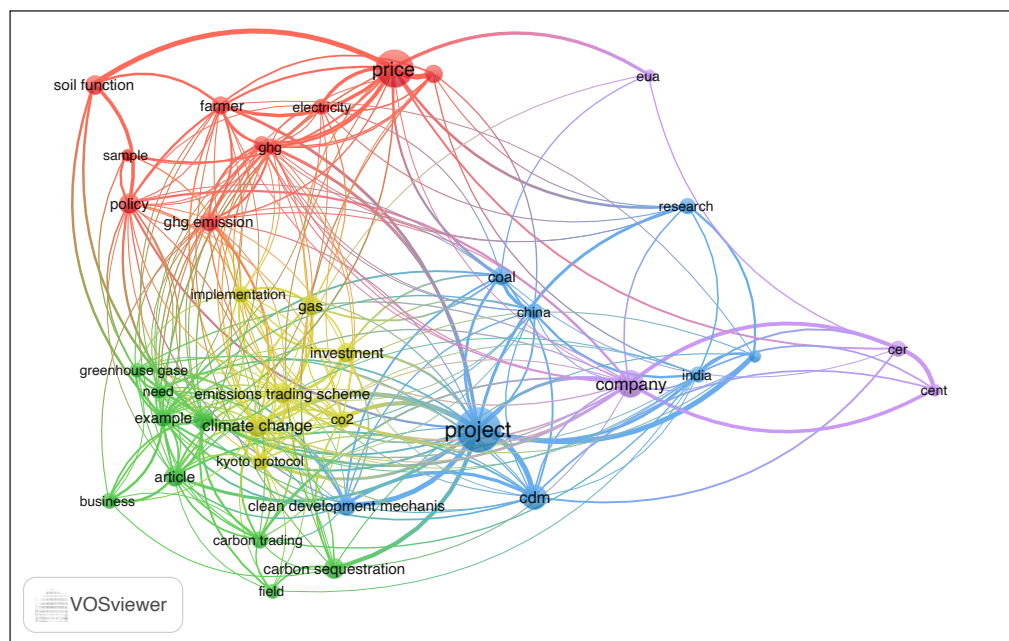


Figure 1. A preliminary bibliometric network prepared using VOS viewer.

## 4 Outlook

In the coming months we hope to complete the proposed research. We aim to be able to analyse and to present not only the articles found through the systematic research, but also methodologies published by private companies and the IPCC. Such an integrated analysis could help better understand the fate of the Carbon Credit in the near future.

## Literature

- Bajaj, Jasmeet Singh. 2022. "Carbon Credit and Climate Change Nexus." In *Climate Change: The Social and Scientific Construct*, edited by Suhaib A. Bandh, 235–58. Cham: Springer International Publishing.
- Calel, Raphael. 2013. "Carbon Markets: A Historical Overview." *Wiley Interdisciplinary Reviews. Climate Change* 4 (2): 107–19.
- Eck, Nees Jan van, and Ludo Waltman. 2017. "Citation-Based Clustering of Publications Using CitNetExplorer and VOSviewer." *Scientometrics* 111 (2): 1053–70.
- Godoy, Sara Gurfinkel Marques de, and Maria Sylvia Macchione Saes. 2015. "Cap-and-Trade and Project-Based Framework: How Do Carbon Markets Work for Greenhouse Emissions Reduction?" *Ambiente & Sociedade* 18 (1): 135–54.
- "History of the IPCC." 1988. History - IPCC. 1988. <https://www.ipcc.ch/about/history/>.

- Sato, M., R. Rafaty, R. Cael, and M. Grubb. 2022. "Allocation, Allocation, Allocation! The Political Economy of the Development of the European Union Emissions Trading System." *WILEY INTERDISCIPLINARY REVIEWS-CLIMATE CHANGE* 13 (5). <https://doi.org/10.1002/wcc.796>.
- Thakur, Saurabh. 2021. "From Kyoto to Paris and Beyond: The Emerging Politics of Climate Change." *India Quarterly* 77 (3): 366–83.
- "The Rio Conventions." 1992. The Rio Conventions | UNFCCC. June 1992. <https://unfccc.int/the-rio-conventions>.
- UNFCCC. 2018. "Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amounts."
- . n.d. "Parties & Observers." Accessed January 10, 2023. <https://unfccc.int/parties-observers>.
- "United Nations Framework Convention on Climate Change." 1992. [https://unfccc.int/Sites/Default/Files/Convention\\_text\\_with\\_annexes\\_english\\_for\\_posting.Pdf](https://unfccc.int/Sites/Default/Files/Convention_text_with_annexes_english_for_posting.Pdf). [https://unfccc.int/sites/default/files/convention\\_text\\_with\\_annexes\\_english\\_for\\_posting.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/convention_text_with_annexes_english_for_posting.pdf).
- Verde, Stefano F., and Simone Borghesi. 2022. "The International Dimension of the EU Emissions Trading System: Bringing the Pieces Together." *Environmental & Resource Economics* 83 (1): 23–46.

## Kontakt

M.Sc. Savannah Baptist, Akademische Mitarbeiterin  
Brandenburgische Technische Universität  
Tel.-Nr. +49 (0)355 69 3601  
E-Mail: [savannah.baptist@b-tu.de](mailto:savannah.baptist@b-tu.de)  
Homepage: <https://www.b-tu.de/fg-kreislaufwirtschaft/>

## Acidogenese Manipulator – AcidManip

### Entwicklung eines zweistufigen anaeroben Biogasverfahrens zur gezielten Produktion von Propion- und Buttersäure mittels Manipulation metabolischer Routen in komplexen Prozessbiozöosen

**Abstract:** *Um die anaerobe Vergärung zu einer selbsttragenden Technologie zu machen (bisheriger monetärer Ausgleich durch EEG), sind technologische und konzeptionelle Weiterentwicklungen notwendig. Ein besonders vielversprechender Ansatz zur Erzeugung wertvoller Nebenprodukte ist der Einsatz von zweistufigen Fermentern mit einer separaten Versäuerungsstufe. Die saure anaerobe Vergärung ermöglicht die Anreicherung von kurzkettigen Fettsäuren (C2 - C5), die wichtige Plattformchemikalien für die chemische Industrie sind [Uludag-Demirer et al., 2019]. Im Projekt AcidManip sollen erstmals neben Methan auch Propion- und Buttersäure produziert und extrahiert werden. Es soll zukünftig möglich werden, anstelle von Reinkulturen wie Clostridium beijerinckii [Qureshi & Blaschek, 2001], die aufgrund der hohen Kosten nicht konkurrenzfähig sind, sekundäre Wertstoffe aus anaeroben Mikrobiomen zu gewinnen.*

#### 1 Einleitung

Die Verwertung von biogenen Reststoffen mit Hilfe industrieller Biogasanlagen ist eines der Standbeine für eine zukünftige Energieversorgung, die weitestgehend auf regenerativen Energien beruht. Das Bewusstsein in der Bevölkerung für alternative Wege der Energie- und Wertstoffbereitstellung ist in den letzten Jahren erheblich angestiegen, was sich z.B. in der aktuellen *Fridays for Future* Bewegung oder in den Protestbewegungen gegen Braunkohle zeigt. Auch politisch besteht ein großes Interesse an Alternativansätzen zur Bereitstellung von Energie und Wertstoffen. Diese Aussage wird unter anderem durch das Umweltbundesamt gestützt, insbesondere im Hinblick auf die Pariser Klimarahmenkonvention, das Kyoto-Protokoll oder die Formulierung der Europäischen Energie- und Klimaziele [Umweltbundesamt, 2022].

Butter- und Propionsäure werden in aufwendigen Reinkulturen fermentativ durch die Vergärung von Zucker und Stärke hergestellt. Dafür werden Clostridien verwendet, welche auch im Kontext der anaeroben Abfallvergärung vorkommen. Der jährliche Bedarf beider Säuren wurde für 2027 mit Marktvolumina im dreistelligen Millionen- bis hin zu einstelligen Milliardenbeträgen prognostiziert [Markets And Markets Research, 2022; Industry ARC, 2019]. Durch die gezielte Produktion und Ausschleusung dieser kostbaren Wertstoffe kann die Wertschöpfung biologischer Vergärungsanlagen gesteigert werden.

Zentrale Herausforderung ist die Komplexität des heterogenen Mikrobioms. Es gilt daher geeignete Möglichkeiten für die gezielte Manipulation der Wachstumsgemeinschaften zu finden. In der Versäuerungsstufe sollen säureproduzierende Organismen bevorzugt werden. In der Methanisierung benötigt es wiederum Bakterien und Archaeen, welche auf den Abbau hoher Restkonzentrationen der organischen Säuren spezialisiert sind. Für die Manipulation der Versäuerungsstufe sollen mehrere Ansätze getestet und kombiniert werden. Hitzeschocks des Substrats können die Population methanogener Archaeen deutlich minimieren. Diese sind, im Gegensatz zu den säureproduzierenden Clostridien, nicht in der Lage Sporen zu bilden, um die hohen Temperaturen zu überleben. Es entsteht ein Wachstumsvorteil für die Clostridien und der Abbau der Säuren durch die Methanbildner wird minimiert. Das Modell der thermodynamischen Lücke [Harper & Pohland, 1986] beschreibt, unter welchen Wasserstoffpartialdrücken größere Mengen an Propion- und Buttersäure gebildet werden können. Das thermodynamische Fenster für den energiegewinnenden Abbau der Propionsäure liegt zwischen 0,001 mbar und 0,1 mbar. Der Buttersäureabbau hingegen ist auch bei Wasserstoffpartialdrücken bis zu 1 mbar möglich [Liebrich, 2016].

Ausgehend von der thermodynamischen Lücke sollte es möglich sein, durch genaue Einstellung des Wasserstoffpartialdrucks zwischen einer erhöhten Produktion von Propion- und Buttersäure zu wählen. Der hierfür benötigte Wasserstoff kann von der Hydrolysestufe selbst produziert und nach dem Prinzip einer Gasfermentation im Reaktor recirkuliert werden. Durch Optimierung der Wasserstoffproduktion kann somit auch eine Steigerung der Säureausbeuten erreicht werden.

## **2 Methodik**

### **2.1 Vorversuche zur Wasserstoff- und Säureanreicherung**

Im Rahmen der Vorversuche wurden mehrere Batch-Versuche im Labormaßstab durchgeführt. Als Substrat wurde Faulschlamm einer regionalen Kläranlage für kommunale Abwässer genutzt. Das Substrat wurde vor Einbau auf mindestens 80°C (bis maximal 90°) in einer Mikrowelle erhitzt. Eine nicht hitzegeschockte Kontrolle diente in jeder Versuchsreihe als Vergleichsgrundlage. Ziel der Vorversuche war es, die Fütterungsmenge und Auswirkungen des Mikrowellenhitzeschocks zu ermitteln und zu vergleichen.

Als Fütterungssubstrat wurde direkt zu Beginn der Versuche Saccharose in je drei unterschiedlichen Konzentrationen (50 g/l, 75 g/l und 100 g/l) eingebracht. Die Versuchsdauer betrug sieben Tage. Für das Eingangssubstrat wurde die Konzentration der organischen Säuren (Butter-, Propion-, Ameisen-, Milch-, Essig-, Valerian- und Iso-Buttersäure), Stickstoff (TKN), chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), Schwermetalle sowie pH und Redoxpotential ermittelt. Bis auf die Schwermetalle wurden die gleichen Parameter auch im Ausgangssubstrat analysiert. Entstehendes Biogas wurde in Gassäcken gesammelt und anschließend die CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und O<sub>2</sub> Konzentrationen mit Hilfe eines Dräger X-AM 8000 bestimmt. Der H<sub>2</sub> Volumenanteil im Gas wurde als Differenz zu 100%, basierend auf den zuvor gemessenen Gasen bestimmt.

### **2.2 Demonstratorversuche zur wählbaren Produktion von Butter- oder Propionsäure**

Die Versuche werden im mesophilen Temperaturbereich (35-38°C) durchgeführt. Im späteren Verlauf der Forschung ist auch eine thermophile Prozessführung geplant. Als Reaktor kommt ein eigens designer PVDF-Rundbehälter mit 12,2 Liter Volumen zum Einsatz. Das Material ermöglicht es, den gesamten Reaktor in



einer Mikrowelle hitzezuschocken. Über einen Controller wird der pH-Wert dauerhaft auf pH 6-7 eingestellt und die Fermentationsflüssigkeit wird über einen Perkolattank im Kreislauf gepumpt. Es erfolgt eine ständige Aufzeichnung der  $H_2$ ,  $CH_4$  und  $CO_2$  Konzentrationen im Biogasstrom, mittels BlueVary Gastechnik der Firma BlueSens GmbH. Als Inokulum wird Faulschlamm aus einer regionalen Kläranlage für kommunale Abwässer verwendet. Zur Einstellung des Partialdrucks wird mit Hilfe einer peristaltischen Pumpe Wasserstoff in die flüssige Phase injiziert. Das Fermentationsmaterial wird gleich zu Beginn der Fermentation einem Mikrowellen-Hitzeschock ( $80^\circ C$ ) unterzogen. Durch Aufwuchskörper soll den Mikroorganismen zunächst zusätzliche Fläche geboten werden. Später wird außerdem festes Gärmaterial (ähnlich zur Garagenfermentation) in einer Gitterbox in den Reaktor eingebaut. Die Versuche werden als Batch-Durchläufe angesetzt, um das Garagenverfahren als Demonstrator im Labormaßstab nachzuahmen. Für das Inokulum sowie das finale Gärsubstrat werden organische Säuren (Butter-, Propion-, Ameisen-, Milch-, Essig-, Valerian- und Iso-Buttersäure), Stickstoff (TKN), chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) sowie pH und Redoxpotential analysiert. Regelmäßig werden Proben zur 16s-rRNA Sequenzierung genommen und so das vorherrschende Mikrobiom bestimmt.

### 3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Vorversuche werden im Folgenden dargestellt. Durch den Hitzeschock ist es in allen Versuchen gelungen die Methanproduktion vollständig zu unterbinden. Lediglich in den unbehandelten Versuchsansätzen wurde Methangas produziert. Eine weitere Folge der Hitzebehandlung war eine deutlich gesteigerte Wasserstoffproduktion. Das Biogasgemisch bestand fast ausschließlich aus Wasserstoff und  $CO_2$ . Mit einer Fütterungsmenge von 50 g Saccharose pro Liter Substrat, konnten die höchsten Wasserstoffausbeuten erzielt werden. Es wurden im Median 0,57 mol  $H_2$  pro mol Hexose erbeutet (0,22 mol  $H_2$ /mol Hex ohne Hitzebehandlung). Der Wasserstoffanteil lag sowohl bei 50 als auch 75 g Sacc./l im Median bei 40,0 Vol%, während in unbehandelten Versuchen maximal 24,0 Vol% (mit 50 g Sacc./l) erreicht werden konnten. Durch den Hitzeschock wurde die Wasserstoffmenge in Versuchen mit 50 g Sacc./l um die 2,6-fache Menge gesteigert.

In den hitzebehandelten Versuchen wurde die Säureproduktion ebenfalls deutlich verbessert. Es ist gelungen, in den Vorversuchen (mit 50 g Sacc./l) Buttersäurekonzentrationen im Median von 7,254 g/l zu produzieren. Dies entspricht einem Anteil von 22,2% an den gemessenen organischen Säuren. Neben Buttersäure bestand das Säurespektrum hauptsächlich aus Ameisensäure (17,139 g/l) und Essigsäure (4,289 g/l).

Der Anteil der Propionsäure am Säurespektrum war mit rund 0,3 % in der unbehandelten Kontrolle (mit 50 g Sacc./l) verschwindend gering. Generell ist es in den Vorversuchen nicht gelungen nennenswerte Mengen Propionsäure zu produzieren (Maximum 0,143 g/l; mit 75 g Sacc./l, unbehandelt).

Die Ergebnisse legen nahe, dass durch die gesteigerte Wasserstoffproduktion auch der Wasserstoffpartialdruck im Gärmedium höher war und dadurch die Produktion der Säuren allgemein verstärkt wurde. Vom erhöhten Wasserstoffpartialdruck profitierte die Anreicherung von Buttersäure, die Produktion von Propionsäure wurde unter diesen Bedingungen jedoch stark gehemmt. Es scheint durch den Hitzeschock gelungen zu sein, die methanogenen Archaeen zu eliminieren, wodurch der Abbau der organischen Säuren durch die Methanogenese unterbunden werden konnte. Dies führte auch zu einer starken Akkumulation von Essig- und Ameisensäure.

## Literatur/Quellen

- Harper, S.; Pohland, F. (1986): Recent developments in hydrogen management during anaerobic biological wastewater treatment. *Biotechnology and Bioengineering*. Volume 28, Issue 4.
- Industry ARC (2019): Propionic Acid Market Overview. Report. Abrufbar unter: <https://www.industryarc.com/Research/Propionic-Acid-Market-Research-502874#:~:text=The%20Propionic%20Acid%20Market%20size,the%20forecast%20period%202022%2D2027>. (zugegriffen: 16.01.2023).
- Liebrich, M. (2016): Einfluss von Prozessoptimierungen auf die mikrobielle Diversität und die Effizienz der Gasbildung in Co-Vergärungsanlagen der Abfallwirtschaft. Dissertation. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät. Universität Potsdam
- Markets And Markets Research (2022): Butyric Acid Market. Abrufbar unter: [https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/butyric-acid-market-76962011.html?gclid=CjwKC-AjwxOvsBRAjEiwAuY7L8ioNT9ldcRX6DtdCC\\_C2upD\\_6GCxGkDMNCnA3Peb9td5f](https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/butyric-acid-market-76962011.html?gclid=CjwKC-AjwxOvsBRAjEiwAuY7L8ioNT9ldcRX6DtdCC_C2upD_6GCxGkDMNCnA3Peb9td5f) (zugegriffen: 16.01.2023)
- Qureshi & Blaschek (2001): Recent advances in ABE fermentation: hyper-butanol producing *Clostridium beijerinckii* BA101. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. Volume 27, Issue 5.
- Umweltbundesamt (2022): Treibhausgasminderungsziele Deutschlands. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands#internationale-vereinbarungen-weisen-den-weg> (zugegriffen: 16.01.2023)
- Uludag-Demirer, S.; Liao, W.; Demirer, G. (2019): Volatile Fatty Acid Production from Anaerobic Digestion of Organic Residues. In *Microbial Lipid Production. Methods in Molecular Biology*, Volume 1995.

## Kontakt

*M.Sc. Maximilian Barth, wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand*

TU Dresden / Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Tel.-Nr.: +49 351 463-44168

E-Mail: [maximilian.barth@tu-dresden.de](mailto:maximilian.barth@tu-dresden.de)

# Entwicklung einer digitalen Plattform zur Förderung daten-gestützter zirkulärer Praktiken in der Solarindustrie

**Abstract:** *Der verstärkte Ausbau der weltweiten Photovoltaik (PV)-Kapazitäten ist ein fundamentaler Bestandteil, um die Klimawende voranzutreiben. Gleichzeitig stellt sich die Frage, wie mit den enormen Mengen ausrangierter Module nach der ersten Nutzung umgegangen werden soll und wie sich der Rohstoffeinsatz für die Herstellung neuer Solarpaneele langfristig optimieren lässt. In diesem Kontext stellen verschiedene Prinzipien der Kreislaufwirtschaft vereint mit dem Potenzial digitaler Technologien ein probates Mittel dar, um die Nachhaltigkeit in der Solarindustrie voranzutreiben. Die vorliegende Studie beschreibt die Entwicklung einer digitalen Plattform, die verschiedenen Akteuren der PV-Wertschöpfungskette eine Datendreh-scheibe zum Austausch von Informationen über PV-Produkte und in Gebrauch befindliche Paneele für den optimierten Einsatz zirkulärer Strategien bietet.*

## 1 Einleitung

Der Ausbau der Solarenergie als Mittel zur Bewältigung der Klimakrise und zur Abkopplung von teuren fossilen Brennstoffen ist unbestritten. Prognosen gehen von einem Gesamtwachstum der PV-Installationen auf eine Kapazität von 840 GW bis zum Jahr 2030 und auf 8519 GW bis zum Jahr 2050 aus (IRENA, 2019). Jedoch führt die steigende Zahl neuer PV-Module, die auf den Markt gebracht werden, gleichzeitig zu großen Herausforderungen bei der Bewältigung der wachsenden Zahl von demontierten PV-Installationen, die in den Abfallstrom gelangen. Ein Teil der ausrangierten Paneele eignet sich zwar noch für eine zweite Verwendung (CIRCUSOL, 2018), ist aber häufig durch unsachgemäße Handhabung nach der Demontage beschädigt oder nicht ausreichend geprüft, um für einen weiteren Lebenszyklus qualifiziert zu sein. Darüber hinaus entspricht die Sammelquote für demontierte Solarmodule in mehreren europäischen Ländern nur einem Bruchteil der früheren Prognosen, was teilweise auf die steigende Zahl illegaler Exporte zurückzuführen ist. Das Problem, das diesen Unzulänglichkeiten des Marktes zugrunde liegt, ist ein mangelnder Datenaustausch zwischen den verschiedenen Akteuren entlang der PV-Wertschöpfungskette (Hersteller, Installateur, Recycler) sowie die begrenzte Rückverfolgbarkeit von PV-Paneele in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus (Produktion, Nutzung, Nachnutzung).

Ziel dieser Studie ist deshalb die Entwicklung eines Artefakts für eine digitale Plattform, der diesen Herausforderungen durch die umfangreiche Sammlung von Daten aus verschiedenen Phasen der PV-Wertschöpfung entgegenwirkt. Im Rahmen dieses Vorhabens liegt der Schwerpunkt auf den folgenden Forschungsfragen: Welche Merkmale einer digitalen Plattform begünstigen die Anwendung von Kreislaufwirtschaftsstrategien für eine PV-Anlage? Welche Daten werden von den verschiedenen Akteuren benötigt, um diese Kreislaufstrategien zu verwirklichen? Wie kann die langfristige Lebensfähigkeit einer digitalen Plattform für die Kreislaufwirtschaft in der Solarbranche sichergestellt werden? Eine umfangreiche Sekundärforschung,

die im Rahmen dieser Studie zur Untersuchung aktueller digitaler Plattformen für die Kreislaufwirtschaft durchgeführt wurde, konnte die Forschungslücke bereits wie folgt hervorheben: Zum einen zeigt sich, dass der Handel von Second-Life-PV-Anlagen auf einer digitalen Plattform derzeit nicht durch ein standardisiertes Prüfverfahren abgesichert ist, welches das Wiederverwendungspotenzial in Zusammenarbeit mit einem akkreditierten PV-Prüfpartner feststellt und rechtlich bestätigt. Zweitens wird deutlich, dass bisher kaum Bestrebungen unternommen wurden, um Digitale Produktpässe (DPPs) für PV-Produkte zu entwickeln, die verschiedenen Akteuren der Solarindustrie zugänglich sein müssten, um die Wiederverwendung oder weitere End-of-Life (EoL)-Aktivitäten zu erleichtern. Dies soll geschehen, indem einer selektiven Gruppe von Nutzern Informationen über bestehende Produkte mittels DPP (bspw. Produkttyp, Hersteller, Anteile verarbeiteter Materialien), Installationen (bspw. Ort, Installationsdatum) und einzelne Assets, die nach der ersten Nutzung auf Wiederverwendung geprüft (i.e. Messungswerte und Prüfprotokoll) zur Verfügung gestellt werden.

## 2 Methodik

Die Durchführung der vorliegenden Studie erfolgt unter Anwendung der Design Science Research (DSR) Methodologie, welche einen iterativen Ansatz für die Entwicklung und Bewertung von Informationssystem-Artefakten verfolgt. Die Studie referenziert Hevner (2007), welcher DSR als Verkörperung von drei inhärenten Zyklen beschreibt. Erstens stellt der Relevanzzyklus die Bedeutung des angestrebten Forschungsprojekts sicher, indem die Probleme durch die Kontextualisierung der Anwendungsumgebung identifiziert und dargestellt werden (Hevner & Chatterjee, 2010). Der Rigor-Zyklus liefert fundierte Theorien zusammen mit der Erfahrung der Domäne und fügt durch die Forschung neue Erkenntnisse zur bestehenden Wissensbasis hinzu. Neben der durchgeführten Sekundärforschung wurden durch vorangegangene Interviews und Befragungen umfangreiche Informationen für die Entwicklung von funktionalen und nicht-funktionalen Design Anforderungen und diesen übergeordnet Design Prinzipien (DP) gesammelt und ausgewertet. DP 1 – DP3 werden demnach wie folgt definiert:

- DP1: Sammlung und Aktualisierung von Daten aus bestehenden Datenquellen und allen Stufen der PV-Wertschöpfungskette,
- DP2: Entwicklung von Bewertungsschemata auf der Grundlage erweiterter PV-Produktdaten über eine Plattform zur Erstellung von DPPs,
- DP3: Entwicklung eines PV-Online-Marktplatzes, der einen zuverlässigen Prüf- und Wiederverwendungsstandard beinhaltet.

Der dritte und zentrale Design-Zyklus unterstützt schließlich einen engeren Kreislauf von Forschungsaktivitäten für die Entwicklung einer vorgeschlagenen Lösung, indem er mehrere Iterationen auf der Grundlage des Feedbacks von Domänenexperten durchläuft (Hevner, 2007). Um die Evaluation des Artefakts zu vervollständigen, wurde dieser in drei Sitzungen mit Vertretern der Solarindustrie vorgestellt und das gewonnene Feedback jeweils in die Überarbeitung des Prototyps eingebracht.

### 3 Resultate

Das aus dem Design-Zyklus resultierende Artefakt ist das zentrale Ergebnis dieser Studie und setzt sich aus zwei Hauptkomponenten zusammen: Ein klickbarer Prototyp für die grafische Benutzeroberfläche, der verschiedene Anwendungsfälle visualisiert, die durch die Plattform ermöglicht werden. Dazu gehört einerseits ein automatisierter Zertifizierungsprozess, der von PV-Herstellern durch den Austausch von Informationen mit einem akkreditierten Zertifizierer initiiert wird. Die Informationen, die innerhalb dieses Zertifizierungsprozesses vom Hersteller freigegeben werden sind eng mit den Spezifikationen des DPPs verknüpft. Der zweite Anwendungsfall beschreibt einen Online-Marktplatz für wiederverwendbare PV-Module, um Angebot und Nachfrage nach Second-Life-PV-Modulen abzugleichen, die von Recyclingunternehmen geprüft und qualifiziert werden. Die Grundlage dieser Plattform bildet ein relationales Datenbankmodell, das Daten über verschiedene Phasen des PV-Lebenszyklus für Kreislaufwirtschafts-Zwecke sammelt und integriert. Die Umsetzung der Datenbank erfolgte mit Hilfe des MySQL Datenbankverwaltungssystems. Bestandteile der Datenbank konnten bereits durch die Verknüpfung bestehender und öffentlich zugänglicher Datenquellen ergänzt werden.

### Danksagung

Die vorliegende Studie fand ihren Ursprung im Horizon 2020 Projekt CIRCUSOL, welches im Zeitraum von 2018 bis 2022 die Entwicklung und Demonstration zirkulärer Geschäftsmodelle anstrebte.

### Literatur/Quellen

- CIRCUSOL, S. (2018). *Homepage* | Circusol. <https://www.circusol.eu/en>
- Hevner, A. (2007). A Three Cycle View of Design Science Research. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 19.
- Hevner, A., & Chatterjee, S. (2010). Design Science Research in Information Systems. In A. Hevner & S. Chatterjee (Eds.), *Design Research in Information Systems: Theory and Practice* (pp. 9–22). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5653-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5653-8_2)
- IRENA\_Future\_of\_Solar\_PV\_2019.pdf*. (n.d.). Retrieved June 20, 2022, from [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA\\_Future\\_of\\_Solar\\_PV\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf)

### Kontakt

Ässia Boukhatmi, wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin  
Technische Universität Berlin, Fachgebiet für Kreislaufwirtschaft / Berner Fachhochschule,  
Department Technik und Informatik, Fachgebiet für Wirtschaftsingenieurwesen  
Tel.-Nr. +41 31 848 54 87  
E-Mail: [aessia.boukhatmi@bfh.ch](mailto:aessia.boukhatmi@bfh.ch)  
Homepage: Ässia Boukhatmi ([bfh.ch](http://bfh.ch))



## Faseraufbereitungsversuch mit automatisiert sortiertem Papier aus dem Restmüll

**Abstract:** Um die Ziele des EU-Kreislaufwirtschaftspaketes zu erreichen, sind verschiedene Maßnahmen erforderlich. In Österreich etwa finden sich noch ungenutzte Potentiale im Bereich des Recyclings von Papier-, Pappe- und Kartonagen-Verpackungen (PPK) trotz eines gut entwickelten Sammelsystems. Neben der Forcierung der getrennten Sammlung stellt die automatisierte Restmüllsortierung eine Möglichkeit zur Rückgewinnung von Altpapier als Sekundärrohstoff dar. Daher wurde in der vorliegenden Arbeit einerseits die Qualität von automatisiert sortiertem Papier aus dem Restmüll mit Hilfe von Sortieranalysen und andererseits dessen Eignung für die Papierherstellung durch einen Faseraufbereitungsversuch in einem Technikum untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der PPK-Anteil in der automatisiert sortierten Papier-Fraktion aus dem Restmüll zwar bei über 85% liegt, aber von den Sensoren noch ein beträchtlicher Anteil PPK nicht ausgeschleust wird und daher für das Recycling verloren geht. Die erzeugte PPK-Fraktion selbst konnte im Faseraufbereitungsversuch erneut zu Papier verarbeitet werden, jedoch weist der eingesetzte Rohstoff einen geringeren Trockengehalt und einen höheren Störstoffanteil als handelsübliches Altpapier auf.

### 1 Einleitung

Das 2018 von der EU verabschiedete Kreislaufwirtschaftspaket sieht für Papier-, Pappe- und Kartonagen- (PPK) Verpackungen bis 2030 eine Recyclingquote von 85% vor (EPR, 2018). Trotz eines gut ausgebauten Sammelsystems liegt in Österreich die Recyclingquote mit rund 84% jedoch knapp darunter (BMK, 2022). Eine Möglichkeit, um die Recyclingquote zu erreichen, besteht in der automatisierten Sortierung von PPK aus dem Restmüll. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Fragen, wie hoch der Störstoffanteil in automatisiert getrennten PPK aus dem Restmüll ist und inwiefern sich die erzeugte PPK-Fraktion als Sekundärrohstoff für die Papierherstellung eignet.

### 2 Methodik

Eine in Österreich befindliche Restmüllsortieranlage, ausgestattet mit zweistufiger Nahinfrarot (NIR)-Sortierung, wurde im Sommer 2022 mit dem Restmüll einer mittelgroßen Stadt Österreichs beschickt, um mit Hilfe der NIR-Sortierung eine automatisiert getrennte PPK-Fraktion aus dem Restmüll zu bilden. In der ersten Stufe wurde PPK aussortiert, welches in der zweiten Stufe aufgereinigt wurde. Im Folgenden wird nur die zweite Stufe betrachtet. Während der Aufbereitung erfolgten in der zweiten NIR-Stufe Probenahmen des NIR-Auswurfes (A) und des NIR-Durchlaufes (D). Beim Auswurf handelt es sich um jene Fraktion,

die gezielt aus dem Materialstrom ausgeschossen wird – im Falle dieses Versuchs die PPK-Fraktion. Der nicht-ausgeschossene Materialstrom ist der Durchlauf. Aus dem Auswurf (PPK-Fraktion) wurden Einzelproben genommen und zu einer Tagesmischprobe vereinigt, welche anschließend bis zur Trockenstabilität luftgetrocknet und im Nachhinein auf einem 50 mm Sieb einer händischen Sortieranalyse unterzogen wurde. Bei dieser Sortieranalyse wurde durch eine Grobsortierung zunächst die Zusammensetzung der Proben nach Hauptfraktionen analysiert (PPK/GVK inkl. Verbund- und Hygienepapier; Textil; Kunststoffe und Verbunde inkl. Hartkunststoffe, EPS und andere Kunststoffe; Hohlkörper & PET Flaschen; Folien; Glas & Metall; Hygieneartikel & Sonstiges inkl. Feinanteil; etc.) und anschließend die PPK-reiche Fraktion durch eine Feinsortierung näher charakterisiert (z.B. Anteil an Papier, Karton, Wellpappe, Verbundpapier). Die gesamte, mit Hilfe der NIR-Sortierung aus dem Restmüll getrennte, PPK-Fraktion umfasste drei Tonnen. Diese wurde in einem Technikum aufbereitet, anschließend daraus Papier hergestellt und dessen höchstmöglich erzielbare Qualität ermittelt. Der Rohstoff wurde im Technikum mit einer in Mitteleuropa üblichen Altpapierstandardsorte verglichen und Untersuchungen im Labor (z.B. Aschegehalt, chemischer Sauerstoffbedarf) unterzogen. Von den sogenannten Rejekten (Störstoffen), die im ersten Papier-Aufbereitungsschritt anfallen, wurden Proben entnommen und deren Zusammensetzung (z.B. Anteil an Kunststoffverpackungen, Textilien) in einer händischen Sortieranalyse ermittelt.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Grobsortierung

Die Zusammensetzung der Proben in Abbildung 1 zeigt, dass der für den Faseraufbereitungsversuch relevante NIR-A den größten PPK und Getränkeverbundkarton (GVK)-Anteil mit 86% aufweist. Auch im NIR-D macht PPK/GVK 56% aus, was auf eine gute Vorsortierung in der ersten NIR-Stufe hinweist.

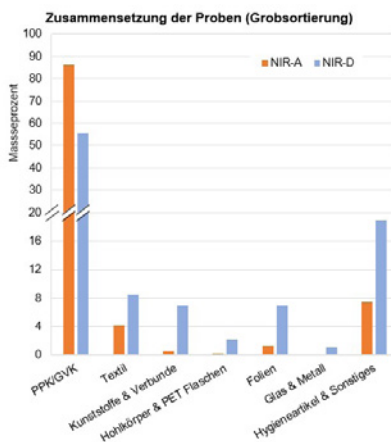


Abbildung 1: Zusammensetzung der Proben aus NIR-A und NIR-D Anteile berechnet aus Trockenmasse  $m$  der Proben:  
 $m$  (NIR-A) = 17,3 kg;  $m$  (NIR-D) = 15,3 kg



### 3.2 Feinsortierung

Das Ergebnis der Feinsortierung der PPK/GVK-Fraktion zeigt in Abbildung 2, dass der überwiegende Anteil von NIR-A mit knapp 50% aus Papier besteht, gefolgt von Karton und Wellpappe. Auch bei NIR-D stellt Papier mit 34% die häufigste Fraktion dar. Wellpappe liegt an zweiter Stelle mit rund 25%.

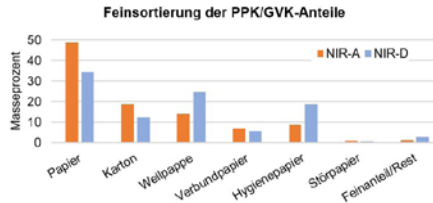


Abbildung 2: Zusammensetzung der PPK/GVK-Fractionen aus der Grobsortierung. Anteile berechnet aus Trockenmasse  $m$  von PPK/GVK aus der Grobsortierung:  $m$  (NIR-A) = 14,9 kg;  $m$  (NIR-D) = 8,5 kg

### 3.3 Faseraufbereitungsversuch und Pulper-Rejekt-Analyse

Die Analysen des Technikums ergaben, dass die PPK-Fraktion aus dem Restmüll einen Trockengehalt von 75% aufweist. Der Trockengehalt der Altpapier-Standardsorte in Mitteleuropa liegt hingegen bei 88-90%. Auch der Rejektanteil liegt mit 14-16% über dem sonst üblichen Anteil, wobei laut Einschätzung des Technikums dies kein Hindernis für den Einsatz des Rohstoffes darstellen würde. Die händische Sortieranalyse des Rejekt ergab die in Abbildung 3 dargestellte Zusammensetzung. Die Restfraktion von 39% besteht hauptsächlich aus Papierfasern, die an den anderen Rejekten anhaften.

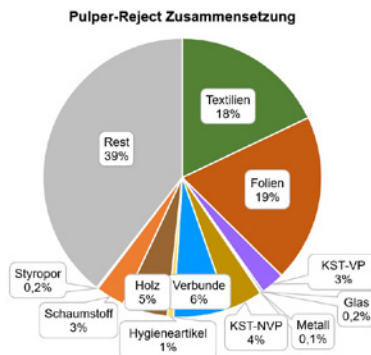


Abbildung 3: Prozentuelle Zusammensetzung der Pulper-Rejekt Proben. Probenmenge  $m$  = 1,6 kg

## 4 Fazit

Die durchgeführten Sortieranalysen zeigen, dass die automatisiert sortierte PPK-Fraktion aus dem Restmüll einen hohen Papier-Anteil aufweist. Weitere Untersuchungen (Blasenbauer et al., 2022) haben gezeigt, dass ein erheblicher Anteil an PPK von den NIR-Sensoren nicht ausgeschleust werden, im Durchlauf landen und schlussendlich für das Recycling verloren gehen. Dies ist unter anderem auf eine Überbelegung des Förderbands zurückzuführen. Im Bereich der automatisierten Sortierung gibt es daher noch ein Verbesserungspotenzial, damit der Großteil der Papierreserven im Restmüll einem Recycling zugeführt werden kann. Die erzeugte Papier-Fraktion aus dem Restmüll weist zwar qualitative Unterschiede, wie eine höhere Feuchte und eine höhere Rejekt-Rate – vorwiegend Textilien und Folien – auf, jedoch stellt dies aus technischer Sicht kein Hindernis für den Einsatz als Sekundärrohstoff dar.

## Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Forschungsinitiative CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der TU Wien. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Gleichzeitig bedanken wir uns bei unseren Unternehmenspartnern Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoffrecycling Austria AG, Borealis AG, Brantner Österreich GmbH, Lenzing AG, Linz Service GmbH, MM Board and Paper AG, OMV Downstream GmbH, Wien Energie GmbH und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H., sowie bei der Magistratsabteilung Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien (MA 48).

## Literatur/Quellen

- Blasenbauer, D.; Lipp, A.-M.; Lederer, J. (2022): Automatisierte Sortierung von Restmüll – Erhebung von Wertstoffströmen an einer großtechnischen Anlage. In: Recy&DepoTech2022, Bd.16, 365-370
- BMK (2022): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2022. Teil1; Entwurfsfassung zur Konsultation. Online verfügbar unter: [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/abfall/aws/bundes\\_awp/bawp2022.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/bundes_awp/bawp2022.html), zuletzt geprüft am 31.12.2022
- EPR (2018): Richtlinie (EU) 2018/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle. Fundstelle: Amtsblatt der Europäischen Union. In: Amtsblatt der Europäischen Union L 150/141.

## Kontakt

*BSc, Gisela Breslmayer, wissenschaftliche Mitarbeiterin*

TU Wien/ CD Labor für recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft

Tel.-Nr. +43 1 58801 166155

E-Mail: [gisela.breslmayer@tuwien.ac.at](mailto:gisela.breslmayer@tuwien.ac.at)

Homepage: <https://www.cdg.ac.at/forschungseinheiten/labor/design-und-bewertung-einer-effizientenrecyclingbasierten-kreislaufwirtschaft>

## Potential quality improvements of recycled plastics considering additional plastic packaging separation scenarios: A compositional analysis

**Abstract:** *Polymeric contamination is an important indicator of quality for recycled plastics as it affects the mechanical properties. In this study, the potential of additional separation scenarios to improve the polymeric purity of recycled post-consumer polypropylene (PP) was assessed. The polymeric purity was modelled for post-consumer PP using packaging waste sorting and characterisation data, in addition to published efficiencies of the processes in plastic recycling plants. The polymeric contamination by mass and their standard deviations in industrially sorted PP bales was  $1.8\% \pm 0.5\%$  polyethylene (PE) rigids,  $1.7\% \pm 0.4\%$  PE foils,  $3.2\% \pm 1.2\%$  of non-polyolefin (PO) rigids and  $1.6\% \pm 0.4\%$  of non-PO foils. 64% to 97% of the non-target polymeric fractions stemmed from sorting errors. With a basic recycling plant with sink-swim separation, the calculated final purity of recycled plastics, utilising conventional NIR sorted bales, was  $95\% \pm 1\%$ , assuming significant removal of non-PO in the sink fraction. Additional separation of targeted PP fractions through a deposit return system has the potential to increase the purity to reach  $>99\%$ , by eliminating sorting errors and multipolymeric designs. For the additional separation using tracing technologies, the purity after basic recycling was calculated to be  $97\% \pm 1\%$ . However, with a high dependence on the ability of tracing technologies to reduce sorting errors.*

### 1 Introduction

The use of recycled plastic in packaging by mass was estimated at 11% in 2019 (Lindner & Beylage, 2020), despite high separate collection rates estimated at 75% in 2017 (Picuno, Alassali, et al., 2021). Post-consumer packaging in Germany is collected commingled and sorted in industrial sorting facilities based on material and polymer types before further recycling. One significant factor hindering the circularity is losses during the sorting step, in which a significant amount of material does not end up in the monopolymeric sorting outputs but is sorted into the mixed plastics stream with a limited market or the residuals stream sent for energy recovery (Picuno, van Eygen, et al., 2021). In addition, the quality of recycled plastics is a factor discouraging the closed-loop recycling of post-consumer plastic packaging waste (Alassali et al., 2021; Hahladakis & Iacovidou, 2018).

Polymeric contamination is a particular concern for the recycling of post-consumer plastic packaging, these may stem from imperfect sorting of the commingled collection stream as well as the packaging design,

where the components are not of the same polymer type. Due to the potential immiscibility between different polymer types (Maris et al., 2018), the presence of non-target polymers may lead to less optimal mechanical properties. Studies reported the reduction of mechanical properties of high-density polyethylene (HDPE) with the presence of PP (Karaagac et al., 2021; Kazemi et al., 2015). Similarly, the lower mechanical properties of post-consumer recycled PP were attributed to the contamination of non-PP polymers (Eriksen et al., 2019).

This study aims to evaluate if the additional separation of PP packaging waste has the potential to reduce the heterogeneity of the fraction and thus reduce the polymeric contamination in the resulting recycled plastics. PP is one of the three major polymer types within rigid packaging besides high density polyethylene (HDPE) and polyethylene terephthalate (PET). Additional separation can be potentially realised either through a bring system (i.e. a deposit return system) or tracing-based sorting through digital watermarks and fluorescent tracers (Tandt et al., 2021; Woidasky et al., 2020).

## **2 Method**

### **2.1 Plastic waste characterisation**

The amount and source of polymeric contamination were determined through the characterisation of the sorted PP bale from a sorting plant in Germany. A sample of at least 70 kg was taken from a PP bale and characterised by hand-sorting in August 2021 based on the polymer type of the main body of each packaging article: PP, PE, PET or other polymer types. If the polymer type of a packaging article could not be identified by the label, a portable mIRoSpark near-infrared (NIR)-scanner from loSys – Dr. Timur Seidel e.K. was used to identify the polymer type of the main body. Each sorted fraction was weighed to determine its mass composition in comparison to the entire sample. In addition to object-level polymeric contamination, triplicate 500g samples of the major sorted fractions were further characterised in the lab based on the polymer type of the components.

### **2.2 Material flow modelling and scenario analysis of additional separation**

Using the compositional data, the polymeric purity in the final recycled plastic material was modelled for the PP bale (representing the status quo) as well as two different additional separation methods, as shown in Table 1. PP food trays and tubs, excluding meat and cheese products often having multipolymeric designs, were targeted as a separate fraction due to their circularity potential as identified in a previous study (Chong & Kuchta, 2022). As model inputs, the compositional data from this study was combined with a previous sorting study from another sorting plant conducted in 2019 (Picuno, 2021). In addition, the separation efficiencies of tracing-based sorting and the decontamination processes in the recycling plants used in the model were based on literature. To account for the potential difference in recycling plant configurations in terms of the applied decontamination processes, the final polymeric composition of the recycled plastic was calculated for a basic and an advanced recycling plant. The former was assumed to only have a sink-swim separation process while the latter is equipped with an additional air classifier (for the removal of films and foils) as well as an NIR-based flake sorter.

Table 1: Modelled scenarios and their descriptions

Scenario	Recycling plant input	Recycling plant configuration
PP_SQ_B	No additional separation, the polymeric composition of a PP bale was taken as the input.	Basic recycling plant
PP_SQ_A		Advanced recycling plant
PP_AS_B	PP food trays or tubs are additionally separated via a tracing technology.	Basic recycling plant
PP_AS_A		Advanced recycling plant
PP_DRS_B	PP food trays or tubs are additionally separated via a bring system (i.e. a deposit return system).	Basic recycling plant
PP_DRS_A		Advanced recycling plant

### 3 Results and discussion

#### 3.1 Polymeric composition of the recycling plant input fractions

To calculate the polymeric composition of the recycling plant input, assumptions for additional separation scenarios were needed. Sorting errors may be attributed to the limitations of the current NIR-based sorting system (Picuno, Alassali, et al., 2021) as well as complex packaging design. Reasons might include the sensors not being able to accurately classify black-coloured packaging, interference from labels or attachments that are not of the same polymer type as the packaging main body, as well as waste aggregates where multiple packaging articles are stuck together. NIR technologies were quoted to be able to achieve classification success rates of 96-98% (Gundupalli et al., 2017). A report for sorting using digital watermarks quoted detection rates of approximately 99% and purity levels of 96% for the rigid PP stream in a semi-industrial pilot test (European Brands Association [AIM], n.d.). Tracing technologies are likely to sort multi-polymeric designs and black-coloured plastic more accurately compared to conventional NIR systems but might also struggle with surface dirt as well as waste aggregation. Thus, a  $50\% \pm 25\%$  ( $\pm$  denotes standard deviation) improvement from the status quo in terms of sorting errors and a 95% rejection accuracy for non-targeted PP articles was assumed. For the deposit return system, a 100% classification accuracy was used, assuming the use and reliability of reverse vending machines.

Based on the compositional data as well as the classification efficiencies quoted above, the polymeric composition was calculated and shown in Table 2. In addition, the source of polymeric contamination in the PP bale was categorised into design (packaging components) or sorting errors as shown in Figure 1. PP trays or tubs - that are collected via a deposit return system – are expected to have minimal polymeric contamination, because most of the measured polymeric contamination stemmed from sorting errors and was assumed to be eliminated using a deposit return system. In addition, PP trays for meat or cheese products, often with multipolymeric designs, were excluded from the target fraction. For advanced sorting through a tracing technology, an improvement was seen due to the assumption that they reduce sorting errors.

Table 2: Modelled polymeric composition of the PP fraction. SD: standard deviation; PO: polyolefins

	PP Bale (PP_SQ)		Sorted food PP trays or tubs (PP_AS)		Separately collected PP trays or tubs (PP_DRS)	
Fractions	Average	SD	Average	SD	Average	SD
PE	1.8%	0.5%	1.4%	0.8%	0.0%	0.0%
PE Foil	1.7%	0.4%	0.9%	0.5%	0.1%	0.0%
Non-PO	3.2%	1.2%	1.9%	0.9%	0.0%	0.0%
Non-PO Foil	1.6%	0.4%	1.2%	0.6%	0.2%	0.0%

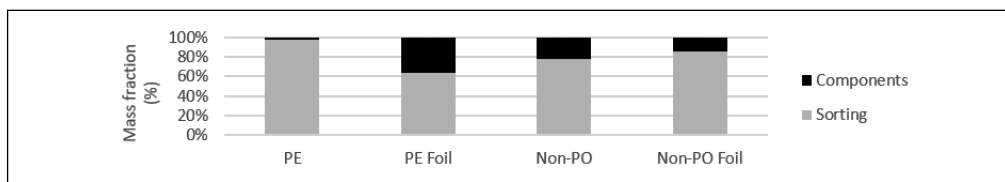


Figure 1: Source of polymeric contamination in a PP bale

### 3.2 Final polymeric purity in recycled plastic

The separation efficiencies of the separation process in recycling plants included in the model were based on literature and summarised in Table 3. Applying these transfer coefficients, the final polymeric purity of the different scenarios was calculated and shown in Figure 2. For the PP bale, the polymeric purity of the produced recycled plastic was modelled to be around  $95\% \pm 1\%$  for a basic recycling plant and  $>99\%$  for an advanced plant. Reported values of polymeric purity of lab produced flakes were around 90% in the Netherlands, excluding the black plastic fraction (Brouwer et al., 2018). For sorting through tracing technologies, a slight improvement was expected for a basic plant ( $97\% \pm 1\%$ ). However, a  $>99\%$  purity was also achieved with an advanced plant. For a deposit return system, the purity was expected to be  $>99\%$  in all recycling plants due to the purity already achieved after collection.

This study highlights that additional separation can have an effect on the final purity of recycled plastic in the case of a basic recycling plant. In the case of a deposit return system, the exclusion of sorting errors and multipolymeric designs have the potential to minimise polymeric contamination. For tracing technologies, the improvements will highly depend on the potential to minimise sorting errors. Studies in full-scale plants should be conducted in order to confirm this. However, if recycling plants are well equipped to deal with component-based contamination for example with the use of flake-sorters on shredded plastic waste, a high polymeric purity should be achieved regardless of the collection method. However, there might be trade-offs to the yield when more decontamination processes are needed.

Table 3: Decontamination efficiencies used in the model ( $\pm$  denotes standard deviation)

Case	Separation transfer coefficients (removal of contaminants)		
	Sink swim	Air classifier	NIR flake sorting
Basic recycling plant	Non-polyolefins: 78% $\pm$ 20% (based on (Brouwer et al., 2018))	Not applied.	Not applied.
Advanced recycling plant		Films or foils: 58% $\pm$ 15% (based on A4 classifiers (Antonopoulos et al., 2021))	Non-target materials: 90% $\pm$ 8% (based on (Lubongo & Alexandridis, 2022))

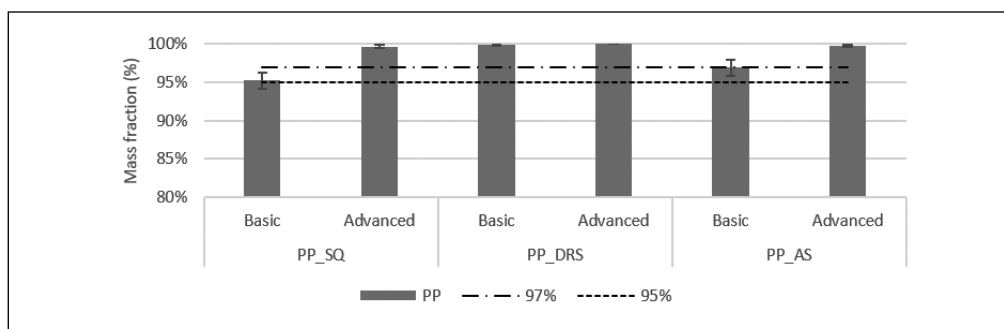


Figure 2: Modelled polymeric purity of recycled PP of the different scenarios. Error bars: Standard deviation

## Acknowledgement

This study was funded by the *Stiftungsfonds UNILEVER zur Förderung der Wissenschaft* (UNILEVER Foundation Fund for the Promotion of Science).

## Literature

- Alassali, A., Picuno, C., Chong, Z. K., Guo, J., Maletz, R., & Kuchta, K. (2021). Towards Higher Quality of Recycled Plastics: Limitations from the Material's Perspective. *Sustainability*, 13(23), 13266. <https://doi.org/10.3390/su132313266>
- Antonopoulos, I., Faraca, G., & Tonini, D. (2021). Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows, and barriers. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 126, 694–705. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.002>
- Brouwer, M. T., van Thoden Velzen, E. U., Augustinus, A., Soethoudt, H., Meester, S. de, & Ragaert, K. (2018). Predictive model for the Dutch post-consumer plastic packaging recycling system and implications for the circular economy. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 71, 62–85. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.034>

- Chong, Z. K., & Kuchta, K. (2022). Systemic solutions for high-quality recycle: An evaluation method for further separation scenarios of plastic waste. 11. *Wissenschaftskongress Abfall- Und Ressourcenwirtschaft*.
- Eriksen, M. K., Christiansen, J. D., Daugaard, A. E., & Astrup, T. F. (2019). Closing the loop for PET, PE and PP waste from households: Influence of material properties and product design for plastic recycling. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 96, 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.005>
- European Brands Association. (n.d.). Holygrail 2.0 Presentation. [https://www.aim.be/wp-content/themes/aim/pdfs/Digital%20Watermarks%20Initiative%20HolyGrail%202.0%20-%20general%20presentation%20for%20PDF.pdf?\\_t=1608025169](https://www.aim.be/wp-content/themes/aim/pdfs/Digital%20Watermarks%20Initiative%20HolyGrail%202.0%20-%20general%20presentation%20for%20PDF.pdf?_t=1608025169)
- Gundupalli, S. P., Hait, S., & Thakur, A. (2017). A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 60, 56–74. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.015>
- Hahladakis, J. N., & Iacovidou, E. (2018). Closing the loop on plastic packaging materials: What is quality and how does it affect their circularity? *The Science of the Total Environment*, 630, 1394–1400. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.330>
- Karaagac, E., Koch, T., & Archodoulaki, V.-M. (2021). The effect of PP contamination in recycled high-density polyethylene (rPE-HD) from post-consumer bottle waste and their compatibilization with olefin block copolymer (OBC). *Waste Management (New York, N.Y.)*, 119, 285–294. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.011>
- Kazemi, Y., Ramezani Kakroodi, A., & Rodrigue, D. (2015). Compatibilization efficiency in post-consumer recycled polyethylene/polypropylene blends: Effect of contamination. *Polymer Engineering & Science*, 55(10), 2368–2376. <https://doi.org/10.1002/pen.24125>
- Lindner, C., & Beylage, H. (2020). Plastic Flow in Germany 2019 [*Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019*]. Conversio Market & Strategy GmbH. <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/kurzfassung-stoffstrombild-kunststoffe-2019.pdf>
- Lubongo, C., & Alexandridis, P. (2022). Assessment of Performance and Challenges in Use of Commercial Automated Sorting Technology for Plastic Waste. *Recycling*, 7(2), 11. <https://doi.org/10.3390/recycling7020011>
- Maris, J., Bourdon, S., Brossard, J.-M., Cauret, L., Fontaine, L., & Montembault, V. (2018). Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes. *Polymer Degradation and Stability*, 147, 245–266. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.001>
- Picuno, C. (2021). *Post-consumer plastic packaging sector and its path for sustainable development in Germany. Hamburger Berichte / Technische Universität Hamburg-Harburg Abfallressourcenwirtschaft: Band 53*. Verlag Abfall aktuell Ingenieurgruppe RUK GmbH.
- Picuno, C., Alassali, A., Chong, Z. K., & Kuchta, K. (2021). Flows of post-consumer plastic packaging in Germany: An MFA-aided case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105515. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105515>
- Picuno, C., van Eygen, E., Brouwer, M. T., Kuchta, K., & van Thoden Velzen, E. U. (2021). Factors Shaping the Recycling Systems for Plastic Packaging Waste—A Comparison between Austria, Germany and The Netherlands. *Sustainability*, 13(12), 6772. <https://doi.org/10.3390/su13126772>
- Tandt, E. de, Demuytere, C., van Asbroeck, E., Moerman, H., Mys, N., Vyncke, G., Delva, L., an Vermeulen, Ragaert, P., Meester, S. de, & Ragaert, K. (2021). A recycler's perspective on the implications of REACH and food contact material (FCM) regulations for the mechanical recycling of FCM plastics. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 119, 315–329. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.012>



Woidasky, J., Sander, I., Schau, A., Moesslein, J., Wendler, P., Wacker, D., Gao, G., Kirchenbauer, D., Kumar, V., Busko, D., Howard, I. A., Richards, B. S., Turshatov, A., Wiethoff, S., & Lang-Koetz, C. (2020). Inorganic fluorescent marker materials for identification of post-consumer plastic packaging. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104976. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104976>

## Contact

*M. Sc., Zhi Kai Chong, Wissenschaftlicher Mitarbeiter*

Institute for Circular Resource Engineering and Managment

Technische Universität Hamburg

Tel.-Nr.: +49 40 428784053

E-Mail: [kai.chong@tuhh.de](mailto:kai.chong@tuhh.de)

<https://www.tuhh.de/iue/forschung/forschungsgebiete/ag-sustainable-resource-and-waste-management.html>



## Anaerobversuche mit Prozesswasser aus der HTC von Klärschlamm

**Abstract:** Die hydrothermale Karbonisierung (HTC) hat sich in den letzten 15 Jahren erheblich weiterentwickelt und könnte für die Verwertung von feuchten kommunalen und industriellen biologischen Abfällen wie Klärschlamm eine interessante Alternative sein. Der Prozess findet in einer wässrigen Atmosphäre statt, so dass keine Trocknung der Abfallbiomasse erforderlich ist und somit eine direkte Verarbeitung ermöglicht. Bei der HTC werden die feuchten Abfälle in eine braunkohleähnliche HTC-Kohle umgewandelt. Dabei fallen als Nebenprodukt erhebliche Mengen an Prozesswasser (PW) an. Dieses ist organisch belastet und muss behandelt werden. Eine Möglichkeit, das PW zu behandeln, ist die anaerobe Vergärung. Da die Prozesswässer aus der HTC organisch belastet sind (CSB-Konzentrationen zwischen 10.000,00 und 70.000,00 mg/l), bietet sich die Anaerobtechnik auch zur Behandlung dieser Abwässer an. Jedoch ist eine weitergehende Untersuchung und Optimierung der anaeroben Behandlung von PW aus der HTC, erforderlich. In verschiedenen Batch-, semikontinuierlichen und kontinuierlichen Versuchen wird das PW dafür in anaeroben Reaktoren behandelt. Ziel ist es, in erster Linie die anaerobe Abbaubarkeit der im PW vorhandenen organischen Verunreinigung zu untersuchen. Weiterhin sollen die Aktivität, eine mögliche Hemmung der Abbaubarkeit und die Kinetik untersucht werden. Dabei ist das PW jeweils die alleinige Kohlenstoffquelle für die Mikroorganismen. Die anaeroben Versuche sind Bestandteil eines Forschungsvorhabens zur Behandlung des aus der HTC von Abfällen wie z.B. Klärschlämmen anfallenden PW. Das Kernziel dieses Forschungsvorhabens ist die zuverlässige und stabile Aufbereitung auf die gesetzlich geforderte Indirekteinleiterqualität, um das vorbehandelte PW in einer kommunalen Kläranlage weiterbehandeln zu dürfen.

### 1 Einleitung und Ausgangssituation

Aufgrund des steigenden Bevölkerungswachstums und der zunehmenden Industrialisierung nehmen die Mengen an organischen Siedlungs- und Industrieabfällen zu. Eine nachhaltige und effiziente Kreislaufwirtschaft erfordert innovative Technologien, die Rest- und Abfallstoffe klimaneutral verwerten und umwandeln. Neben den bekannten biochemischen Konversionsverfahren, die die genannten Stoffe z.B. in Methan, Wasserstoff, Ethanol oder Methanol umwandeln, sind die thermo-chemischen Konversionsprozesse von Interesse, da diese klimaneutrale Bioenergie erzeugen können. Zu den thermochemischen Verfahren

gehören einerseits trockene Verfahren wie Verbrennung, technische Vergasung, Pyrolyse und Torrefizierung, andererseits hydrothermale Prozesse (HTP) [ZHANG ET AL., 2010], [KRUSE ET AL., 2013].

Mit einer steigenden Bevölkerung erhöht sich auch die Menge an zu behandeltem Abwasser und die dabei anfallenden Klärschlämme steigen an. Klärschlämme sind nach AbfKlärV, 2017 Abfälle aus der abgeschlossenen Behandlung von Abwasser in Abwasserbehandlungsanlagen. Eine dauerhafte und verlässliche Verwertung der Klärschlämme ist unbedingt erforderlich. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes fielen im Jahr 2020 in Deutschland rund 1.740.556 t TM an Klärschlamm an [DESTATIS, 2022].

Die Hydrothermale Karbonisierung (HTC) stellt eine vielversprechende Alternative zur Verwertung von Klärschlämmen, aber auch anderen feuchten kommunalen und industriellen organischen Abfällen dar. Das Ausgangsmaterial wird in eine braunkohleähnliche Hydrochar (auch HTC-Kohle) umgewandelt [WANG ET AL., 2019]. Der Prozess findet in einer wässrigen Atmosphäre statt, daher ist keine Trocknung der Abfallbiomasse erforderlich, wodurch eine direkte Verarbeitung ermöglicht wird. So könnte zum Beispiel mechanisch entwässerter Klärschlamm, der in Kläranlagen anfällt, direkt verarbeitet werden [WANG ET AL., 2020]. Der Klärschlamm wird bei milden Temperaturen (180 °C - 280 °C) und Drücken in mehreren parallelen oder seriellen chemischen Reaktionsmechanismen umgesetzt [REZA ET AL., 2014]. Die wichtigsten Reaktionsmechanismen der hydrothermalen Karbonisierung sind Hydrolyse, Dehydratisierung, Decarboxylierung, Polymerisation und Aromatisierung [FUNKE UND ZIEGLER, 2010]. Die Ausbeute der erzeugten HTC-Kohle hängt von verschiedenen Reaktionsparametern ab, wobei Temperatur und Reaktionszeit eine entscheidende Rolle spielen [HUEZO ET AL., 2021], [DJANDJA ET AL., 2021], [BLACH UND ENGELHART, 2020]. Aus der Fest-/Flüssigtrennung des Schlamms fällt eine signifikante Menge an Prozesswasser (PW) an. Verschiedene vorausgehende wissenschaftliche Arbeiten wie von BLÖHSE, 2017 zeigten, dass die Menge des bei der HTC anfallenden PW vom Wassergehalt des Ausgangsmaterials sowie der Prozessführung abhängig ist. Im PW sind viele organische Stoffe vorhanden, darunter organische Säuren wie Essigsäure, Propionsäure oder Lävulinsäure sowie phenolische und aromatische Verbindungen wie 5-HMF und Furfural [DANSO-BOATENG ET AL., 2015].

## **2 Behandlung des HTC-Prozesswassers mit anaeroben Verfahren**

Das Prozesswasser (PW) ist rechtlich gesehen ein industrielles Abwasser und muss behandelt werden. Diese Behandlung muss wahlweise auf Direkteinleiterqualität (§ 56 WHG), die eine Einleitung des gereinigten Abwassers in die Umwelt erlaubt, oder auf Indirekteinleiterqualität (§ 57 WHG), die eine Einleitung in die öffentliche Kläranlage erlaubt, erfolgen. Eine Möglichkeit, das PW zu behandeln, ist die anaerobe Vergärung. Die anaerobe Abwasserbehandlung ist seit den 1970er Jahren eine bekannte Technologie zur Behandlung organisch verunreinigter Industrieabwässer. Da die PW aus der HTC ebenfalls organisch belastet sind (CSB-Konzentrationen zwischen 15.000,00 und 70.000,00 mg/l), bietet sich die Anaerobtechnik auch zur Behandlung dieser Abwässer an. Anaerobe Verfahren werden seit vielen Jahren für die Behandlung organisch hoch belasteter Industrieabwässer aus der Lebensmittel-, Genussmittel-, Getränke-, Zellstoff- und Papierindustrie eingesetzt [MOOSBRUGGER, 2012]. Die Vorteile der Anaerobtechnik sind eine langsame Schlammproduktion und die geringen Energiekosten, da der Prozess unter Ausschluss von Sauerstoff abläuft und daher keine Belüftungstechnik benötigt. Das bei der anaeroben Behandlung des Abwassers erzeugte Biogas kann für energetische Zwecke genutzt werden [RAJAGOPAL ET AL., 2013], [ROSENWINKEL ET AL., 2011]. PW aus der HTC von kommunalen und industriellen organischen Abfällen wie Klärschlamm können

aufgrund der beschriebenen Zusammensetzung (hohe CSB-Frachten, hohe Konzentrationen an flüchtigen organischen Säuren wie Essigsäure usw.) für die anaerobe Vergärung geeignet sein. Zahlreiche Studien wie die von [WIRTH ET AL., 2015A], [VILLAMIL ET AL., 2017] oder [WIRTH UND MUMME, 2013] haben sich bereits mit diesem Thema beschäftigt.

### 3 Versuche zum anaeroben Abbau

Die Anaerobversuche sind Bestandteil eines Forschungsvorhabens zur Behandlung von Prozesswässern aus der Hydrothermalen Karbonisierung (HTC) von Abfällen, wie z.B. Klärschlämmen. Das Kernziel dieses Forschungsvorhabens ist die zuverlässige und stabile Aufbereitung auf die gesetzlich geforderte Indirekteinleiterqualität, um das vorbehandelte PW in einer kommunalen Kläranlage weiterbehandeln zu dürfen. Für die Versuche wird Prozesswasser aus der HTC von Klärschlamm und zur Inokulation Faulschlamm aus einer kommunalen Kläranlage verwendet.

#### 3.1 Vorversuche und Batchversuche

Im ersten Schritt werden die PW auf ihre anaerobe Abbaubarkeit sowie eine mögliche Hemmung getestet. Die Versuche lehnen sich dabei an die DIN EN ISO 11734:1998-11 und ISO 13641-1:2003-05 an. Die Versuche werden jeweils in einer 400 ml – Flasche angesetzt. Nährstoffe/Spurenelemente werden nicht hinzugegeben. Das PW ist in den Versuchen die alleinige C-Quelle für das Inokulum. Nach Inokulation mit dem Faulschlamm werden die Ansätze bei 38 °C unter ständigem Rühren aufbewahrt. Zu Beginn der Versuche werden pH-Wert und Temperatur gemessen. Die Proben werden über einen Zeitraum von drei Tagen inkubiert. Über den Zeitraum wird die Biogasproduktion erfasst. In weiteren Versuchen wird zusätzlich die Hemmung des PW getestet. Dafür wird zusätzlich noch 3,5-Dichlorphenol (2,7 mg/g TS) zugegeben. Im achten Ansatz wird ausschließlich das Inokulum mit 3,5-Dichlorphenol versetzt (2,7 mg/g TS), um einen Vergleich zu erzielen. Der neunte Ansatz wird mit Cellulose anstelle des Substrats durchgeführt.

Für die Batchversuche werden Dreifachansätze vorgenommen, wovon der erste Ansatz ein Nullansatz ist (Blindwert) und der achte Ansatz mit Cellulose anstelle des PW durchgeführt wird. Das PW wird dazu in unterschiedlichen Konzentrationen mit dem Inokulum versetzt (Ansatz 2-7). Um zu testen, ob eine Limitierung des anaeroben Abbaus auf Grund des Substrats (PW) selbst oder auf Grund einer möglichen Nährstofflimitierung vorliegen könnte, sind in den Ansätzen 5-7 zusätzlich noch Nährstoffe in Form einer Nährstofflösung vorhanden. Der achte Ansatz wird wie bereits erwähnt mit Cellulose anstelle des Substrats durchgeführt. Jeder Batchversuch wird in einer 400 ml – Flasche angesetzt. Das PW ist die alleinige C-Quelle für das Inokulum. Je nach Belastung des HTC-PW ist eine Impfkonzentration von 2–4 g oTS/l notwendig. Nach Inokulation mit dem Faulschlamm werden die Ansätze bei 38 °C unter ständigem Rühren aufbewahrt. Zu Beginn der Versuche werden pH-Wert und Temperatur gemessen. Die Versuchsdauer ist von der Abbaubarkeit des Substrats, der damit verbundenen Länge der Adaptionssphase, möglichen Hemmungen sowie dem Einsetzen der methanogenen Phase abhängig. In der Regel werden die Proben für 28 Tage inkubiert.

### 3.2 Kontinuierliche und semikontinuierliche Versuche

Die in den Batchversuchen gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend auf die erwähnten semikontinuierlichen und kontinuierlichen Versuche übertragen. Als anaerobe Reaktoren sind zum einen ein kontinuierlich betriebener Rührkessel (CSTR) und zum anderen ein Festbettreaktor eingesetzt. In einer ersten Versuchsreihe mit einem anaeroben Membranbioreaktor konnten erste Erfahrungen und Erkenntnisse aus der kontinuierlichen anaeroben Behandlung gewonnen werden. Als Inokulum wurde wie auch für die Vorversuche mesophiler Faulschlamm aus einer kommunalen Kläranlage genutzt. Das PW hatte eingangs eine CSB-Konzentration von  $19.000,00 \text{ mg l}^{-1}$  und wurde zunächst auf  $2.500,00 \text{ mg l}^{-1}$  verdünnt und sukzessive auf über  $5.000,00 \text{ mg l}^{-1}$  erhöht. Die Batchversuche liefen über einen Zeitraum von mehreren Wochen stabil. Ein CSB-Abbau konnte bis zu 60 % realisiert werden. Eine bisher nicht bestätigte Vermutung ist der hohe Anteil an schwer abbaubaren organischen Stoffen, erfasst als inerter CSB. Nach dieser stabilen Phase kam es jedoch immer wieder zu Betriebsstörungen wie z.B. Abfall des pH-Wertes oder einem übermäßigen Anstieg der organischen Säuren. Weiterhin war die Methanausbeute eingangs gering und kam im Verlauf des Versuchs fast zum Erliegen. Es wird vermutet, dass persistente und toxische organische Verbindungen wie Phenole eine Hemmung des anaeroben Abbaus verursachen. Die Toxizität von Phenolen für anaerobe Mikroorganismen und eine mögliche daraus resultierende Störung der Biogasproduktion wurde unter anderem auch von CHEN ET AL., 2019 sowie WIRTH ET AL., 2015B beobachtet. Weiterhin ist die Reduktion des inertes CSB von immenser Bedeutung. Auf diesem Gebiet sind aber weitere Forschungstätigkeiten nötig, um die gewonnenen Fragestellungen klären zu können.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen Prozesswässer aus der HTC von Abfällen, wie z.B. Klärschlämmen, behandelt werden. Ziel soll das Erzielen und Einhalten der gesetzlich geforderten Indirekteinleiterqualität sein, um die behandelten PW einer kommunalen Kläranlage zuführen zu können. Zur Aufbereitung der PW bieten sich verschiedene Technologien an, darunter die anaerobe Abwasserbehandlung. Mit Hilfe der Anaerobtechnik lassen sich organisch belastete PW aus der behandeln. Die ersten Erkenntnisse sind vielversprechend, es konnte allerdings noch kein stabiler Dauerbetrieb realisiert werden. Insbesondere vermutete organische Stoffe wie Phenole können die anaerobe Abbaubarkeit hemmen, sodass auf diesem Gebiet weitere Forschungen notwendig sind.

Die Anaerobversuche sind Teil eines Promotionsvorhabens über die Prozesswässer aus der Hydrothermalen Karbonisierung (HTC) von Abfällen (z.B. Klärschlamm). Die Autoren möchten sich bei Frau Dr.-Ing. Ruth Gebauer und Frau Dr.-Ing. Haniyeh Jalalipour für ihre Unterstützung bedanken.

## Literatur/Quellen

- Blach, T. and Engelhart, M. (2020): Optimizing the Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge—Response Surface Methodology and the Effect of Volatile Solids. *Water*, 13 (9), p. 1225. <https://doi.org/10.3390/w13091225>
- Blöhse, D. (2017): Hydrothermale Karbonisierung – Nutzen dieser Konversionstechnik für die optimierte Entsorgung feuchter Massenreststoffe (Doctoral dissertation). University Essen, Germany: Duisburg-Essen. Retrieved from <https://duepublico2.uni-due.de/receive/duepublico>
- Chen, H., Rao, Y., Cao, L., Shi, Y., Hao, S., Lou, G., Zhang, S. (2019): Hydrothermal conversion of sewage sludge: Focusing on the characterization of liquid products and their methane yields. *Chemical Engineering Journal*, Volume 357, 2019, Pages 367-375. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.180>
- Danso-Boateng, E., Sharma, G., Wheatly, A. D., Martin, S. J., Holdich, R. G. (2015): Hydrothermal carbonisation of sewage sludge: Effect of process conditions on product characteristics and methane production. *Bioresource Technology*, Volume 177, 2015. 318-327. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.096>
- Djandja, O. S., Yin, L., Wang, Z.-C. & Duan, P.-G. (2021): From wastewater treatment to resources recovery through hydrothermal treatments of municipal sewage sludge: A critical review. *Process Safety and Environmental Protection*, 151, 101–127. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.006>
- Funke, A. and Ziegler, F. (2010): Hydrothermal Carbonization of Biomass: A Summary and Discussion of Chemical Mechanisms for Process Engineering. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 4, 160-177. <https://doi.org/10.1002/bbb.198>
- Huezo, L., Vasco-Correa, J., Shah, A. (2021): Hydrothermal carbonization of anaerobically digested sewage sludge for hydrochar production. *Bioresource Technology Reports*, Volume 15, 2021, 100795. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100795>
- Klärschlammverordnung (AbfKlärV) vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465), die zuletzt durch Artikel 137 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- Kruse, A., Funke, A., Titirici, M.-M. (2013): Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials. *Current Opinion in Chemical Biology*, Volume 17, Issue 3, 2013, 515-521. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.05.004>
- Moosbrugger, R. (2012): Praxisorientierte Simulation für die anaerobe Abwasserbehandlung. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Jahrgang 59, Heft 7, 641-647. <https://doi.org/10.3242/kae2012.07.003>
- Nicolae, S. A., Au, H., Modugno, P., Luo, H.i, Szego, A. E., Qiao, M., Li, L., Yin, W., Heeres, H., Berge, N., Titirici, M.-M. (2020): Recent advances in hydrothermal carbonisation: from tailored carbon materials and biochemicals to applications and bioenergy. In: *Green Chem.* 22 (15), S. 4747–4800. <https://doi.org/10.1039/D0GC00998A>
- Reza, M. T., Wirth, B., Lüder, U., Werner, M. (2014): Behavior of selected hydrolyzed and dehydrated products during hydrothermal carbonization of biomass. *Bioresour. Technol.* 169, 352–361. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.010>
- Rosenwinkel, K.-H., Hinken, L., Borchmann, A., Kipp, S., Lorey, C. (2011): Die Zukunft der industriellen Abwasserreinigung. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*, Jahrgang 58, Heft 10, 920-934. <https://doi.org/10.3242/kae2011.10.001>
- Shi, N., Liu, Q., He, X., Wang, G., Chen, N., Peng, J., Ma, L. (2019): Molecular Structure and Formation Mechanism of Hydrochar from Hydrothermal Carbonization of Carbohydrates. *Energy Fuels* 2019, 33, 10, 9904–9915. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02174>

- Statistisches Bundesamt, DESTATIS (2022): Klärschlamm entsorgung nach Bundesländern. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/liste-klärschlammverwertungsart.html>
- Villamil, J. A., Mohedano A. F., Rodríguez J. J., de la Rubia M. A. (2017): Valorisation of the liquid fraction from hydrothermal carbonisation of sewage sludge by anaerobic digestion. *J Chem Technol Biotechnol* 2018, 93: 450–456. <https://doi.org/10.1002/jctb.5375>
- Wang, L., Chang, Y., Li, A. (2019): Hydrothermal carbonization for energy-efficient processing of sewage sludge: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 108, 2019, 423-440. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.011>
- Wirth, B. and Mumme, J. (2013): Anaerobic Digestion of Waste Water from HTC of Corn Silage. *Applied Bioenergy* 1-10. <http://dx.doi.org/10.2478/apbi-2013-0001>
- Wirth, B., Reza, M. T., Mumme, J. (2015A): Influence of digestion temperature and organic loading rate on the continuous anaerobic treatment of process liquor from hydrothermal carbonization of sewage sludge. *Bioresource Technology*, Volume 198, 2015, Pages 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.022>
- Wirth, B., Krebs, M., Andert, J. (2015B): Anaerobic degradation of increased phenol concentrations in batch assays. *Environ Sci Pollut Res* 22, 19048–19059 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5100-8>
- Zhang, L., Xu, C., Champagne, P. (2010): Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, Volume 51, Issue 5, 969-982. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.038>

## Kontakt

M.Sc. Tommy Ender (Wissenschaftlicher Mitarbeiter)  
Universität Rostock  
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät  
Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft  
Justus-von-Liebig-Weg 6  
18059 Rostock  
Tel.: 0381 498 3417  
Fax: 0381 498 3402  
E-Mail: [tommy.ender@uni-rostock.de](mailto:tommy.ender@uni-rostock.de)



## Eigenschaften von Beton aus natürlichen und industriell hergestellte Gesteinskörnungen aus Müllverbrennungsaschen

**Abstract:** Die gängigste Methode zur Behandlung von Siedlungsabfälle vor der Deponierung ist die thermische Behandlung in Müllverbrennungsanlagen. Zwei verschiedene Arten von Verbrennungstechnologien finden hierbei Anwendung. Die Rostfeuerung, bei der Rostaschen und die Wirbelschichtfeuerung, bei der Bettaschen entstehen. Üblicherweise werden nach der Metallabtrennung die Glas- und Mineralfraktion der Aschen auf Deponien abgelagert. Dies steht jedoch im Widerspruch zum EU-Kreislaufwirtschaftspaket, das auf das Recycling von Materialien und die Einsparung von Primärrohstoffen abzielt. In dieser Studie wird die Verwendung einer industriell hergestellten Gesteinskörnung als Ersatz für einen Teil der natürlichen Gesteinskörnung in Beton untersucht. Um die Qualität der hergestellten Betonproben zu beurteilen, wurden gängige Betontests anhand von Frisch- und Festbetonparametern durchgeführt. Diese Tests haben gezeigt, dass die mit recycelter Gesteinskörnung hergestellten Betone sowohl bei den Indikatoren für die Betonqualität als auch für die ökologische Wiederverwertbarkeit gute Werte aufweisen. Es sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich, um das optimale Mischungsverhältnis zu finden, mit der eine bessere Verarbeitbarkeit und Wiederverwertbarkeit erreicht werden kann.

### 1 Einleitung

Mit der Verabschiedung des EU-Kreislaufwirtschaftspakets leitete die Europäische Union den Übergang von einer linearen in eine Kreislaufwirtschaft ein. Ziel dieses Paketes ist es, dass Produkte, Material sowie Ressourcen so lange wie möglich der Wirtschaft erhalten bleiben und kein vorzeitiges Abfallende herbeigeführt wird. Das Paket enthält unter anderem gesetzliche Vorgaben für das Recycling von Abfällen und sorgt so für die Schonung von Ressourcen und des Klimas. (European Comission, 2022)

Die Wirbelschichtfeuerung und Rostfeuerung, deren materielle Hauptprodukte als Bett- bzw. Rostaschen bezeichnet werden, sind die gängigsten Methoden zur Behandlung von Siedlungsabfällen vor der Deponierung. Beide Aschen bestehen hauptsächlich aus nicht brennbaren Fraktionen wie Metallen, Glas und mineralischen Bestandteilen. Die Aschen unterlaufen üblicherweise noch einer Metallabscheidung, danach wird die Glas- und Mineralfraktion auf der Deponie abgelagert. Dies steht jedoch im Widerspruch zum EU-Kreislaufwirtschaftspaket, in dem sich die Mitgliedsstaaten der EU verpflichtet haben, den Lebenszyklus von Rohstoffen zu verlängern.

Eine Möglichkeit zur Verlängerung wäre die Abtrennung und das anschließende Recycling der Glasfraktion. Die verbleibende mineralische Fraktion kann unter anderem als industriell hergestellte Gesteinskörnung im Beton eingesetzt werden und so einen Teil der natürlichen Gesteinskörnung ersetzen, um primäre Rohstoffressourcen zu schonen. Ein weiterer positiver Effekt der stofflichen Verwertung ist die Einsparung von Deponievolumen. In der vorliegenden Arbeit wird mittels Standardversuchen untersucht, ob Beton, der mit industriell hergestellter Gesteinskörnung aus Rost- und Bettaschen hergestellt wird, den normativen Anforderungen entspricht. Weiters wurde die Recyclingfähigkeit des hergestellten Betons bestimmt. Dies geschah durch Zerkleinerung und Bestimmung der wichtigsten Umweltparameter, welche daraufhin mit den österreichischen Grenzwerten für Recyclingmaterial aus Baurestmassen verglichen wurden.

## **2 Methodik**

Die für die Substitution der natürlichen Gesteinskörnung verwendeten mineralischen Fraktionen aus der Rostfeuerung und den Wirbelschichtfeuerung stammen aus zwei verschiedenen österreichischen Müllverbrennungsanlagen. Für die Betonversuche war es wichtig, eine möglichst homogene Gesteinskörnung mit einer Fraktionsgröße von 0-8 mm pro Asche herzustellen, die frei von Stoffen ist, die die Betonqualität beeinflussen könnten. Diese Aufbereitung erfolgte in mehreren Schritten (Mühl, 2022). Für die Studie wurden drei verschiedene Betone hergestellt, von denen einer rein mit natürlicher Gesteinskörnung (Kontrolle), einer mit industriell hergestellter Gesteinskörnung aus der Rostfeuerung mit einem Substitutionsanteil der natürlicher Gesteinskörnung von 12,5 % und einer mit einer industriell hergestellten Gesteinskörnung aus der Wirbelschichtfeuerung mit einem Substitutionsanteil von 25 % produziert wurden. Die Substitutionsraten basieren auf dem durch die Betonhersteller und Gesetzgeber festgelegten Maximalwert.

Die Betone wurden gemäß der österreichischen Umsetzung der EN 206 (ÖNORM B 4710) als Beton der Klasse C25/30, mit einem Größtkorn von 22 mm und einer Konsistenzklasse F52 (C25/30 XC1 GK22 F52) hergestellt. Um die Qualität der hergestellten Betonproben zu beurteilen, wurden gängige Betonprüfungen nach Frisch- und Festbetonparametern durchgeführt. Diese Parameter, die in der ÖNORM EN 12350 (ÖNORM 12350, 2019) und ÖNORM B 4710 (ÖNORM B4710, 2018) beschrieben sind, sind: das Betonausbreitmaß, die Frischbetonrohddichte, der Luftporengehalt und die Wassergehaltsprüfung im Mikrowellenofen. Die geprüften Festbetonparameter sind die Druckfestigkeit (2, 7, 28 Tage) und das Elastizitätsmodul (28 Tage). Diese Versuche wurden an Betonwürfeln und -prismen durchgeführt, die ausschließlich für diesen Zweck hergestellt wurden. Abschließend wurden die Betone zerkleinert und gemäß der österreichischen Norm für Bau-Recyclingmaterial (BMLFUW, 2015) analysiert.

## **3 Ergebnisse und Diskussion**

### **3.1 Zusammensetzung der industriell hergestellten Gesteinskörnung**

Die im industriellen Maßstab aufgearbeiteten Bett- und Rostaschen wurden einer Einzelkornsorrierung unterzogen, wobei den Fraktionen >4 mm besondere Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Rostaschen einen hohen Anteil an Konglomeraten aufweisen, was auf die Verbrennungstechnologie zurückzuführen ist. Der Anteil von Glas, der mineralischen Fraktion und der Siebfraction >4 mm variiert zwischen den beiden Verbrennungsanlagen. Auch die Zusammensetzung der Frak-

tionen in der Bettasche ist je nach Verbrennungsanlage unterschiedlich. Die Glasfraktion bildet den größten Anteil, gefolgt von der mineralischen Fraktion. Konglomerate sind hier kaum vorhanden.

### 3.2 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen

Um eine Aussage über die Qualität der Frischbetone mit den substituierten Bett- oder Rostaschen treffen zu können, wurden die Ergebnisse mit denen der Nullmischung verglichen und auf mögliche Ursachen der Abweichungen hingewiesen.

Hinsichtlich der Frischbetonrohddichte erreicht keiner der hergestellten Betone die Werte der Nullmischung. Besonders hervorzuheben ist, dass die Bettaschen eine geringere Frischbetonrohddichte aufweisen als die Rostaschen. Dies ist auf die geringere Dichte der substituierten Gesteinskörnung im Vergleich zur primären Gesteinskörnung zurückzuführen.

Die Ergebnisse des Luftporengehalts zeigen wesentlich größere Unterschiede zwischen den beiden Aschen. Keiner der Betone erreicht den Wert der Nullmischung, jedoch liegt der Beton mit der substituierten Rostasche über den Werten der Nullmischung. Beim Wassergehalt ist zu erkennen, dass der Beton mit der substituierten Bettasche einen höheren Wert als die Nullmischung erreicht. Wie beschrieben, war das Ziel, einen Beton der Konsistenzklasse F52 herzustellen. Das bedeutet, dass das berechnete Ausbreitmaß zwischen 49 und 55 cm liegt. Der Beton mit der substituierten Rostasche erreichte die geforderte Konsistenzklasse F52, der Beton mit der substituierten Bettasche jedoch nicht (Abbildung 1 und 2).

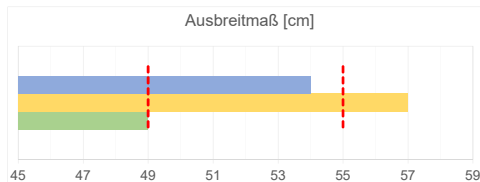


Abbildung 1: Ergebnisse der Ausbreitmaßprüfung

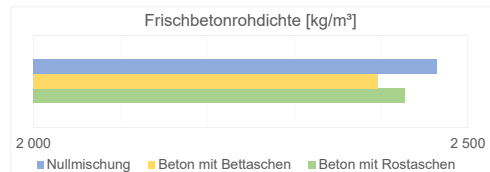


Abbildung 2: Ergebnisse der Frischbetonrohddichteprüfung

### 3.3 Ergebnisse der Festbetonbetonprüfungen

Bei den Ergebnissen zur Druckfestigkeit handelt es sich um die Durchschnittswerte von jeweils drei Versuchen. Die zu erreichende Druckfestigkeitsklasse für die Betonproben war C25/30, die für würfelförmige Körper eine Druckfestigkeit von mindestens 30 N/mm<sup>2</sup> fordert. Die Proben der Nullmischung weisen sowohl nach 2, 7 als auch nach 28 Tagen die höchste Druckfestigkeit auf. Beide Mischungen mit substituierten Rostasche erreichen in den Versuchen eine höhere Druckfestigkeit als die geforderten 30 N/mm<sup>2</sup>. Sie können daher in die Druckfestigkeitsklasse C25/30 eingeordnet werden (Abbildung 3). Für den Festbetonparameter E-Modul musste die Festigkeit der einzelnen Betonproben vor der Prüfung bestimmt werden. Hier zeigt sich ein etwas anderes Bild als bei der Druckfestigkeit. Der Beton mit der substituierten Bettasche erreicht den höchsten Wert, gefolgt von der Kontrollmischung und dem Beton mit der substituierten Rostasche (siehe Abbildung 4).

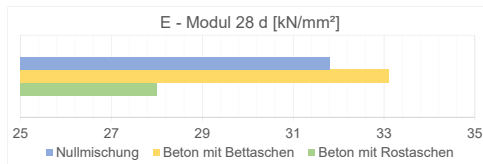


Abbildung 3: Ergebnisse des E-Modul Prüfung

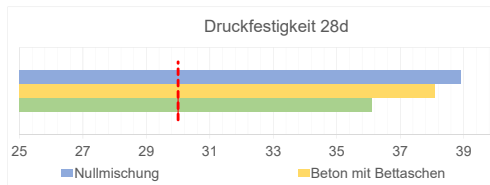


Abbildung 4: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung

Im Hinblick auf die gesetzliche Wiederverwertbarkeit erfüllt keiner der Betone die Kriterien für die elektrische Leitfähigkeit. Dies kann jedoch leicht durch das Alter der Betone (6 Monate) erklärt werden, weshalb das österreichische Umweltministerium eine Wiederholung der Prüfung dieses Parameters nach der Alterung gestattet. Danach sollte auch dieser Parameter problemlos eingehalten werden können. Alle Betone erfüllen die Anforderungen der höchsten Qualitätsklasse und damit ein automatisches Abfallende, außer beim Gesamtkupfergehalt. Zwar lassen die dabei festgestellten Überschreitungen ein Recycling in einer niedrigeren Umweltklasse, das heißt für bestimmte Recyclinganwendungen, zu, jedoch sollte auf eine Reduktion des Kupfergehaltes angestrebt werden.

## 4 Fazit und Schlussfolgerung

Die aus Verbrennungsaschen hergestellten Betone weisen sowohl bei den Indikatoren für die Betonqualität als auch für die ökologische Wiederverwertbarkeit gute Werte auf. Dies gilt insbesondere für den Beton mit der substituierten Bettasche. Weitere Untersuchungen sind im Hinblick auf andere Betonparameter erforderlich, aber auch um die optimale Mischung zu finden, um eine bessere Verarbeitbarkeit (Frischbetonparameter) und Recyclingfähigkeit (Gesamtgehalt an Kupfer im hergestellten Beton) zu erreichen.

## Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Forschungsinitiative CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der TU Wien. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Weiters bedanken wir uns sehr herzlich für die finanzielle und inhaltliche Unterstützung durch unsere Unternehmenspartner, in alphabetischer Reihenfolge: Brantner Österreich GmbH, Linz Service GmbH, Wien Energie GmbH, Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H. Dank gebührt außerdem der Magistratsabteilung MA 48 der Stadt Wien.

## Literatur/Quellen

- Austrian Standards (2018). ÖNORM B4710-1 Concrete — Specification, performance, production, use and conformity — Part 1: Rules for the implementation of ÖNORM EN 206 for normal and heavy concrete. Version 2018-01-01. Austrian Standards, Vienna.
- BMLFUW (2015). Bundesgesetzblatt 2015 II 181 Recycling-Baustoffverordnung (recycling construction material ordinance)
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft BMLFUW (Federal Ministry for Agriculture, Forestry, Environment and Water Management), Wien.
- European Commission (2020). A new Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe. European Union, Brussels.
- Mühl, J., Feher, F., Skutan, S., Stockinger, G., Lederer, J. (2022). Grate furnace or fluidized bed in municipal solid waste incineration plants: what to prefer from the view of a circular economy of MSWI-ashes?. In Thiel, S., Thomé-Kozmiensky, E., et al. (2022). Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 9. Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Thomé-Kozmienski Verlag GmbH, Neuruppin.

## Kontakt

*BSc, Felix Feher, wissenschaftlicher Mitarbeiter*

CD Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, TU Wien

Getreidemarkt 9/166.1

A-1060 Wien

E-Mail: [felix.feher@tuwien.ac.at](mailto:felix.feher@tuwien.ac.at)

Tel.: +43 1 58801 166155

Homepage: <https://www.vt.tuwien.ac.at/>

*Julia Mühl, Simon Hofer, Stefan Paul, Jakob Lederer*

TU Wien, CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, Institut für Verfahrenstechnik,

Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Wien, Österreich

*Stefan Skutan*

Ingenieurbüro Stefan Skutan e.U., St. Andrä-Wördern, Österreich



## At the beginning of Project ReSoURCE

### First steps in obtaining a comprehensive database on spent refractories

**Abstract:** Raw materials represent the backbone of our economy and are a significant lever concerning global warming. As the energy-intensive primary raw material production has by far the highest impact on the product's carbon footprint, supporting circular economy goals will contribute to saving primary raw materials and consequently to environmental protection. Due to the large diversity of refractories, the project mainly focuses on breakout material from the cement industry's rotary kilns or the steel industry's ladles. One of the first step of the project is the characterization of the breakout material to acquire a comprehensive database. It is necessary to enable a simultaneous sample investigation by all project partners. To do so, a representative sampling and subsequent sample distribution combined with a preliminary analysis of chemical and mineralogical composition are mandatory. The first representative sampling was performed on spent refractories of a cement rotary kiln. The chemical results were achieved by XRF analysis revealing that the bulk composition mainly consists of MgO and  $Al_2O_3$  adding up to about >90 wt%. Additionally,  $Fe_2O_3$ , CaO and  $SiO_2$  could be measured summing up to <5 wt% in total. The application of refuse-derived fuels (RDF) in cement rotary kilns, led to the contamination of the spent refractories with Na, K or S. These elements contribute only a small amount to the bulk composition and are in the range of < 3 wt%. Regarding the mineralogical investigation achieved by XRD analysis, it can be stated that spent refractories mainly consist of Periclase (MgO), Spinel ( $MgAl_2O_4$ ) and Sylvite (KCl); the latter is a product of infiltration and the reaction with reactive RDF. Regarding the evaluation of the sampling procedure, it can be stated that the position of sampling does not contribute significantly to either the chemical or the mineralogical variation, leading to the question of how to reduce the effort during sampling and still achieve high accuracy consistently.

## 1 Introduction

The impact of raw material production (including raw materials for refractories) is responsible for 50% of the world's carbon emissions and more than 80 % of biodiversity loss (United Nations Environment Programme, 2020). Nevertheless, consumers of refractory products such as steel, cement, glass or the non-ferrous metal industry are an important pillar of our economy and refractories are an essential asset for the continuity of these industries and are not substitutable in high-temperature processes above 1.200°C. The establishment

of a circular economy in the refractory industry not only leads to saving primary resources, but also to a reduction of CO<sub>2</sub> emissions. For example, the conversion of primary raw material, e.g. MgCO<sub>3</sub> to MgO and the use of fossil fuels to obtain the necessary process temperature contribute significantly to the CO<sub>2</sub> footprint of refractory products. After the end of use of refractories is reached, the spent material is broken out of the aggregate (e.g. steel casting ladle or cement rotary kiln), generating refractory waste materials with different compositions, depending on the product, lining composition and process conditions of the aggregate they were used in.

Currently, the practical sorting process comprises a classification of the used bricks according to their size. Bricks > 80 mm are hand sorted based on a predefined visual classification. Due to this sorting procedure, only clearly identifiable used bricks > 80 mm can be recycled; the remaining proportion (< 80 mm) is classified as unsortable and is either landfilled or downcycled.

The ReSoURCE project (Refractory Sorting Using Revolutionizing Classification Equipment) is funded by the European Union's Horizon Europe Framework Programme (HORIZON) and aims to develop an innovative automated sorting technology for recycling smaller fragments of used refractory materials and to implement a new standard in the refractory recycling industry while contributing to a more sustainable use of primary raw materials and promoting a circular economy. This will be achieved by combining technologies such as Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and hyperspectral imaging and implementing artificial intelligence (AI) software. Applying this multi-sensor-based sorting equipment enables a sorting of the fraction < 80 mm, which reduces the landfilling or downcycling of secondary raw materials.

As part of the international project consortium, the chair of waste processing technology and waste management of the Montanuniversität Leoben is leading one of the 11 work packages regarding the description and analysis of the current European waste management system and identifying potential improvement approaches. Furthermore, a chemical and mineralogical characterisation of different types of used refractory materials is carried out by the course of the work package. As soon as the first version of the sorting plant is tested with used refractory material, the sorting will be evaluated regarding yield, purity and types of impurities.

## **2 Material and Methods**

### **2.1 Representative Sampling**

The representative samples were obtained according to Aldrian (2017) and the Austrian Landfill Ordinance (DVO (2008)). The sampling was probabilistic, and was based on the statistical approach that every property, every grain has the same probability of becoming part of the sample. The materials received by RHI Magnesita were stored in roofed outdoor storages to keep track of the different types and origins. In the course of the first sampling campaign, the breakout material of a cement rotary kiln (CRK) was sampled. The prerequisite for probabilistic sampling is the accessibility of the entire quantity of the material to be sampled. Since the material sampling took place during the ongoing operation of the RHI Magnesita recycling center in Mitterdorf (Austria), this was impossible due to a lack of time, space and personnel capacities. However, 10 wheel-loader buckets, each filled with four tons of material, were taken randomly from the entirety of the breakout material and spread out on a separate large area (named "heap A – J"). The resulting heaps were



roughly divided into four subsets (e.g. A1 - A4). Afterwards each subset of each heap was sampled (A to J with subsets 1 to 4). The sample quantity was calculated following the formula from the Austrian Landfill Ordinance (DVO (2008)):

Quantity of each random sample (kg) =  $0.06 \times \text{largest grain size (95\% percentile) in mm}$

Based on the experience of the initial inspection, the grain size of the encountered materials exceeded the size of all currently available sieves. Therefore, the largest grain of the 95% percentile was roughly estimated to calculate the sample quantity needed. The estimated grain size amounts to 440 mm.

Altogether, 40 random samples were taken each weighing 25 – 30 kg, adding up to roughly one ton of material. Each sample was processed separately (see chapter 2.2). After processing and splitting, all samples were combined and homogenized to obtain a combined representative sample. Additionally, one sample of each heap was analyzed to investigate the inhomogeneity of the piles and to evaluate each sample point. Besides, the four subsets of the heap “F” were analyzed chemically to investigate the inhomogeneity of a heap. Overall, the chemical and mineralogical composition of 13 samples was determined.

## 2.2 Sample processing

The samples were crushed with a jaw crusher (Type RSB 500x2000 from Esch-Werke Duisburg) to a grain size of approximately 40 mm. Afterwards, the samples were split once using a riffle sample divider. One half was retained, and the other half was further processed with a jaw crusher (Retsch Type C1 328-6) to a grain size of 10 mm and split again until a sample quantity of approximately 1 kg was achieved.

## 2.3 Chemical investigation

The chemical composition was determined by analyzing fused (quantitative) disks by using a wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometer Bruker S8 Tiger Serie 2. The analysis was performed in compliance with the ISO 12677.

## 2.4 Mineralogical investigation

X-ray diffraction analysis of all samples was carried out by the RHI Magnesita laboratory in Leoben. A BRUKER D8 Advance was used with a voltage of 40 kV and 40 mA. All samples were measured with a  $2\theta$  angle between  $6^\circ$  and  $70^\circ$  and a step size of  $0.01^\circ$ . To evaluate the measured data, the Bruker EVA Topas software was used.

# 3 Results and Discussion

The results of the chemical investigation of 13 analyzed samples show that CRK samples mainly consists of MgO with a mean value of 82,3 wt% and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  with a mean value of 9,5 wt%. Other components are  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (2 wt%), CaO (1,8 wt%) and  $\text{SiO}_2$  (1,8 wt%). Due to the use of refuse-derived fuels in the cement industry, infiltrations (propagation into the refractory matrix) within the used refractory bricks can be recorded. These infiltrations can also be seen in the chemical composition, consisting of alkaline elements, such as sodium

or potassium: However, their contribution to the overall bulk composition is rather subordinate, e.g. 0,8 wt% of  $K_2O$  and 0,09 wt% of  $Na_2O$ . The sulfur content was determined around 1,3 wt%. The graph in Figure 1 shows the XRF results of the 13 samples analysed, and the respective enrichment or depletion of elements relative to the chemical composition of the combined sample. It shows outliers identified by their higher or lower  $MgO$ ,  $SiO_2$  and  $Al_2O_3$  content. The deviation of the  $Fe_2O_3$  content is assumed to be caused by variable  $Fe_2O_3$  contents of different refractory products prior to their application in the CRK.

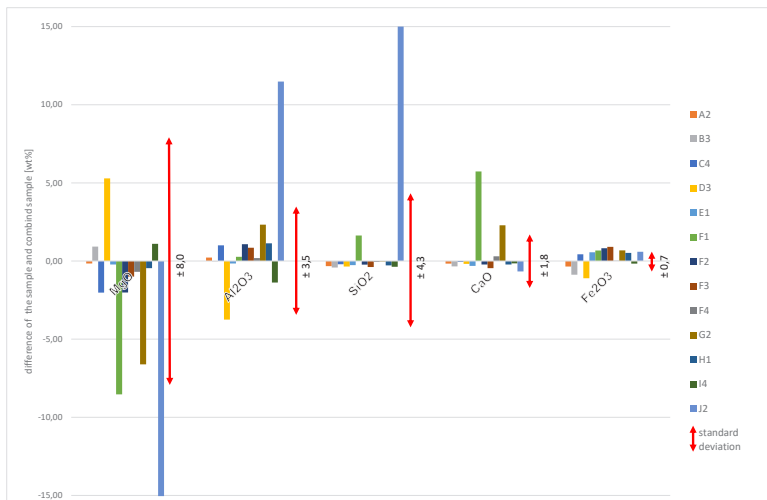


Figure 1: XRF results of the 13 individually analyzed samples subtracted by the chemical composition of the combined sample

The chemical analyses revealed that hardly any variation with respect to the chemical composition was present. However, 3 samples point out prominent differences. The sample "F1" clearly showed presence of clinker during the visual inspection and hand sorting, which is confirmed chemically by higher  $SiO_2$  and  $CaO$  content, two of the main constituents of clinker. The other outlier sample was "J2". Although sample "J2" showed a lower  $MgO$  content (58 wt%), the content of  $Al_2O_3$  (20 wt%) and  $SiO_2$  (16 wt%), however, exceeded all other samples. The  $CaO$  content of sample "J2" was in the range of the bulk composition. For sample "G2", a higher  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  and  $CaO$  content was detected which could also hint to a higher amount of clinker within the sample.

The variation of the chemical composition within a heap was investigated by analysing each individual sample of heap "F". The results also show minimal variation except for the overall outlier F1. The composition of the combined sample is in good agreement with the mean values of the individually analysed samples and lies within the standard deviation when outliers are excluded.

The mineralogical investigation revealed that all analysed samples primarily contain the mineral phases Periclase ( $MgO$ ), Spinel ( $MgAl_2O_4$ ) and Sylvite ( $KCl$ ). The latter seems to be the product of infiltration and the use of RDF in CRK. No explicit differences between the XRD results were found. The combined sample does not differ from that in terms of its mineral composition.

## Conclusion and Future Work

Based on the first representative sampling campaign of spent refractory material of a CRK and the preliminary results, it can be stated that the position of sampling does not contribute to a significant chemical or mineralogical variation. The results of the single sample analysis and the results of the analysis of a combined sample show similar chemical and mineralogical compositions. However, the question arises if a smaller sample quantity could also lead to similar results. Further steps will not only consider how sampling can be simplified under the condition of consistent accuracy but also include further investigations of the material, characterizing the detailed mineral composition (electron microprobe analysis) and leaching behavior.

## Acknowledgement

This project is funded by the European Union's Horizon Europe Framework Programme (HORIZON) under the Grant Agreement Number: 101058310

## Reference

- Aldrian, A. (2017): Proposed solutions for sampling, sample preparation and analysis of coarse and heterogeneous solid wastes. PhD thesis. Montanuniversität Leoben, Leoben.
- DVO (2008): Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008 – DVO 2008).
- United Nations Environment Programme (2020): Global Resources Outlook 2019. Natural Resources for the Future We Want. New York: United Nations.

## Kontakt

*Florian Feucht, Research Assistant*

Montanuniversität Leoben / Chair of Waste Processing Technology and Waste Management

Tel.-Nr. +43 3842 / 402-5137

E-Mail: [florian.feucht@unileoben.ac.at](mailto:florian.feucht@unileoben.ac.at)



## **Zigarettenfilter als potenziell gefährlicher Abfall – Bewertung im Kontext des Europäischen Abfallverzeichnisses**

**Abstract:** *Gelangen Zigarettenfilter in die Umwelt, entstehen sowohl gesundheitliche und ökologische als auch ökonomische Kosten. Durch das Littering von Zigarettenfiltern, das weltweit am häufigsten gelitterte Produkt, entstehen in Deutschland jährliche Zusatzkosten von 225 Millionen Euro. Bedingt durch die hohe Schadstoffakkumulation in den Filtern ist von einer Toxizität dieses schlecht abbaubaren Abfalles auszugehen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Bewertung von Zigarettenfiltern im Kontext des Europäischen Abfallverzeichnisses. Dazu wird die folgende Forschungsfrage formuliert: Inwieweit erfüllen Zigarettenfilter die Kriterien zur Einstufung als gefährlicher Abfall nach geltendem deutschen/europäischen Recht und welche Auswirkungen haben die gefahrenrelevanten Eigenschaften auf Mensch und Umwelt? Zur Beantwortung der Frage wird eine Literaturarbeit durchgeführt, welche den aktuellen Forschungsstand den gefahrenrelevanten Eigenschaften zuordnet. Geprüft werden eine mögliche akute Toxizität, Mutagenität, Ökotoxizität sowie eine nachhaltige Gefährdung der Umwelt. Die Ergebnisse fassen die Gefährdungen von Organismen und Ökosystemen durch akkumulierte Schadstoffe und Mikrofasern der Filter zusammen. Hinweise auf eine mögliche Einstufung von Zigarettenfiltern als gefährlicher Abfall nach HP 6, 11, 14 und 15 mittels Prüfverfahren der OECD sowie Konzentrationsgrenzen der AVV werden dokumentiert und analysiert. Da die Toxizität gerauchter Zigarettenfilter signifikant höher ist als die nicht gerauchter, zeigt die Arbeit, dass die Gefährdung durch Zigarettenfilter insbesondere auf ihrer Eigenschaft als Filter und der damit verbundenen Akkumulation diverser Stoffgruppen beruht. Wird gemäß der AVV nur ein einzelnes Kriterium zur Einstufung geprüft, so sind Zigarettenfilter, nach aktuellem Kenntnisstand, kein gefährlicher Abfall. Betrachtet man jedoch die Summe der Eigenschaften, so wird die von den Filtern ausgehende Gefährdung sowie die Notwendigkeit einer entsprechenden Einstufung deutlich. Somit zeigt die Arbeit eine Schwachstelle der Abfalleinstufung nach europäischem Recht auf.*

## 1 Einleitung

Zigarettenfilter sind das am häufigsten gelitterte Produkt weltweit (WHO 2017). Jährlich werden circa 340 bis 680 Millionen Kilogramm Zigaretten unsachgemäß in der Umwelt entsorgt. Durch das Rauchen von Zigaretten und die damit verbundenen Abfälle gelangen über 4.000 Chemikalien in die Umwelt (Hoffmann et al. 1997). Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der daraus resultierenden Frage, ob es sich bei Zigarettenfiltern als Abfallfraktion um einen gefährlichen Abfall gemäß des Europäischen Abfallverzeichnisses handelt oder nicht. Daraus ergibt sich die folgende Forschungsfrage: Inwieweit erfüllen Zigarettenfilter die Kriterien zur Einstufung als gefährlicher Abfall nach geltendem deutschen/europäischen Recht und welche Auswirkungen haben die gefahrenrelevanten Eigenschaften auf Mensch und Umwelt?

## 2 Methodik

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird eine Literaturrecherche durchgeführt, welche sich auf Forschungsergebnisse seit 2010 konzentriert. Der Schwerpunkt liegt auf den Auswirkungen der Zigarettenfilter, welche aufgrund ihrer Eigenschaft als Filter und damit als Akkumulator entstehen. Überprüft werden Zigarettenfilter, welche aus dem Polysaccharid Celluloseacetat bestehen.

Der aktuelle Forschungsstand bildet die Grundlage zur Einordnung in den Kontext gefahrenrelevanter Eigenschaften (HP-Kriterien). Dieser wird anhand einer Analyse von 13 Studien ermittelt. Anschließend werden die Ergebnisse der Recherche den HP-Kriterien gemäß Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) zugeordnet und geprüft. Die Prüfung basiert auf Amtsblatt Nr. C 124/01 Anhang 3. Herangezogen werden des Weiteren die Richtlinien der *Organisation for Economic Cooperation and Development* (OCED) und die Deponieverordnung (DepV) gemäß den Hinweisen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA).

## 3 Ergebnisse der Literaturrecherche

Der herkömmliche Zigarettenfilter besteht aus 15.000 Mikrofasersträngen, den Celluloseacetat-Fasern (Belzagui et al. 2021; Novotny und Slaughter 2014). In gerauchten Zigarettenfiltern (SCB) sind der akut toxische Stoff Nikotin sowie die Elemente Ba, As, Se und Pb nachgewiesen worden (Koroleva et al. 2021; Montalvão et al. 2019b; Qamar et al. 2020). Das bedeutet, der Filter wird seiner Funktion gerecht, nämlich den Raucher und seine Lunge vor den im Tabak enthaltenen und beim Rauchen entstehenden Schadstoffen zu schützen. Der Filter selbst enthält allerdings die herausgefilterten Schadstoffe bzw. Schadstoffgruppen.

Die Exposition gegenüber Zigarettenfilter führt nachweisbar zur Letalität diverser Organismen (Belzagui et al. 2021; Slaughter et al. 2011). Besonders toxisch sind die SCB in den ersten 30 Tagen, wobei ein erneuter Anstieg nach zwei bis fünf Jahren nachgewiesen werden konnte (Bonanomi et al. 2020).

Es konnten das mutagene Schwermetall Cobalt und der polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoff Benzo[a]pyren im Sickerwasser identifiziert werden (Dobaradaran et al. 2019; Koroleva et al. 2021). Des Weiteren wurden Schäden am genetischen Material sowie eine Bioakkumulation im Muskelgewebe und ein signifikanter Anstieg anormalen Zellen während der Mitose beobachtet (Montalvão et al. 2019a, 2019b; Wright et al. 2015). Die gewässergefährdenden Stoffe Nikotin, Co, As, Se, Naphthalin, Fluoren, Fluoranthren,

Benzo[a]anthracen, Benzo[a]pyren, Benzo[ghi]perylen, Dibenzo[a,h]anthracen wurden im SCB-Sickerwasser nachgewiesen (Dobaradaran et al. 2019; Koroleva et al. 2021). Der Kontakt zu diesem führt zur Letalität diverser aquatischer Organismen. Neben den HP-Kriterien sind die Auswirkungen der Mikrofasern aus Celluloseacetat in aquatischer und terrestrischer Umgebung zu berücksichtigen. Durch den langsamen Abbau (Belzagui et al. 2021; Bonanomi et al. 2020) wird eine hohe Akkumulation des Kunststoffes in aquatischen oder urbanen Umgebungen erreicht (Belzagui et al. 2021). Es ist weltweit mit bis zu 0,3 Mio. Tonnen Mikrofasern pro Jahr zu rechnen.

## 4 Diskussion

Im Folgenden wird der Forschungsstand den HP-Kriterien zugeordnet. Zur Berechnung werden 190,93 mg als durchschnittliches Gewicht eines gerauchten Zigarettenfilters (SCB) verwendet (Qamar et al. 2020). Da die Grenzwerte der Gefahrenklassen 0,1 bzw. 1 % akut toxisch (HP 6) weder durch Pb ( $5,14 \times 10^{-5} \%$ ) noch durch Ba ( $2,85 \times 10^{-4} \%$ ) (Koroleva et al. 2021) erreicht werden und die OECD-Richtlinie 423 noch nicht umgesetzt wurde, ist eine Einstufung als gefährlicher Abfall nicht möglich. Die Relevanz der Richtlinie kann durch die Bestimmung der effektiven Konzentration (EC50) aufgezeigt werden. Diese beträgt  $3,25 \text{ mg kg}^{-1}$  für *Daphnia magna* sowie  $521,24 \text{ mg kg}^{-1}$  für *Pimephales promelas* (Belzagui et al. 2021; Slaughter et al. 2011). Liegen Konzentrationen unterhalb des Grenzwertes von  $2.000 \text{ mg kg}^{-1}$  vor, so ist der Stoff gemäß Richtlinie 423 als akut toxisch einzustufen. Für die Richtlinie werden jedoch Ratten als Testorganismus verwendet, weshalb keine konkrete Entscheidung getroffen werden kann.

Eine dauerhafte Veränderung des genetischen Materials durch einen einzelnen Stoff führt zur Einstufung nach HP 11 „mutagen“ (Abl. Nr. C 124/01 Anhang 3). Die im Eluat der SCB nachgewiesenen mutagenen Stoffe liegen jedoch mit  $1,43 \times 10^{-4}$  (Benzo[a]pyren) bzw.  $2,25 \times 10^{-5} \%$  (Cobalt) (Dobaradaran et al. 2019; Koroleva et al. 2021) unterhalb der Berücksichtigungsgrenzwerte 0,1 bzw. 1,0 %. Da jedoch genetische Veränderungen diverser Organismen beobachtet wurden (Montalvão et al. 2019b; Wright et al. 2015), sind Zigarettenfilter auf ihre mutagenen Eigenschaften nach Maßgabe der ECHA-CLP-Leitlinien (Einstufungs- und Kennzeichnungsverzeichnis) zu untersuchen (Abl. Nr. C 124/01 Anhang 3).

Bei gewässergefährdenden Stoffen handelt es sich um gefährlichen Abfall nach HP 14 „ökotoxisch“ (Abl. Nr. C 124/01 Anhang 3). Die in den Filtern enthaltenen Stoffe werden insbesondere durch Regenereignisse ausgewaschen (Roder Green et al. 2014). Ein einzelner SCB kann 1.000 l Wasser mit Nikotin kontaminieren. Dies stellt folglich eine Gefährdung für alle Umweltbereiche dar, mit denen SCB in Kontakt kommen. Ökotoxizität kann mittels der OECD-Richtlinie 210 bestimmt werden. *Pimephales promelas* stellt eine zu prüfende Süßwasserfischart dar. Die Auswirkungen von SCB wurden in einem vergleichbaren Versuch bereits analysiert (Slaughter et al. 2011). Die EC50 von  $4,3 \text{ SCB l}^{-1}$  deutet auf eine Einstufung als gefährlicher Abfall hin, sofern sich die Ergebnisse im konkreten Prüfverfahren wiederholen.

Ein Abfall, der eine gefahrenrelevante Eigenschaft entwickeln kann, welche der ursprüngliche Abfall nicht aufweist, wird nach HP 15 als gefährlich eingestuft (Abl. Nr. C 124/01 Anhang 3). Zur Bewertung von HP 15 werden die Hinweise der LAGA herangezogen. Ein entsprechendes Eluat nach Anhang 4 Abs. 3.2.1.1 DepV wurde nach aktuellem Kenntnisstand noch nicht hinsichtlich seiner Bleikonzentration analysiert. Aufgrund der hohen Divergenz der gemessenen Bleigehalte in anderen Eluaten von  $761,59 \text{ mg l}^{-1}$  bzw.  $0,04 \text{ mg l}^{-1}$  (Cardoso et al. 2018; Koroleva et al. 2021), lässt sich keine endgültige Aussage über die Einstufung treffen.

Es ist demnach von großer Bedeutung ein Eluat gemäß DepV herzustellen und zu analysieren. Außerdem ist anzumerken, dass es zu einem zweiten Anstieg der Toxizität im Verlauf des Abbaus kommt (Bonanomi et al. 2020). Dem Ziel der Kreislaufwirtschaft folgend, Mensch und Umwelt zu schützen, ist dementsprechend eine thermische Behandlung von Zigarettenfiltern und Siedlungsabfällen erforderlich. Des Weiteren stellen Mikrofasern eine Gefährdung für die Umwelt dar (Belzagui et al. 2021). Die letale Wirkung von Zigarettenfiltern mit Mikrofasern ist im Vergleich zu Filtern ohne diese deutlich erhöht.

Die zentrale Limitation der Arbeit stellt die mangelnde Einheitlichkeit der Sickwasserproben dar. Die Herstellung unterscheidet sich sowohl in Konzentration als auch Inkubationsbedingungen, woraus sich eine hohe Divergenz der Ergebnisse ergibt.

## 5 Fazit

Der aktuelle Forschungsstand deutet auf eine Einstufung von gerauchten Zigarettenfiltern mittels Prüfverfahren gemäß HP 6 „akut toxisch“, HP 11 „mutagen“, HP 14 „ökotoxisch“ und HP 15 „Abfall, der eine gefahrenrelevante Eigenschaft entwickeln kann“ hin. Die Vielzahl der Gefährdungen betont die Notwendigkeit einer zeitnahen Durchführung der genannten Verfahren. Es sind insbesondere Filter mit Mikrofasern aus Celluloseacetat zu prüfen, da diese am häufigsten verkauft und geraucht werden.

Wird die Summe der Gefährdungen durch gerauchte Zigarettenfilter betrachtet, so zeigt sich, wie relevant eine Einstufung als gefährlicher Abfall für Mensch und Umwelt ist, auch wenn einzelne Grenzwerte nicht überschritten werden.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit ergibt sich die Notwendigkeit der Überarbeitung des europäischen Abfall-Rechts. Die Einstufung des gefährlichen Abfalls sollte nicht nur mittels eines einzelnen Kriteriums erfolgen, hingegen ist die Berücksichtigung der gefährlichen Wirkung eines Abfalls durch Summation verschiedener gefahrenrelevanter Eigenschaften unerlässlich und in der AVV festzuhalten.

## Literatur/Quellen

- Belzagui, Francisco et al. 2021. „Cigarette Butts as a Microfiber Source with a Microplastic Level of Concern“. *Science of The Total Environment* 762: 144165.
- Bonanomi, Giuliano et al. 2020. „The Fate of Cigarette Butts in Different Environments: Decay Rate, Chemical Changes and Ecotoxicity Revealed by a 5-Years Decomposition Experiment“. *Environmental Pollution* 261: 114108.
- Cardoso, Letícia Silva et al. 2018. „The Exposure to Water with Cigarette Residue Changes the Anti-Predator Response in Female Swiss Albino Mice“. *Environmental Science and Pollution Research* 25(9): 8592–8607.
- Dobaradaran, Sina et al. 2019. „Cigarette Butts: An Overlooked Source of PAHs in the Environment?“ *Environmental Pollution* 249: 932–39.
- Hoffmann, Dietrich, et al. 1997. „The Changing Cigarette“. (26(4)): 427–34.



- Koroleva, Elizaveta et al. 2021. „Impact of Cigarette Butts on Bacterial Community Structure in Soil“. *Environmental Science and Pollution Research* 28(25): 33030–40.
- Montalvão, Mateus Flores et al. 2019a. „How Leachates from Wasted Cigarette Butts Influence Aquatic Life? A Case Study on Freshwater Mussel *Anodonta trapesialis*“. *Science of The Total Environment* 689: 381–89.
- Montalvão, Mateus Flores et al. 2019b. „An Insight into the Cytotoxicity, Genotoxicity, and Mutagenicity of Smoked Cigarette Butt Leachate by Using *Allium Cepa* as Test System“. *Environmental Science and Pollution Research* 26(2): 2013–21.
- Novotny, Thomas E., und Elli Slaughter. 2014. „Tobacco Product Waste: An Environmental Approach to Reduce Tobacco Consumption“. *Current Environmental Health Reports* 1(3): 208–16.
- Qamar, Wajhul et al. 2020. „Cigarette Waste: Assessment of Hazard to the Environment and Health in Riyadh City“. *Saudi Journal of Biological Sciences* 27(5): 1380–83.
- Roder Green, Amy L. et al. 2014. „Littered Cigarette Butts as a Source of Nicotine in Urban Waters“. *Journal of Hydrology* 519: 3466–74.
- Slaughter, Elli et al. 2011. „Toxicity of cigarette butts, and their chemical components, to marine and freshwater fish“. *Tobacco Control* 20(Suppl\_1): i25–29.
- WHO, Hrsg. 2017. *Tobacco and Its Environmental Impact: An Overview*. Genf: World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/255574> (20. April 2022).
- Wright, Stephanie L. et al. 2015. „Bioaccumulation and Biological Effects of Cigarette Litter in Marine Worms“. *Scientific Reports* 5(1): 14119.

## Kontakt

B. Sc. Evelyn Finkbeiner & Prof. Dr. Stefan Gäth  
Justus-Liebig-Universität Gießen  
Professur für Abfall- und Ressourcenmanagement  
[evelyn.finkbeiner@en.uni-giessen.de](mailto:evelyn.finkbeiner@en.uni-giessen.de)



## Ökobilanzielle Bewertung der HTC und Pyrolyse von Klärschlamm

**Abstract:** *Angesichts wachsender Anforderungen in Bezug auf die Emissionsreduktion, die Rückgewinnung von Nährstoffen, die Erzeugung sauberer Energie und die Implementierung einer Kreislaufwirtschaft stehen die konventionellen Verwertungswege von Klärschlämmen vor großen Herausforderungen. Deshalb wurde mithilfe einer Ökobilanz untersucht, ob die thermochemischen Konversionsverfahren der hydrothermalen Carbonisierung (HTC) und der Pyrolyse sowie die stofflichen und energetischen Anwendungen der entstandenen Biokohlen und Hydrokohlen eine nachhaltigere Form der Klärschlammbehandlung darstellen. Insgesamt wurden acht unterschiedliche Nutzungsszenarien analysiert, die Vergleiche der Behandlungsverfahren untereinander und mit dem Benchmark Prozess der Monoverbrennung ermöglichten. Darüber hinaus konnten die ökologischen Auswirkungen der unterschiedlichen Anwendungspfade und Anlagenkonfigurationen aufgezeigt werden. Die Ergebnisse der Ökobilanzierung ergaben in den meisten Umweltwirkungskategorien Vorteile für die Prozessketten der HTC im Vergleich zur Pyrolyse und der Monoverbrennung. Allerdings zeigte die direkte, stoffliche Anwendung der Hydrokohlen ein erhöhtes Toxizitätspotential, sodass eine energetische Verwertung der Hydrokohlen aus vorbelasteten Substraten sinnvoller erscheint. Insgesamt konnten aus ökobilanzieller Sicht für beide thermochemischen Verfahren vorteilhafte Verwertungspfade für Klärschlamm im Gesamtkontext einer nachhaltigen Abfallwirtschaft identifiziert werden.*

### 1 Einleitung

Wachsende Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel und das Schwinden endlicher Ressourcen erfordern angepasste Verwertungswege in der Abfallwirtschaft, die eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft für kritische Ressourcen berücksichtigen und gleichzeitig ein möglichst emissionsarmes Umweltprofil besitzen. Speziell Klärschlämme, die aufgrund ihres quantitativen Aufkommens von ca. 1.740.000 Mg (Trockenmasse (TM)) pro Jahr (Destatis, 2022), ihrer potentiellen Umweltgefährdung durch darin enthaltene Schadstoffe sowie ihrer Funktion als Träger wertvoller Nährstoffe (Roskosch & Heidecke, 2018) einen wichtigen Stoffstrom innerhalb der Abfallwirtschaft darstellen, bedürfen eines besonderen Augenmerks. So könnte beispielsweise die Hälfte der jährlich in der europäischen Landwirtschaft eingesetzten Menge an Phosphor durch Klärschlamm bereitgestellt werden (Egle et al., 2016). Nichtsdestotrotz liegt der Schwerpunkt der Klärschlammbehandlung primär auf der Minimierung des Gewichtes und des Volumens, um zum einen die Entsorgungskosten zu senken und zum anderen die Risiken bei der Entsorgung zu minimieren (Barry et al. 2019). Deshalb wird Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen aktuell und vor allem zukünftig thermisch

entsorgt und nur noch zu einem geringen Anteil in der Landwirtschaft und dem Landschaftsbau stofflich verwertet. Bei der thermischen Verwertung landet aktuell etwa die Hälfte des anfallenden Klärschlammes in der Monoverbrennung und die andere Hälfte in der Mitverbrennung (Schnell et al. 2020). Durch die jüngsten Entwicklungen, wie zum Beispiel die Änderungen der deutschen Klärschlammverordnung, werden die Entsorgungswege der Mitverbrennung aufgrund der Rückgewinnungspflicht für Phosphor in Zukunft eingeschränkt. Infolgedessen wird eine erhebliche Zunahme der Monoverbrennungskapazität erwartet, da dieses Entsorgungsverfahren die Kombination von einem schadstoffminimierenden Entsorgungsweg und einer potentiellen Phosphorrückgewinnung verspricht (Schnell et al. 2020). Die bei der Verbrennung auftretenden Energieströme sind aufgrund der langjährigen Praxis hinreichend genau erforscht, wohingegen über die ökologischen Auswirkungen der gesamten Prozessketten der Monoverbrennung sowie über die direkten Verbrennungsemissionen insgesamt nur wenig Informationen vorliegen (Chang et al., 2022). In Bezug auf den Einsatz alternativer Behandlungsverfahren wie Pyrolyse oder hydrothermale Carbonisierung (HTC) fehlen allerdings zuverlässige und umfassende ökologische Bewertungen der verschiedenen Prozessketten zur Herstellung und Nutzung von Biokohlen und Hydrokohlen aus Klärschlämmen (Mayer et al., 2021; Gievers et al., 2021).

## 2 Methodik

Vor dem Hintergrund, dass eine ökobilanzielle Bewertung besonders für die Beurteilungen von neuen Technologien oder eines neuen Systems nützlich ist, für das nur begrenzte oder keine Daten in einem relevanten, industriellen Maßstab verfügbar sind (Christensen et al. 2020), wurden die thermochemischen Konversionstechnologien mithilfe einer vergleichenden Ökobilanz bewertet. Dafür wurden anhand vergleichender Untersuchungen die potentiellen Umweltwirkungen der betrachteten, thermochemischen Konversionsverfahren erfasst und untereinander sowie mit dem Benchmark Prozess der Monoverbrennung verglichen. Des Weiteren erfolgte eine Beurteilung der Umweltauswirkungen der Biokohle- und Hydrokohleanwendungen sowie der möglichen Auswirkungen auf angrenzende Systeme. Dafür wurden vier Anwendungsfälle für die entstehenden Karbonisate ausgewählt, die entweder eine stoffliche Nutzung oder eine energetische Verwertung betrachteten. Die Ökobilanz wurde dabei gemäß den Anforderungen der Normen ISO 14040:2006 und 14044:2006 durchgeführt. Zur Berechnung aller Stoff- und Energieströme, die bei den Behandlungsprozessen selbst, den zugehörigen vor- und nachgelagerten Prozessen sowie bei den verschiedenen Anwendungen der Biokohle und Hydrokohle auftreten, wurde ein Modell für die Prozessketten in der LCA-Software GaBi ts erstellt.

### 2.1 Referenzfluss

Als Referenzfluss des Systems wurde Faulschlamm einer bestehenden, kommunalen Kläranlage mit einem Trockensubstanzgehalt (TS) von 5% und einem organischen Trockensubstanzgehalt (oTS) von 48% TS als Substrat für die thermochemische Konversion definiert. Daraus ergab sich für die funktionelle Einheit (FU) der Ökobilanz die „Behandlung von 1 kg Klärschlamm nach anaerober Faulung mit einem Gesamtfeststoffgehalt von 5%“.

## 2.2 Systemgrenzen und Anwendungsszenarien

Im betrachteten System tritt der Klärschlamm als Abfall ohne Emissionen aus den Vorketten in das modellierte System ein (siehe Ekvall et al. 2007; Pradel et al. 2016). Für alle anderen Stoff- und Energieströme, die im Zusammenhang mit den untersuchten Prozessketten stehen, wurden die kompletten Lebenszyklen „von der Wiege bis zur Bahre“ modelliert. Die Systemgrenze der modellierten Systeme umfasst für die Pyrolyseketten die Entwässerung, Trocknung und Pyrolyse des Klärschlammes, den möglichen Transport und die Lagerung der Biokohlen, die Strom- und Wärmeerzeugung und die vier verschiedenen Biokohleanwendungen. Für die HTC-Ketten wurden die Entwässerung und die HTC des Klärschlammes, die Separation des entstehenden HTC-Schlammes, die Prozesswasseraufbereitung, der Transport und die Lagerung der Hydrokohlen, die Strom- und Wärmeerzeugung sowie die vier verschiedenen Hydrokohleanwendungen betrachtet. Insgesamt wurden acht Hauptszenarien der Karbonisat-Anwendung evaluiert (siehe Tabelle 1).

*Tabelle 1: Szenarien der untersuchten Prozessketten*

<b>Szenario</b>	<b>Behandlungsprozess</b>	<b>Anwendung der Karbonisate</b>	<b>Substituierte Prozesse</b>
SH1	HTC	Landwirtschaft	NPK-Dünger
SH2	HTC	Gartenbau	Torf
SH3	HTC	Monoverbrennung	Energie aus Erdgas
SH4	HTC	Mitverbrennung	Energie aus Braunkohle
SP1	Pyrolyse	Landwirtschaft	NPK-Dünger + Kalk
SP2	Pyrolyse	Gartenbau	Torf
SP3	Pyrolyse	Kaskadennutzung in der Landwirtschaft	NPK-Dünger + Kalk
SP4	Pyrolyse	Mitverbrennung	Energie aus Braunkohle

## 2.3 Modellierungsansatz

Die Modellierung der Prozessketten erfolgte mit Hilfe von generischen Daten aus den Ökobilanzierungsdatenbanken von GaBi und ecoinvent (Version 3.6) für das Hintergrundsystem, wohingegen das Vordergrundsystem anhand der prozessbasierten Modellierung der einzelnen Prozesskettenglieder abgebildet wurde. Dabei wurden Gutschriften für substituierte Prozesse und Rohstoffe aus den Datenbanken angerechnet. Den geografischen Rahmen der Ökobilanz bildete Deutschland. Die Prozesse wurden mit der Ökobilanzierungssoftware GaBi ts (Version 10, sphera solutions GmbH, Leinfelden-Echterdingen, Deutschland) modelliert. Als Datengrundlage wurden die von GaBi und ecoinvent bereitgestellten Sachbilanzdatensätze verwendet. Einige Daten zur Entwässerung, Trocknung, Pyrolyse, HTC, Prozesswasseraufbereitung und zu einigen Nebenströmen wurden entweder geschätzt, berechnet oder aus der Literatur entnommen.

## **2.4 Wirkungsabschätzungsmethode**

Die Ökobilanzierung wurde unter Verwendung der ReCiPe 2016 Midpoint-Methode und der hierarchischen Perspektive, die auf den gängigsten politischen Grundsätzen basiert und beispielsweise einen mittleren Zeitrahmen von 100 Jahren für das Klimawandelpotential verwendet (Huijbregts et al., 2017), durchgeführt. Um ein vollständiges Bild der Umweltauswirkungen der verschiedenen alternativen Prozessketten zu erhalten, wurden folgende Umweltwirkungskategorien betrachtet: Klimawandel, Feinstaub, Fossiler Ressourcenverbrauch, Süßwasser Ökotoxizität, Süßwasser Eutrophierung, Ionisierende Strahlung, Ozonabbau, Photochemische Oxidationsmittelbildung, Versauerung, Terrestrische Ökotoxizität, Humantoxizität (krebs-erregend), Humantoxizität (nicht krebs-erregend).

## **3 Ergebnisse der Ökobilanzierung**

Die Auswertung der Energie- und Massenflüsse der HTC im Vergleich zur Pyrolyse und Monoverbrennung ergab, dass die Einbindung der HTC als Alternative zur Klärschlamm-trocknung energetische Vorteile bietet und dadurch positive Auswirkungen auf die Emissionscharakteristik entstehen. Im Vergleich zur Trocknung können durch die HTC Trockensubstanzgehalte in den Biokohlen von 60 % und mehr erreicht werden. Parallel dazu entfällt der sehr energieaufwändige Verdampfungsprozess des Wassers, sodass Wärmeenergie und elektrische Energie eingespart werden und dadurch Emissionen aus der Wärmebereitstellung minimiert werden können. Zusätzlich konnten für die Umweltauswirkungen der betrachteten Prozessketten folgende Ergebnisse gewonnen werden.

### **3.1 Prozessketten der HTC**

Die Auswertung der Emissionsprofile zeigt für die untersuchten Nutzungsszenarien der Hydrokohle unterschiedliche Vor- und Nachteile der einzelnen Anwendungen auf. Das Treibhausgaspotential für die Szenarien SH1-SH4 ergab, dass die landwirtschaftliche Nutzung (SH1) die höchsten Emissionen der untersuchten Szenarien aufwies, wohingegen bei der Anwendung in die Mitverbrennung (SH4) die geringsten Treibhausgasemissionen auftraten. Der stoffliche Einsatz der Hydrokohle zeigte aufgrund der enthaltenen organischen Schadstoffe ein erhöhtes Toxizitätspotential in den entsprechenden Wirkungskategorien. Insgesamt konnte ermittelt werden, dass bei der energetischen Anwendung der Biokohlen die erzielten Gutschriften aus der Substitution fossiler Bereitstellungspfade sowohl für die HTC als auch für die Pyrolyse ökologische Vorteile in nahezu allen Umweltwirkungskategorien bieten.

### **3.2 Prozessketten der Pyrolyse**

Die Treibhausgasemissionen der Pyrolyse hingen zu einem großen Teil mit der Bereitstellung der für den vorgeschalteten Trocknungsprozess benötigten thermischen und elektrischen Energie zusammen. Allerdings könnten die Emissionen an Treibhausgasen um bis zu 22% reduziert werden, indem die Verbräuche an elektrischer und thermischer Energie für die Trocknung verringert werden und die Bereitstellung der benötigten elektrischen Energie aus Biogas erfolgt. Allgemein konnte für alle Szenarien (SP1-SP4) ermittelt werden, dass die höchsten Gutschriften aufgrund der Substitution von Düngemittel, durch die Kohlenstoff-sequestrierung der Biokohle sowie aus dem verminderten Einsatz fossiler Rohstoffe wie Torf und Braunkohle generiert werden konnte. Das Modell zeigte allerdings eine hohe Sensitivität gegenüber der zu erset-

zenden Menge an fossilen Rohstoffen. Zudem konnte gezeigt werden, dass auf Grundlage der modellierten Kohlenstoffgehalte die Anwendung der Biokohle aus Klärschlamm als Kohlenstoffsенke aktuell noch keine Negativ-Emissions-Technologie darstellt. Dazu müssten die Hintergrundprozesse wie der Strom-Mix defossiliert werden und die Kohlenstoffgehalte der Biokohle höher ausfallen. Im Hinblick auf die weiteren Umweltwirkungskategorien konnte ermittelt werden, dass durch die Phosphorgehalte ein erhöhtes Eutrophierungspotential besteht, welches im Hinblick auf eine gewollte Düngewirkung allerdings als nicht maßgeblich für eine schädliche Umweltwirkung einzuordnen ist. Darüber hinaus konnte für andere Schadstoffe wie beispielsweise Schwermetalle, aufgrund des verminderten Mobilitätspotentials durch den Konversionsprozess, keine ausgeprägte Erhöhung des Toxizitätspotentials festgestellt werden.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Ökobilanzierung unterstreichen das Potenzial der HTC und Pyrolyse für eine nachhaltige Verwertung der anfallenden Klärschlämme. Bei einer angepassten Verwertungsstrategie können sowohl die Pyrolyse als auch die HTC ökologische Vorteile gegenüber der Monoverbrennung bieten. Zudem konnten durch die ökobilanzielle Bewertung der Prozessketten kritische Aspekte der stofflichen und energetischen Nutzung der Biokohlen und Hydrokohlen aufgedeckt und verschiedene Anlagenkonfigurationen evaluiert werden. Dadurch können zukünftig die ökologischen Auswirkungen der beiden thermochemischen Konversionsverfahren bei der Planung nachhaltiger Abfallwirtschaftssysteme zur Klärschlammbehandlung berücksichtigt werden und so optimierte Lösungsansätze für die jeweiligen Kläranlagenstandorte gefunden werden.

## Danksagung

Das Projekt, in dem die Forschungsergebnisse erzielt wurden, erhielt eine Förderung aus Landesmitteln des „Niedersächsischen Vorab“.

## Literatur/Quellen

- Barry, D.; Barbiero, C.; Briens, C.; Berruti, F. (2019): Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge. *Biomass and Bioenergy* 122, S. 472–480, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.041>
- Chang, H.; Zhao, Y.; Zhao, S.; Damgaard, A.; Christensen, T.H. (2022): Review of inventory data for the thermal treatment of sewage sludge. *Waste management (New York, N.Y.)* 146, pp. 106–118, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.05.002>
- Christensen, T.H.; Damgaard, A.; Levis, J.; Zhao, Y.; Björklund, A.; Arena, U.; Barlaz, M.A.; Starostina, V.; Boldrin, A.; Astrup, T.F.; Bisinella, V. (2020): Application of LCA modelling in integrated waste management. *Waste management (New York, N.Y.)* 118, pp. 313–322, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.034>
- DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement - Ökobilanz-Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006+ A1:2020, Berlin

- DIN EN ISO 14044:2021-02, Umweltmanagement – Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020, Berlin
- Egle, L.; Rechberger, H.; Krampe, J.; Zessner, M. (2016): Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *The Science of the total environment* 571, pp. 522–542, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.019>
- Ekvall, T.; Assefa, G.; Björklund, A.; Eriksson, O.; Finnveden, G. (2007): What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. *Waste management (New York, N.Y.)* 27(8), pp. 989–996, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.015>
- Gievers, F.; Loewen, A.; Nelles, M. (2021): LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SEWAGE SLUDGE PYROLYSIS: ENVIRONMENTAL IMPACTS OF BIOCHAR AS CARBON SEQUESTRATOR AND NUTRIENT RECYCLER. *Detritus Volume 16 – September 2021*(16), S. 94–105, <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2021.15111>
- Hauschild, M.Z.; Rosenbaum, R.K.; Olsen, S.I. (Eds.) (2018): *Life Cycle Assessment. Theory and Practice*, Cham, Springer International Publishing
- Huijbregts, M.A.J.; Steinmann, Z.J.N.; Elshout, P.M.F.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M.; Zijp, M.; Hollander, A.; van Zelm, R. (2017): ReCiPe2016. A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22(2), pp. 138–147, <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Mayer, F.; Bhandari, R.; Gäth, S.A. (2021): Life cycle assessment of prospective sewage sludge treatment paths in Germany. *Journal of Environmental Management* 290, p. 112557, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112557>
- Pradel, M.; Aissani, L.; Villot, J.; Baudez, J.-C.; Laforest, V. (2016): From waste to added value product: towards a paradigm shift in life cycle assessment applied to wastewater sludge – a review. *Journal of Cleaner Production* 131, S. 60–75, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.076>
- Roskosch, A.; Heidecke, P. (2018): *Klärschlamm entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*. Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau, Deutschland.
- Schnell, M.; Horst, T.; Quicker, P. (2020): Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. *Journal of Environmental Management* 263, p. 110367, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110367>
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022): *Klärschlamm entsorgung nach Bundesländern*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/liste-klarschlammverwertungsart.html>, Zugriff am 10.7.2022

## Kontakt

*Fabian Gievers M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter*

HAWK - Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde n/Göttingen

Tel.-Nr. +49/551/5032-184

E-Mail: [fabian.gievers@hawk.de](mailto:fabian.gievers@hawk.de)

Homepage: <https://neutec.hawk.de>



# The Transition of Waste Management into a Circular Economy

**Abstract:** *The European Green Deal came into place in 2019. Under the Green Deal, the European Union (EU) committed to achieving carbon neutrality by 2050. To fulfill this goal, large-scale innovation must take place in the entire European economy, including the waste management sector. The EU will strive to implement a circular economy to maintain its economic status and increase resilience while averting the climate crisis. Fundamental changes have been announced across all economic sectors to push towards a closed-loop system. The role of the waste management sector must shift from waste recipient to secondary resource creator, communicating best treatment and use of resources throughout product life cycles. Legislation is currently coming into place on a country level across member states.*

*As a result, the question of how waste management companies may transit towards circularity is ever more imminent. Qualitative research was conducted to inquire how the waste management sector may change towards circularity and understand the transition from waste to resource. Interviews with experts from Austrian Waste Management companies were carried out to understand the next steps in the transition from current-day waste management towards waste management in a circular economy.*

## 1 Introduction

Europe's economic model and the correlated consumption patterns are no longer viable at the current state of development. Even though a positive trend in the use of secondary raw materials in the EU 27 can be observed; an increase of recycled material fed back into the economy from 10.8% in 2010 towards 12.8% in 2020 (Eurostat, 2021), these efforts must vastly be scaled up. Especially given that by 2050 global waste generation is predicted to increase by 70% (Kaza et al., 2018).

An increase in material and production efficiency has led to a decoupling between economic growth and material consumption, with the global economy growing faster than the increase of consumption rates in OECD countries. This is partly caused by outsourcing resource-intensive activities to less regulated countries. At the same time, decoupling is desirable (OECD G20, 2021). Decoupling of the economy and material use must take place on a larger scale to enable prosperity for future generations. Moving away from a produce, use, throwaway economy, a so-called green transition is necessary, fundamentally changing the wasteful consumption patterns adopted during the economic prosperity of the last 70 years.

The European Green Deal (EGD) showcases the EU members' willingness to engage in the necessary green transition. Strategies such as the circular economy, zero pollution, on biodiversity, sustainability and sustainable foods, smart mobility, smart grids and the renovation wave are among the building blocks that will shape tomorrow's economy. The 2030 Climate Target plan shows the feasibility of a green transition if the right mix of measures is applied (European Commission, 2021b).

The EGD came into place in 2019, to ensure that the transition towards a carbon-neutral circular economy will occur in a just and inclusive manner. Building upon the Sustainable Development Goals and the Agenda 2030, the EU published this strategy to implement social and environmental goals in addition to research and innovation goals (FFG, 2022). The "Fit for 55" package was released in 2021. It is a roadmap towards fulfilling the 2030 goals by drawing out the necessary legal instruments to realize the European climate law and reduce net emissions by 55% compared to 1990 levels by 2030.

The agreement of the ambitious 2050 targets was described as "man on the moon moment" by the president of the European Commission, Ursula Van der Leyen. Three years after the release, we are currently in the phase of rollout. Standards agreed upon under the EGD are being implemented by National governments and are slowly entering national regulation.

The new circular economy action plan is an essential building block of the European sustainable growth strategy. The EU will create sustainable growth and jobs while reducing pressure on natural resources and the environment by transiting into a circular economy (European Commission, 2021a). These measures are necessary given that global material use has tripled during the last four decades, mainly due to increased living standards (European Parliament, 2018).

Waste management will play a crucial part in transitioning towards a circular economy. Waste generation must be reduced to shift from linear to circular conduct by creating sustainable products, fostering reuse and repair. Investments must take place in waste infrastructure, while unfavorable waste treatment options, such as landfilling and incineration, must be reduced to a minimum. Various binding targets for waste management have been newly set or increased across European Member States (MS) recently, putting pressure on regions and especially the actors in the waste management sector (Interreg Europe, 2020).

This thesis aims to understand which measures must be taken to achieve the next steps towards circularity in waste streams. Furthermore, it inspects which legislation aiming to achieve circularity in Austrian waste streams are coming into place and how waste management enterprises are dealing with said legislation. The following research questions will be examined:

1. Which measures must be taken to achieve circularity in waste streams?
2. What is the status quo of companies in the waste management industry in Austria and is a transition taking place towards circularity?

## **2 Methodology**

Following a literature review, expert interviews were conducted to elaborate the status quo of companies in the waste management industry in Austria and to establish if a transition towards circularity is taking place (research question number two). The Austrian waste management sector was decided upon as area

of interest, since Austria is a well-developed country with geographic complexity. Interviews were deemed appropriate to deepen understanding of the current state of Austria's waste management companies and to understand how the theory behind the EGD translates into practice.

Semi-structured interviews were conducted. Reasons for this choice of method include the topic's broad nature, and the opportunity to follow up upon statements during interviews. Therefore, the method was deemed suitable, given the one-on-one setting with open-ended questions, which allows for follow-up queries (Adams, 2015).

An interview guide with 13 questions was formulated. A web search was carried out with the platforms FirmenABC.at and Firmeninfo.at to identify relevant businesses. The keywords "waste management" and "waste disposal" were applied to identify interesting companies. The selection was limited to companies with a website to guarantee relevance of the field of activity of selected companies. Furthermore, this allowed for information gathering about the interviewee's employer before the interview.

Companies were then contacted via e-mail, describing the research topic and asking for an interview of 45 minutes. Following the e-mails sent, the offices of companies of interest were contacted via telephone, and inquiries were made regarding potential interview candidates. Next, six expert interviews were carried out over two months, two with companies working exclusively in non-mountainous areas and four working in both mountainous and non-mountainous areas. All interviews were held in German. The interviews took place either online or via telephone and were recorded on a sound recording device. The interview guide was applied in all interviews. Rather than strictly following the order of questions in the interview guide, it was used to ensure all topics of interest had been addressed. The order was followed if appropriate during the interview – in case topics arose in the course of the conversation, related questions were then asked out of order. The interviews were transcribed using the open-source Programme oTranscribe. A word-for-word transcription was applied. For more clarity, dialects were translated into written official German and stuttering and repetition was not transcribed (Kuckartz, 2018).

The number of interviews conducted only poses a small sample of the Austrian waste management sector; the topics of interest to the interviewees however seemed to be consistent. According to Statistic Austria roughly 780 waste management companies are located in Austria (EU-Recycling, 2020). The Austrian waste management industry is however strongly intertwined; large companies often own a number of subsidiaries. The employers of the six interview partners for this thesis together own roughly 40 subsidiaries in the Austrian waste management sector. While not being representative of the sector, the interviews were deemed as sufficient to gain insight into the current climate of the Austrian waste management industry.

## 2.1 Qualitative Content Analysis

The analysis of the interview transcripts was conducted according to content analysis by Udo Kuckartz, with the use of the software MAXQDA. The structuring content analysis was followed, according to Kuckartz. After initial scanning of the created transcripts, deductive categories were created according to main interests of the research topic and questions. After the initial deductive creation of categories, sub-codes were created inductively. All relevant information was then further categorized into according subcategories (Kuckartz, 2018). A last analysis was then conducted, under which final new codes were created and irrelevant codes dispersed. All information categorized in the different sub codes was then put in juxtaposition to enable

direct comparison throughout interviews. When creating a summary grid, it could be seen that next to all sub codes were mentioned at least once in each interview. A code relations browser, showing all codes on the x-axis and all codes on the y-axis, was then used to inquire which codes overlapped most frequently (which contents were marked with different codes at once). While all interviews had been treated as one document up until this point, they were then separated into two categories: mountainous and non-mountainous. The subcategories were then

### 3 Results

To transit from a linear economic model, the end of the supply chain - formerly handling waste - must be connected with the beginning, formerly adding value to virgin material and resources. However, beyond just connecting the supply chain's end to its beginning, measures of innovation, agility, and progressiveness of all involved stakeholders are necessary to reach an unprecedented level of interconnectedness. The future of product movement looks quite different to the current model, which relies on the downstream movement of materials which are fly tipped, incinerated or landfilled. Rather than just moving in one direction in a loop, future products will be designed for modular use and longevity, moving up and down the production and consumption stream. Ideally, these items will be recycled and fed back into new products. The realities of wear and tear as well as imperfect systems necessitate that some degree of material will exit such a cycle. The aim should thus be to minimize the amount exiting the system. At present, the waste management sector is located at the end of supply chains. In order to achieve a circular system in waste streams (this thesis' research question number one), the waste management sector and the knowledge acquired by resource experts must play a pivotal role. These two factors are crucial to close the loop and minimize material waste.

For best possible resource use, the best possible understanding of a given product or services and the different supply chain steps it will go through must be achieved. This can be facilitated through a life cycle approach. To gain in-depth knowledge, a vast amount of data on these processes must be generated with the help of digital solutions.

The design phase of a product is crucial for leading the resources it consists of in a circle. Once a product or service has been designed, it is only possible to react to its conditions. This makes adaptation very complex and elaborate. When considering all steps involved in the life cycle of a product, from resource acquisition over production, diligence should be conducted to allow for the smoothest possible procedure, under the inclusion of experts.

While there was factually no waste legislation until a few decades ago, the legal situation is quite complex today. When looking at how waste was disposed of in the past, it becomes evident that strict regulation is necessary. However, these laws should also foster good conduct and best practices rather than being a burden upon actors underlying the laws. Applicability and long-term effects of laws should therefore better be considered. Furthermore, laws should only be implemented if they are enforceable and will be enforced. The experts questioned regarding the status quo in the companies they worked for (research question number 2) seemed committed to developing their enterprises towards more modern and sustainable business models. However, it showed that with increasing modernization, both required knowledge and required investments increase to adapting facilities. While large companies can afford to create specific

departments for these tasks, have the flexibility to employ the required workforce, and employ external help, SMEs must approach these challenges differently. Given the extent of investment required to obtain state-of-the-art technology and software, a very calculated approach must be taken to achieve an optimal fit. External factors such as legal changes or non-extension of municipal contracts may be fatal to an SME.

Waste management businesses are taking steps towards technical upgrading, and social initiatives such as reuse operations are becoming more common. New laws are coming into effect and have been prefigured to come into effect. Announced expansions of EPR systems have made innovative producing companies attentive, and first moves are being made; however, not to an extent where waste managing companies are commonly involved. While there is an attitude of change, there are still some hindering factors for development to its fullest potential. As of now waste managers are still commonly being treated as waste recipients, and the balance between the desire to shift towards sustainability and an economy thriving on fast moving consumer goods has yet to be found. Most waste management companies in Austria see obstacles in best possible development due to uncertainty of upcoming regulation or restrictions due to excessive bureaucracy.

## 4 Discussion

Given the broad nature of circularity in waste streams and the interconnectedness of different segments of a circular economy, a number of factors call for further research. While all issues discussed in this thesis are relevant to the topic of circularity in waste management, additional interviews and inquiry would be necessary to achieve a sample size that is truly representative of Austrian waste streams in their entirety.

The literature research and interviews conducted for this thesis imply that change must occur on a systemic level. Individual players in the waste sector cannot tackle the discussed issues by themselves, as these obstacles are large enough to require systemic cooperation.

All interviewed experts were well aware of the necessity for fundamental change in the waste management sector. To enable positive change, the inclusion of the expertise of waste managers further upstream is an absolute must to create products that allow for recycling and upcycling.

Most interview partners described an investment back lock for various reasons, primarily because of delays in announced regulation and last-minute changes in expected legislation, which can become very costly if premature investments are made.

Sustainability must be at the heart of new legislation. Thorough assessments are necessary to ensure that the proposed legislation is truly sustainable. Laws that have not been sufficiently inspected ahead of implementation may prove counterproductive rather than sustainable in the long run, as they add to the complexity of the legal setting and waste valuable resources in the drive for sustainability.

Innovators in the waste management field are pushing for change by interacting with companies through Extended Producer Responsibility systems as well as by offering consulting services. These steps may indicate a tentative shift towards a circular economy. Since we are currently at the starting point of this transition, it remains to be seen how the waste management sector can become a vital part of establishing a circular economy

## Bibliography

- Adams, W. C. (2015). Conducting Semi-Structured Interviews. *Handbook of Practical Program Evaluation: Fourth Edition*, 492–505. <https://doi.org/10.1002/9781119171386.CH19>
- EU-Recycling. (2020). *Baustoffrecycling: Was Österreich uns voraus hat – EU-Recycling*. <https://eu-recycling.com/Archive/26789>
- European Commission. (2021a). *Circular economy action plan*. [https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan\\_de](https://ec.europa.eu/environment/strategy/circular-economy-action-plan_de)
- European Commission. (2021b). *Fit for 55 at a glance*. [https://ec.europa.eu/clima/citizens/support\\_en](https://ec.europa.eu/clima/citizens/support_en)
- European Parliament. (2018). *Material use in the European Union: Towards a circular approach | Think Tank | European Parliament*. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS\\_BR\(2018\)625180](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BR(2018)625180)
- Eurostat. (2021). *Statistics | Eurostat*. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei\\_srm030/default/?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_srm030/default/?lang=en)
- FFG. (2022). *Nachhaltigkeitsaspekte in der FFG: SDGs und European Green Deal | FFG*. <https://www.ffg.at/sdg>
- Interreg Europe. (2020). *A Policy Brief from the Policy Learning Platform on Environment and resource efficiency Sustainable waste management in a circular economy*. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20180123-1>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0*.
- Kuckartz, U. (2018). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Beltz Juventa.
- OECD G20. (2021). *Towards a more resource-efficient and circular economy*.

## Kontakt

MSc., Julius Hecher, wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Universität Innsbruck/ Institut für Infrastruktur  
Tel.-Nr. 0512 507 62170  
E-Mail: [julius.hecher@uibk.ac.at](mailto:julius.hecher@uibk.ac.at)

## **Alterung und Nasssiebung als Strategien zur Verbesserung der Produktqualität einer industriell hergestellten Gesteinskörnung aus Müllverbrennungs-Bettaschen als Zuschlagsstoff für Beton**

**Abstract:** Seit 2023 bildet der neue Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP) den rechtlichen Rahmen in Österreich, um die mineralischen (Rest-)Fraktionen aus aufbereiteten Müllverbrennungsrost- und -bettaschen als Zuschlagsstoff in Beton einzusetzen. Die Grundvoraussetzung dafür ist die Einhaltung vorgegebener Grenzwerte. Beispielsweise werden darin Grenzwerte für wasserlösliches Sulfat und Chlorid geregelt, deren Betrachtung insofern von besonderem Interesse ist, da sie Schädigungen im Beton verursachen können. Ein Nassaufbereitungsverfahren, Alterung der Körnung sowie Trocken- und Nasssiebung stellen Konzentrationsminderungsstrategien für wasserlösliches Chlorid und Sulfat dar. Die durchgeführten Versuche im Technikum haben gezeigt, dass die beschriebenen Strategien die Konzentrationen so weit senken können, dass die Grenzwerte des BAWP eingehalten werden können.

### **1 Einleitung**

Industriell hergestellte Gesteinskörnung wird nach ÖNORM EN12620 als „Gesteinskörnung mineralischen Ursprungs, die in einem industriellen Prozess unter Einfluss einer thermischen oder sonstigen Veränderung entstanden ist“ definiert [1]. Die mineralische (Rest-)Fraktion aus der Aufbereitung von Aschen aus Müllverbrennungsanlagen (MVA) erfüllt diese Definition. Ihr Einsatz als Substitut für natürliche Gesteinskörnung in Beton wird in Österreich seit 2023 durch den Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP) geregelt. In diesem werden neben Grenzwerten für Schwermetalle auch Grenzwerte für wasserlösliches Chlorid sowie Sulfat festgelegt [2]. Beide Parameter können Schädigungen im Beton verursachen, die sich negativ auf die Betonfestigkeit auswirken können. Chlorid kann zur Korrosion der Bewehrung im Stahlbeton führen [3], während Sulfat sogenanntes Sulfattreiben verursachen kann, durch das Mikrorisse entstehen, die die Betonfestigkeit verringern [4]. Aus diesem Grund ist nicht nur die Einhaltung der Grenzwerte, sondern auch eine möglichst geringe Konzentration beider Parameter im Beton erstrebenswert. Gegenstand der aktuellen Forschung im CD-Labor für eine recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft ist es, industriell hergestellte Gesteinskörnungen aus einer österreichischen Aufbereitungsanlage für sowohl MVA-Rostaschen aus Rostfeuerungsanlagen und MVA-Bettaschen aus Wirbelschichtanlagen hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in Beton zu untersuchen. In diesem Beitrag werden bisherige Erkenntnisse zu den Parametern wasserlösliches Chlorid und Sulfat präsentiert.

## 2 Methodik

Die Aufbereitungsanlage umfasst ein kombiniertes, mehrstufiges Nass-Trocken-Verfahren, das bereits durch Stockinger [5] näher beschrieben wurde und in welchem mittels Magnet-, Wirbelstrom- und Glasabscheider sowie einer Setzmaschine Metalle und Glas aus den MVA-Aschen entfernt und einem Recycling zugeführt werden. Die Nassaufbereitung via Setzmaschine bietet den Vorteil, dass wasserlösliche Stoffe wie Chlorid und Sulfat zum Teil abgetrennt werden können. In mehreren Aufbereitungsversuchen wurden 150 Tonnen Bettasche einer Wirbelschicht-Müllverbrennungsanlage aufbereitet. Während der Aufbereitung erfolgte eine Probenahme der mineralischen Fraktion 0/8mm mittels Radlader-Schaufel, durch die der Querschnitt des Förderbandabwurfes beprobt werden konnte. Das Probenmaterial wurde anschließend durch inkrementierendes Schaufeln in mehreren Schritten, jedoch maximal einer Viertelung je Teilungsschritt, geteilt, um eine Laborprobe des frischen Materials von etwa 5 kg zu erzeugen. Das restliche Probenmaterial wurde zur Alterung in einer wasserdurchlässigen Alterungskiste 12 Wochen der natürlichen Witterung ausgesetzt und danach daraus erneut eine 5 kg Laborprobe durch inkrementierendes Schaufeln gewonnen. Auf diese Weise wurden drei Aufbereitungsversuche dieser Bettasche beprobt. Mit der gealterten Bettasche aus einem Aufbereitungsversuch wurden weitergehende Versuche im Technikum durchgeführt um die Produktqualität der erzeugten Körnung weiter zu verbessern. Dazu wurden 10 kg des gealterten Materials, das ebenfalls durch inkrementierendes Schaufeln gewonnen wurde, bei 2mm gesiebt. Die Fraktionen 2/8mm und 0/2mm wurden im Labor analysiert und anschließend die Fraktion 2/8mm bei einem Verhältnis  $L/S=0,25$  batchweise nassgesiebt. Dazu wurde ein Wasserschlauch mit Durchflusszähler und Wasserspritze verwendet und Wasser während des Siebens für eine gewisse Zeit beaufschlagt. Das nassgesiebte Material wurde wiederum im Labor analysiert. Zur Bestimmung der wasserlöslichen Bestandteile wurde ein Eluat-Test nach EN 12457-4 in einem einstufigen Schüttelverfahren mit einem  $L/S$ -Verhältnis von 10l/kg durchgeführt, wie durch den BAWP vorgeschrieben wird [6].

## 3 Resultate

In Abbildung 1 wird deutlich, dass der Gehalt an wasserlöslichem Chlorid in der frisch aufbereiteten Mineralik-Fraktion schwanken kann. Eine Alterung über 12 Wochen führt jedoch in jeden Fall zu einer deutlichen Reduktion des Gehaltes an wasserlöslichem Chlorid. Weiters zeigt die 0/2mm Fraktion im Vergleich zur 2/8mm Fraktion eine Anreicherung an Chlorid. Das Nasssieben der Fraktion 2/8mm führte zudem zu einer weiteren Senkung der Chlorid-Konzentration. Diese Beobachtungen legen nahe, dass wasserlösliches Chlorid vor allem oberflächlich auftritt und zu einem hohen Grad abwaschbar ist.

Der Grenzwert für wasserlösliches Chlorid nach dem BAWP kann für sowohl einen Anteil der mineralischen Fraktion von  $\leq 10\%$  am Beton als auch für einen Anteil von  $\leq 20\%$  am Beton nach einer Alterung auf jeden Fall eingehalten werden. Trocken- sowie Nasssiebung können zu Körnungen mit noch niedrigerem Gehalt führen.



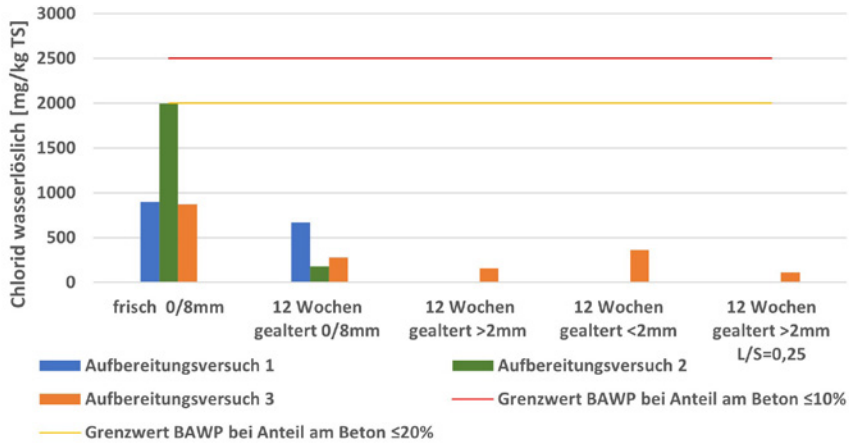


Abbildung 1: Wasserlösliches Chlorid [mg/kg TS] in der mineralischen Fraktion

Die unterschiedlichen Aufbereitungsversuche zeigen, dass der Gehalt an wasserlöslichem Sulfat ebenfalls durchaus schwanken kann. In Abbildung 2 ist eine Tendenz erkennbar, dass die Konzentration durch eine Alterung zunächst steigt, was bereits von anderen Forschungsinitiativen beobachtet und in der Fachliteratur [7-9] beschrieben wurde. Es zeigt sich ebenfalls deutlich eine Abhängigkeit von der Korngröße. Durch Absieben bei 2mm zeigte sich, dass die Sulfatkonzentration der Fraktion 2/8mm deutlich geringer als jene der Gesamtkörnung 0/8mm ist. Ebenfalls konnte beobachtet werden, dass durch Wasserzufuhr bei der Nasssiebung die hohe Konzentration nach der Alterung wieder gesenkt werden kann.

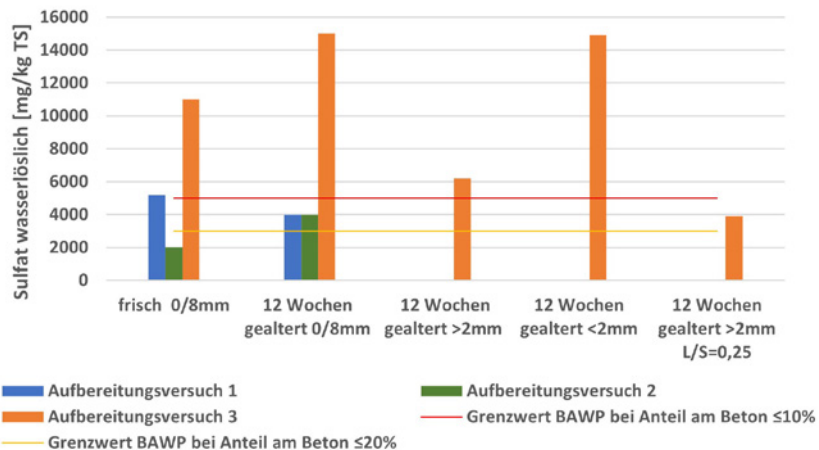


Abbildung 2: Wasserlösliches Sulfat [mg/kg TS] in der mineralischen Fraktion

Obwohl die Bettasche in den Aufbereitungsversuchen unterschiedliche Ausgangskonzentrationen vorwies und die Konzentrationsanstiege bzw. -verringerungen unterschiedlich stark ausgeprägt sind, konnten eindeutige Trends im Konzentrationsverlauf durch die verschiedenen Maßnahmen beobachtet werden. Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass für den Einsatz im Beton nach BAWP insbesondere für die Fraktion 2/8mm die Einhaltung der Grenzwerte durch Anwendung der beschriebenen Maßnahmen möglich scheint. Für das Absieben bei 2mm konnte in den Versuchen zusätzlich eine Verringerung der Schwermetallgehalte beobachtet werden, da diese ebenfalls in der 0/2mm Fraktion angereichert vorliegen. Auch die Alterung, die sich ungünstig auf den Sulfatgehalt auswirkt, ist notwendig, um alle Grenzwerte für die Schwermetallgehalte im Eluat einhalten zu können. Bei Anwendung im Beton dürfen gemäß BAWP nur etwa 10% bis maximal 20% des hergestellten Betons durch die mineralische Fraktion 2/8mm ersetzt werden. Das bedeutet, dass die Gesamtfracht an wasserlöslichem Chlorid und Sulfat in den Beton durch die industriell hergestellte Gesteinskörnung, verglichen mit anderen Eintragspfaden, gering ist. So darf Beton je nach Verwendung etwa 1300 mg/kg TS (unbewehrter Beton), 520 mg/kg TS (bewehrter Beton) bzw. 260 mg/kg TS Chloridionen aufweisen [10]. Die Eigenschaften der unter partieller Verwendung von industriell hergestellter Gesteinskörnung produzierten Betone müssen jedoch sorgfältig und nach Norm überprüft werden, was derzeit im CD-Labor erfolgt.

## Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Forschungsinitiative CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der TU Wien. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Weiters bedanken wir uns sehr herzlich für die finanzielle und inhaltliche Unterstützung durch unsere Unternehmenspartner, in alphabetischer Reihenfolge: Brantner Österreich GmbH, Linz Service GmbH, Wien Energie GmbH, und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H.

## Literatur/Quellen

- [1] *ÖNORM EN 12620:2008-09. Gesteinskörnung für Beton*. ÖNORM EN 12620:2008-09, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2014.
- [2] (2023). *Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023-Teil 1*. [Online] Available: [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/abfall/aww/bundes\\_awp/bawp2023.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aww/bundes_awp/bawp2023.html)
- [3] J. Stark and B. Wicht, „Einwirkung von Chloriden auf Beton“, in *Dauerhaftigkeit von Beton*, J. Stark and B. Wicht Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 263-298.
- [4] J. Stark and B. Wicht, „Sulfatangriff“, in *Dauerhaftigkeit von Beton*, J. Stark and B. Wicht Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 161-207.
- [5] G. Stockinger, „Nassaufbereitung von Abfallverbrennungsaschen – Betriebsergebnisse einer großtechnischen Anlage in Österreich“, in *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3 – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*, Berlin, 2016, vol. 3: Karl J. Thomé-Kozmiensky, pp. 207-222. [Online]. Available: <https://www.vivis.de/2016/06/mineralische-nebenprodukte-und-abfaelle-band-3/520/>. [Online]. Available: <https://www.vivis.de/2016/06/mineralische-nebenprodukte-und-abfaelle-band-3/520/>

- [6] *Charakterisierung von Abfällen- Auslaugung- Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen- Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung)*, EN 12457-4:2002, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, 2003.
- [7] T. Astrup, "Pretreatment and utilization of waste incineration bottom ashes: Danish experiences", *Waste Manag*, vol. 27, no. 10, pp. 1452-7, 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2007.03.017.
- [8] P. Freyssinet et al., "Chemical changes and leachate mass balance of municipal solid waste bottom ash submitted to weathering", *Waste Manag*, vol. 22, no. 2, pp. 159-72, 2002, doi: 10.1016/s0956-053x(01)00065-4.
- [9] A. Keulen, A. van Zomeren, P. Harpe, W. Aarnink, H. A. E. Simons, and H. J. H. Brouwers, "High performance of treated and washed MSWI bottom ash granulates as natural aggregate replacement within earth-moist concrete", *Waste Manag*, vol. 49, pp. 83-95, Mar 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2016.01.010.
- [10] *ÖNORM B 4710-1:2018-01. Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität-Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton*, ÖNORM B 4710-1:2018-01, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2018.

#### **Kontakt**

*DI Simon Hofer, wissenschaftlicher Mitarbeiter*

Technische Universität Wien/ CD-Labor für eine recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft

E-Mail: [simon.hofer@tuwien.ac.at](mailto:simon.hofer@tuwien.ac.at)



## Recycling von Baumwoll-Polyester-Mischtextilien

**Abstract:** Aufgrund der jährlich steigenden Menge an Alttextilien ist es erforderlich, bestehende Technologien für das Recycling von Alttextilien zu prüfen und neue Technologien zu entwickeln. Dies gilt insbesondere für Textilien mit mehr als einer Faserkomponente; es mangelt noch an Technologien, um diese in faserrecyclingfähige Reinfractionen zu überführen. Es ist daher notwendig, Verfahren für eine simple und unkomplizierte Aufbereitung dieser Mischtextilien zu untersuchen. In dieser Studie werden Ansätze zur Trennung nicht zerkleinerter Baumwoll-Polyester Mischungen durch alkalische (Vor-)Behandlung und gegebenenfalls anschließende enzymatische Hydrolyse untersucht. Es wurden passende Bedingungen für die Rückgewinnung der jeweiligen Komponente aus Pre- und Post-Consumer-Textilien gefunden und Grenzen für einen geeigneten Prozess ermittelt.

### 1 Einleitung

Über die letzten Jahre konnte ein stetiger Anstieg der produzierten Menge an Fasern beobachtet werden, wodurch auf einen Anstieg der Menge an produzierten Textilien geschlossen werden kann. Innerhalb der Jahre 2015 und 2020 allein steigerte sich die Menge an produzierten synthetischen Fasern von 69 Millionen auf 81 Millionen Tonnen, wobei Polyesterfasern mit circa 75 % den größten Anteil davon ausmachen (Textile Exchange, 2021; IVC, 2021). Im selben Zeitraum blieb die Menge an natürlichen Fasern relativ konstant, stellte aber trotzdem einen nicht zu vernachlässigenden Anteil dar. Im Jahr 2020 bestand ein Viertel aller produzierten Fasern aus Baumwolle (Textile Exchange, 2021). Es sind auch diese beide Fasertypen, nämlich Baumwolle (CO) und Polyester (hauptsächlich Polyethylenterephthalat; PET), aus denen ein Großteil der heutigen Textilien besteht.

Wenn man diese steigenden Mengen nun in Verbindung mit dem Trend zur Fast Fashion und der Verkürzung der Nutzungsdauer von Textilien bringt (Korolkow, 2015), kann weiter darauf geschlossen werden, dass die Menge an Textilabfällen ebenfalls ansteigen wird. Da die Implementierung einer nachhaltigen Textilindustrie noch einige Zeit in Anspruch nehmen wird, ist es notwendig, bestehende Recyclingmethoden zu evaluieren und neue, nachhaltige und effiziente Methoden zu entwickeln. Dies ist besonders für Mischtextilien wichtig, da es kaum möglich ist, diese über rein mechanische Prozesse zu trennen. Es bedarf für diese daher Trennansätze, welche sich chemischer und biochemischer Prozesse bedienen. Schwierigkeiten hierbei sind jedoch die signifikante Abnahme der Qualität der rückgewonnenen Fasern und das Bereitstellen ausreichender Reinheit für die Wiedereinführung in einen Faser-Produktionsprozess, ohne dass ein zu großer Verlust der Ausbeute während der Trennprozesse entsteht.

Die Anzahl der Studien die sich mit der Trennung von Mischtextilien, besonders von CO- / PET-Mischtextilien auseinandersetzen, nahm über die letzten Jahre zu. So konnten bspw. Palme et al. (2017) zeigen, dass

der PET-Anteil eines zerfaserten CO- / PET-Mischtextils alkalisch hydrolysiert werden kann und Piribauer et al. (2020) konnten bei demselben Material den CO-Anteil mittels enzymatischer Hydrolyse, mit alkalischer Vorbehandlung, entfernen. Das Zerfasern des Materials gewährleistet zwar eine bessere Zugänglichkeit für die Reagenzien, jedoch führt es auch zu einer erschwerten Handhabung wegen der Volumenzunahme. Ebenfalls wird die Länge der Fasern durch die Zerkleinerung verkürzt, wodurch diese potentiell nicht mehr für einen Sekundär-Spinnprozess verwendet werden könnten.

Ziel dieser Studie war die Erfassung der Umsatzraten der CO- und PET-Hydrolyse nicht zerkleinerter, Pre-Consumer CO / PETMischtextilien sowie des Einflusses der Änderung bestimmter Parameter der alkalischen (Vor-)Behandlung auf die Umsatzraten. Die gefundenen optimalen Bedingungen für die Rückgewinnung der jeweiligen Fasertypen wurden anschließend auf Post-Consumer-Textilien erweitert.

## **2 Durchführung**

Im ersten Schritt wurden die Umsatzraten der Hydrolysen untersucht, um passende Bedingungen für die vollständige Entfernung der jeweiligen abzutrennenden Faserkomponente zu finden sowie jene Bedingungen, ab denen die Hydrolyse des PET einsetzt. Jeweils 10 g eines reinen, weißen CO- / PET-Mischgewebes wurden in verdünnten Natronlaugelösungen (NaOH) in unterschiedlichen Testserien für 3 Stunden behandelt. Die variierten Parameter waren die Temperatur, zwischen 30 und 100 °C, und die Konzentration der NaOH, zwischen 0 und 40 Massenprozent. Dieser Behandlungsschritt diente sowohl der alkalischen Hydrolyse des PET als auch der Vorbehandlung der CO-Fasern, da diese sonst nur unzureichend von den eingesetzten Enzymen (Cellulasen) hydrolysiert werden. Für die Hydrolyse der CO-Fasern wurden die Proben anschließend in jeweils einem Liter Enzymdispersion bei 50 °C für 24 Stunden behandelt. Die Dispersion bestand aus einem Citrat-Puffer mit einem pHWert von 5 und 10 g einer Cellulasen-Mischung. Danach wurden alle Proben gewaschen, bis zur Massenkonstanz getrocknet und gewogen. Um die Umsatzraten aller Proben genau zu bestimmen, wurden diese nach den AATCC-Testmethoden (AATCC Committee, 1977) geprüft. Um die Vollständigkeit der PET-Entfernung zu überprüfen, wurden die jeweiligen Proben für 5 Minuten in reinem m-Kresol bei 140 °C behandelt, um restliche PET-Fasern zu entfernen und dann wieder gewaschen, getrocknet und die Massendifferenz berechnet. Das Gleiche galt auch für die Überprüfung der Vollständigkeit der CO-Abtrennung, hier wurden die Proben für 20 Minuten bei 40 °C in 70%-iger Schwefelsäure behandelt. Nach Beendigung der Versuche zur Bestimmung der Umsatzraten wurden die geeignetsten Bedingungen für die vollständige Hydrolyse der jeweiligen Komponenten auf verschiedene Post-Consumer-Textilien angewandt. Für die Hydrolyse der CO-Fasern wurde eine Vorbehandlung in 20%-iger NaOH bei 25 °C verwendet und die so vorbehandelten Fasern wurden anschließend bei den oben genannten Bedingungen enzymatisch hydrolysiert. Die Hydrolyse der PET-Fasern wurde in 15%-iger NaOH bei 85 °C durchgeführt. Zuletzt wurde von allen Proben abermals die Zusammensetzung bestimmt.

## **3 Ergebnisse und Diskussion**

Nach Beendigung der Versuche zu den Umsatzraten konnten für die jeweiligen Faserkomponenten Bereiche für eine vollständige Hydrolyse definiert werden, sowie Bereiche, bei denen zwar keine komplette Hydrolyse erzielt wird, dafür aber die rückzugewinnende Komponente ohne große Verluste bestehen bleibt.

Für die vollständige enzymatische Hydrolyse der Baumwolle werden Vorbehandlungsbedingungen im mittleren bis hohen NaOH-Konzentrationsbereich benötigt. Die Temperatur schien nur eine begrenzte Wirkung auf den nachfolgenden Hydrolyseerfolg gehabt zu haben, allein bei höheren Konzentrationen ist eine Temperatursteigerung notwendig, um der höheren Viskosität der NaOH entgegenzuwirken. Im Gegensatz dazu hatte eine Steigerung der Temperatur einen positiven Effekt auf die Entfernung der PET-Fasern. Es konnte zwar schon bei niedrigen Temperaturen eine Teilentfernung dieser Fasern beobachtet werden, für eine komplette Entfernung waren jedoch hohe Temperaturen notwendig. Im Vergleich zur CO-Hydrolyse konnten auch niedrige NaOH-Konzentrationen verwendet werden.

Mit den erhaltenen Ergebnissen konnte ein Bereich für die fast vollständige Rückgewinnung des reinen PET-Rest-Textils bei einer NaOH-Konzentration von ca. 20 Massenprozent und milden Temperaturen definiert werden. Für die Rückgewinnung der CO-Komponente wurden Vorbehandlungsbedingungen von 15 Massenprozent und hohen Temperaturen als geeignet definiert. Die anschließenden Versuche mit PostConsumer-Textilien zeigten, dass die definierten Bedingungen auch auf diese Textilien anwendbar sind. Um die Bewertung dieser Versuche zu vervollständigen, ist es noch nötig die Qualität der rückgewonnenen Fasern zu bestimmen. Des Weiteren muss eingehender untersucht werden, wie sich verschiedene Begleit- bzw. Störstoffe bei diesen Prozessen verhalten. Diese Analysen sind in Arbeit und werden zu einem späteren Zeitpunkt vorgestellt.

## Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Forschungsinitiative CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der TU Wien. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Gleichzeitig bedanken wir uns bei unseren Unternehmenspartnern Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoffrecycling Austria AG, Borealis AG, Brantner Österreich GmbH, Lenzing AG, Linz Service GmbH, MM Board and Paper AG, OMV Downstream GmbH, Wien Energie GmbH und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H., sowie bei der Magistratsabteilung Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien (MA 48).

## Literatur/Quellen

- AATCC Committee. (1977). Fibers in Textiles: Identification. AATCC Technical Manual, 53, 57-72.
- IVC. (2021). Die Chemiefaserindustrie in der Bundesrepublik Deutschland. Frankfurt am Main: Industrievereinigung Chemiefaser e. V.
- Korolkow, J. (2015). Konsum, Bedarf und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland. Bonn: bvse e. V.
- Palme, A., Peterson, A., de la Motte, H., Theliander, H., & Brelid, H. (2017). Development of an efficient route for combined recycling of PET and CO from mixed fabrics. *Textiles and Clothing Sustainability*, 3(4), pp. 78-86.
- Piribauer, B., Jenull-Halver, U., Quartinello, F., Ipsmiller, W., Koch, D., Thomas, L., & Bartl, A. (2020). TEX2MAT - Next Level Textile Recycling w. Biocatalysts. *Detritus*, 13, pp.78-86.

Textile Exchange. (2021). Preferred Fiber & Material, Market Report 2021. [https://textileexchange.org/wp-content/uploads/2021/08/Textile-Exchange\\_PREFERRED-Fiber-and-Materials-Market-Report\\_2021.pdf](https://textileexchange.org/wp-content/uploads/2021/08/Textile-Exchange_PREFERRED-Fiber-and-Materials-Market-Report_2021.pdf)

### **Kontakt**

*Pablo Kählig, studentischer Mitarbeiter*

TU Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften

Tel.-Nr.: +43 1 58801 - 166 154

E-Mail: [pablo.kaehlig@tuwien.ac.at](mailto:pablo.kaehlig@tuwien.ac.at)

Homepage: [www.tuwien.at](http://www.tuwien.at)



# Die Wahrnehmung von geplanter Obsoleszenz in der deutschen Öffentlichkeit

**Abstract:** Mit der fortschreitenden Digitalisierung und Technologisierung steigt das Aufkommen an Elektro- und Elektronikprodukten und somit auch das Aufkommen an Elektroschrott. „Wegwerfkonsument“ und „Wegwerfproduktion“ gehen dabei Hand in Hand und scheinen für die Gesellschaft des 21. Jahrhunderts bezeichnend zu sein (Jaeger-Erben 2019). Das Phänomen der geplanten Obsoleszenz beschreibt die Annahme, dass Hersteller\*innen ihre Produkte für eine kurze Lebenszeit produzieren, um somit ihren Absatz zu steigern. Obwohl nicht nachgewiesen werden kann, dass Hersteller\*innen absichtlich die Produktlebenszeit verkürzen, scheint die Annahme unterstützt zu werden, dass Geräte kurz nach dem Ablauf der Garantiezeit „den Geist aufgeben“ (Wieser und Tröger 2015). Um eine frühzeitige Entsorgung von Elektro- und Elektronikprodukten zu vermeiden, wurde untersucht, wie geplanter Produktverschleiß in der deutschen Öffentlichkeit wahrgenommen wird, worüber die deutschen Printmedien zu geplanter Obsoleszenz berichten und inwiefern sich der öffentliche Diskurs von der Wahrnehmung und dem tatsächlichen Verhalten der Konsument\*innen in Bezug auf geplante Obsoleszenz unterscheidet.

## 1 Einleitung

Das weltweite Abfallaufkommen ist eines der zentralen Probleme des 21. Jahrhunderts. Insbesondere im Bereich der Entsorgung von Elektro- und Elektronikprodukten kann ein stetiges Wachstum beobachtet werden. Im Jahr 2018 wurden in Deutschland pro Person 10,3 Kilogramm Elektronikprodukte entsorgt. Gegenüber dem Jahr 2015 nahm diese Menge um knapp 1,5 Kilogramm zu (Statistisches Bundesamt 2021). Das stetige Wachsen der Müllberge geht mit einem Begriff einher, der in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhundert geprägt wurde: Die sogenannte „Wegwerfgesellschaft“ thematisiert vor allem einen „fahrlässigen Umgang mit endlichen Ressourcen und dem Ausblenden der Folgen von Überproduktion und -konsum“ (Jaeger-Erben 2019). Es wird beobachtet, dass die elektronische Ausstattung des Alltags und der Sachbesitz in den Haushalten zunehmen, was von einer „Endlosspieler neuer Produktgenerationen“ und hohen Austauschgeschwindigkeiten von Konsumgütern angeregt wird (Oetzel 2012). Dabei stellt nicht nur die Entsorgung und die Endlagerung von Elektroschrott ein Problem dar, auch die Gewinnung seltener Erden und Ressourcen für die Produktion neuer Elektronikgeräte belastet die Umwelt. Diese Gewinnung und Verarbeitung von Ressourcen ist mit einem erheblichen Materialaufwand, Flächen- und Energieverbrauch sowie hohen Umweltauswirkungen verbunden (Prakash et al. 2016). Immer kürzer werdende Nutzungs- und Lebensdauern von Produkten werden im politischen und wissenschaftlich geführten Nachhaltigkeitsdiskurs als Treiber eines erhöhten Ressourcenverbrauchs und sozioökonomischer Probleme ausgemacht

(Cooper 2010; Packard 1960; Prakash et al. 2016). Ein Phänomen, dass seit 80 Jahren in diesem Zusammenhang in der Öffentlichkeit thematisiert wird, ist die „geplante Obsoleszenz“ (Poppe 2017). In der Medienberichterstattung wird geplante Obsoleszenz als eine absichtliche Lebensdauerverkürzung von Produkten beschrieben: Produkte seien so gebaut, dass sie „just dann kaputtgehen, wenn die Garantie abläuft“ (Jalovec 2013). Zum Zweck der Absatzsteigerung sei – so der Vorwurf – die Produktentwicklung darauf ausgelegt, Verbraucher\*innen zu einem vorzeitigen Neukauf zu zwingen, obwohl ein Gerät noch länger nutzbar sein könnte. Das Gerät ist noch nicht am Ende seiner technischen Lebensdauer angekommen, wird aber aufgrund einer Schwachstelle, die zu einem Ausfall führt, ersetzt (Prakash et al. 2016). Dabei handele es sich laut Jalovec um ein Massenphänomen, das alle Verbraucher\*innen schon einmal geärgert habe (Jalovec 2013). Obwohl wissenschaftlich (bisher) nicht nachgewiesen werden kann, dass Hersteller\*innen absichtlich die Produktlebenszeit verkürzen, scheint es so, als würde die Öffentlichkeit sich dessen sicher sein. Die Erwartungen der Konsument:innen an die Produktlebensdauer und die Erwartungen der Produzent\*innen an die Produktnutzungsdauer von Elektronikprodukten wird immer geringer, was dazu führt, dass Produkte frühzeitig ersetzt werden (Wieser und Tröger 2015). Die Untersuchung der Wahrnehmung der deutschen Öffentlichkeit kann einen Hinweis darauf geben, welche Maßnahmen und Lösungsstrategien dazu führen könnten, dass Geräte länger genutzt werden, indem die Hersteller\*innen beispielsweise eine längere Produktlebensdauer garantieren und zusätzlich defekte Geräte repariert werden. So könnte der Ressourcenverbrauch und das weltweite Abfallaufkommen reduziert und die Umwelt geschützt werden. In der vorliegenden Zusammenfassung der Masterarbeit werden einige Beispielthemen benannt und diskutiert. Die folgenden Aspekte bilden aber nur beispielhaft die umfassenden Ergebnisse der gesamten Studie ab.

## **2 Methodik**

„Wenn es um die Haltung der Bevölkerung in der öffentlichen Diskussion zum geplanten Produktverschleiß geht, wird den Massenmedien eine dominante Rolle zur Einstellungsbildung zugesprochen“ (Jaeger-Erben und Hipp 2018). Um diese Rolle zu untersuchen und einen möglichst detaillierten Einblick in das Thema zu gewinnen, wurde ein Mixed-Methods Ansatz gewählt, also eine Kombination aus qualitativen und quantitativen Forschungsmethoden. Für diese Untersuchung wurde ein sequenzielles Design gewählt, indem Daten zuerst qualitativ analysiert wurden und danach aus den Ergebnissen eine quantitative Umfrage entwickelt wurde (Kuckartz 2014).

### **2.1 Qualitative Diskursanalyse**

Um die Wahrnehmung in der deutschen Öffentlichkeit untersuchen zu können, wurden Zeitungsartikel aus drei überregionalen Tageszeitungen analysiert. Massenmedien, wie Zeitungen, repräsentieren die Öffentlichkeit und geben ihr eine bestimmte Form (Berghaus 2003). Zeitungsartikel bieten zum einen die Möglichkeit, Diskurse auch noch nach Jahren nachzuverfolgen; zum anderen produzieren Zeitungen täglich Informationen und Mitteilungen, an die angeschlossen werden kann. Sie haben die Eigenschaft, die Komplexität von Themen zu verringern und diese so den Bürger\*innen zugänglich zu machen, die sich auf diese Weise Wissen erhalten und Meinungen bilden können (Nienierza 2014). Es wurden Artikel aus den drei größten überregionalen und unabhängigen Tageszeitungen Deutschlands (FAZ, SZ und TAZ) aus den Jahren 2015-2020 analysiert. Die Artikel wurden mithilfe der Software MAXQDA ausgewertet. Die Daten wurden angelehnt an den Ansatz der Grounded Theory ausgewertet und nach dem offenen, dem axialen und dem

selektiven Codierverfahren codiert (Kuckartz 2010). Es wurden 28 Artikel codiert, 373 Codes vergeben und 756 Segmente codiert.

## **2.2 Quantitative Online-Befragung**

Um zu überprüfen, ob die Wahrnehmung der Bevölkerung mit der Darstellung der geplanten Obsoleszenz in den ausgewählten deutschen Printmedien übereinstimmt, wurde eine quantitative Online-Befragung durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse der Diskursanalyse und Literaturrecherche wurde ein Online-Fragebogen entwickelt. Die Umfrage dauerte ungefähr 10 Minuten und wurden in einem Zeitraum von einem Monat verbreitet. Insgesamt haben n=342 Personen an der Befragung teilgenommen. Anschließend wurden die Ergebnisse mithilfe von SPSS bereinigt und ausgewertet.

## **3 Ergebnisse und Diskussion**

Obwohl ein gewollter und vorzeitiger Produktverschleiß seitens der Hersteller\*innen nicht bewiesen werden kann, stimmen 82,5 % der befragten Personen (n=263) zu bzw. eher zu, dass Hersteller\*innen Geräte absichtlich so gestalten würden, dass sie frühzeitige Defekte aufweisen. Diese Wahrnehmung von einem gewollten Produktverschleiß steht in einem Gegensatz zu den tatsächlichen Erfahrungen der Teilnehmer\*innen der Befragung. Dass Geräte kurz nach dem Ablauf der Garantiezeit Defekte aufweisen, ist keine alltägliche Erfahrung: Von n=263 Antworten gaben 69,2 % der Befragten an, dass ihr zuletzt kaputtgegangenes Gerät erst lange nach Ablauf der Garantiezeit einen Defekt aufgewiesen hat. Diese Mängel lassen sich nach den Angaben der Befragten hauptsächlich auf erwartete Verschleißerscheinungen zurückführen und nicht auf Produktionsfehler.

### **3.1 Wahrgenommene Nutzungs- und Lebensdauer von Elektronikgeräten**

Wie lange Elektro- und Elektronikgeräte genutzt werden und welche Erwartungen die Konsument\*innen an die Lebensdauer von Produkten haben, ist maßgeblich von der Art des Geräts abhängig. Beispielsweise ist die erwartete Lebenszeit von Smartphones höher als die tatsächliche Nutzungsdauer, wohingegen Waschmaschinen die Erwartungen an ihre Lebenszeit laut den Ergebnissen dieser Befragung erfüllen. Die Nutzungsdauer ist allerdings auch von der Nutzungsintensität abhängig: Ein Smartphone beispielsweise wird von vielen Personen nahezu rund um die Uhr genutzt und verschleißt somit früher. Außerdem hängt die Nutzungszeit eines Geräts mit der Sichtbarkeit im Alltag zusammen: Smartphones dienen im Alltag eher als Statussymbol, als es Waschmaschinen tun. Diese Beispiele verdeutlichen, wie wichtig eine produktspezifische Betrachtung ist.

Laut der Medienberichterstattung sind Waschmaschinen, Fernseher, Kühlschränke und Smartphones besonders von einer verkürzten Nutzungs- und Lebenszeit betroffen. In den letzten 12 Monaten sind den Befragten im Schnitt 1,8 Geräte kaputtgegangen. Die Geräte, die als letztes einen Defekt aufgewiesen haben und am häufigsten ausgewählt wurden, waren Smartphones, elektrische Herde/Öfen, Waschmaschinen und Drucker. Es zeigt sich, dass diese Geräte auch in den Medien häufig als Beispiel für geplante Obsoleszenz genannt werden.

### 3.2 Hürden bei der Reparatur von Elektronikgeräten

Und auch, wenn es um die Hürden bei Reparaturen geht, stimmt die Darstellung der Medien mehrheitlich mit der Wahrnehmung der Verbraucher\*innen überein. Ein Großteil der Befragten (97,3 %) stimmt der Aussage zu oder eher zu, dass das Ersetzen eines Elektronikgeräts einfacher ist als dessen Reparatur. Diesen Eindruck vermitteln auch die Medien: Sie thematisieren, dass Reparaturen von den Hersteller:innen nicht gewünscht seien. Produkte würden so hergestellt, dass sie nicht verschraubt, sondern fest verklebt sind und sich dadurch bei einer anstehenden Reparatur nicht öffnen ließen. Falls sie doch verschraubt sind, könnten sie nur mittels eines Spezialwerkzeugs geöffnet werden, wodurch eine Reparatur erschwert würde. Ersatzteile seien nicht lange genug vorrätig oder nicht verfügbar. Nur knapp über die Hälfte (55,4 %) der Umfrageteilnehmer\*innen (n=289) hat sich über eine mögliche Reparatur informiert. Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Informieren über eine Reparatur und dem tatsächlichen Versuch, ein Gerät zu reparieren. Es wird außerdem deutlich, dass oftmals ein Interesse an Reparaturen besteht, diese jedoch (zu) schwierig umsetzbar sind. Besonders häufig geben die Befragten an,

- dass eine Reparatur zu viel Aufwand bedeuten würde,
- dass ein Gerät neu zu kaufen günstiger war, als es zu reparieren und auch,
- dass es sich nicht gelohnt hätte, das Gerät zu reparieren, weil es sowieso nicht mehr lange halten würde.

Die ökonomische Obsoleszenz, also dass ein Gerät neu zu kaufen günstiger ist als es reparieren zu lassen, kann als eine der größten Hürden für Reparaturen beschrieben werden. Nach Tröger et al. versuchen viele Konsument\*innen ein Gerät nur dann zu reparieren, wenn das Gerät noch innerhalb der Garantielaufzeit kaputt ging oder es als besonders jung und in einem guten Zustand angesehen wird (Tröger et al. 2017). Dabei scheint auch hier die Wahrnehmung der Medien mit der der Konsument\*innen übereinzustimmen: Sie denken, dass eine Reparatur viel Aufwand bedeuten würde, kostenintensiver sei als ein Neukauf oder sich eine Reparatur für ein altes Gerät nicht lohnen würde. Dabei ist festzuhalten, dass nur wenige Befragte angaben, dass die Reparatur zu teuer sei. Die Hauptmotive derjenigen Personen, die sich für eine Reparatur entscheiden, sind das Sparen von Kosten und das Schützen der Umwelt. Der Erwerb eines neuen Gerätes, das vergleichsweise so teuer wie eine Reparatur ist, erscheint daher für viele die attraktivere Lösung zu sein.

## 4 Fazit

Die Untersuchung hat gezeigt, dass das Phänomen des geplanten Produktverschleißes in der Wahrnehmung der deutschen Öffentlichkeit fest verankert und in den deutschen Printmedien präsent ist. Das Thema zeichnet sich durch seine Vielschichtigkeit und Komplexität aus. Geplante Obsoleszenz geht weit über die Annahme hinaus, Hersteller\*innen würden ihre Produkte so planen, dass sie nach einer bestimmten Zeit Defekte aufweisen, um ihren Absatz zu steigern und Konsument\*innen dazu zu „zwingen“ Produkte schneller zu ersetzen. Nichtsdestotrotz wird geplante Obsoleszenz mit der gängigen und eher negativen Definition beschrieben, welche auf ein mutwilliges und bewusstes Verhalten der Hersteller\*innen zur Maximierung des Profits abzielt. Die Zeitungsartikel zwischen den Jahren 2015 und 2020 berichten differenziert über geplante Obsoleszenz und stützen sich größtenteils auf wissenschaftliche Erkenntnisse.

Das Problem der geplanten Obsoleszenz kann nur systemisch gelöst werden, indem alle am Marktgeschehen beteiligten Akteure gemeinsam daran arbeiten, Produkte möglichst lange zu nutzen. Dazu gehört die Produktion von langlebigen, reparierbaren und recyclebaren Geräten, eine sorgsame Nutzung, Pflege und Reparatur, sowie die Etablierung eines Gebrauchsgütermarktes. Außerdem benötigt eine solche Transformation Normen, Gesetze und Mindestqualitätsanforderungen an Hersteller\*innen seitens der Politik. Parallel dazu sollte weitere Forschung auf dem Feld der Verlängerung von Produktlebens- und Nutzungsdauer betrieben werden, um weitere Maßnahmen zu eruieren.

## Literatur/Quellen

- Berghaus, M. (2003): Luhmann leicht gemacht: eine Einführung in die Systemtheorie. UTB ; 2360 : Soziologie, Medien- und Kommunikationswissenschaft, Geisteswissenschaft. Köln.
- Cooper, T. (2010): Longer Lasting Products: Alternatives to the Throwaway Society. Farnham. Internet: [https://www.google.com/search?q=Cooper%2C+Tim%2C+Hg.+2010.+Longer+lasting+products.+Alternatives+to+the+throwaway+society.+Farnham%3A+Ashgate&rlz=1C1CHBF\\_deDE888DE888&oq=Cooper%2C+Tim%2C+Hg.+2010.+Longer+lasting+products.+Alternatives+to+the+throwaway+society.+Farnham%3A+Ashgate&aqs=chrome..69i57.516j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=Cooper%2C+Tim%2C+Hg.+2010.+Longer+lasting+products.+Alternatives+to+the+throwaway+society.+Farnham%3A+Ashgate&rlz=1C1CHBF_deDE888DE888&oq=Cooper%2C+Tim%2C+Hg.+2010.+Longer+lasting+products.+Alternatives+to+the+throwaway+society.+Farnham%3A+Ashgate&aqs=chrome..69i57.516j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8) (09.06.2021).
- Jaeger-Erben, M. (2019): Eine Frage der Kultur? Gesellschaftliche Treiber von Obsoleszenz. In: Poppe, E. und J. Longmuß (Hrsg.) (2019): Geplante Obsoleszenz. Bielefeld: 171–190. Internet: <http://www.degruyter.com/view/books/9783839450048/9783839450048-010/9783839450048-010.xml> (22.09.2020).
- Jaeger-Erben, M. und T. Hipp (2018): Geplanter Verschleiß oder Wegwerfkonsum? Verantwortungsdiskurse und Produktverantwortung im Kontext kurzlebiger Konsumgüter. In: (2018): Reflexive Responsibilisierung. Verantwortung für nachhaltige Entwicklung. Bielefeld: 373–394.
- Jalsovec, A. (2013): Eingebautes Verfallsdatum in Elektrogeräten. Süddeutsche.de (2013). Internet: <https://www.sueddeutsche.de/geld/studie-zu-elektrogeraeten-geplanter-verschleiss-ist-ein-massenphaenomen-1.1628942> (06.06.2021).
- Kuckartz, U. (2014): Mixed Methods. Wiesbaden. Internet: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-531-93267-5> (20.04.2021).
- Kuckartz, U. (2010): Einführung in die computergestützte Analyse qualitativer Daten. Internet: <https://www.springer.com/de/book/9783531166612> (22.04.2021).
- Nienierza, A. (2014): Die größte anzunehmende Umbewertung? Eine Frame-Analyse der deutschen Presseberichterstattung über Kernenergie nach den Reaktorunfällen von Tschernobyl (1986) und Fukushima (2011). In: Wolling, J. und D. Art (Hrsg.) (2014): Fukushima und die Folgen – Medienberichterstattung, Öffentliche Meinung, Politische Konsequenzen, NEU - Nachhaltigkeits-, Energie- und Umweltkommunikation, Band 2. Ilmenau: 31–54.
- Oetzel, G. (2012): Das globale Müll-System. Vom Verschwinden und Wieder-Auftauchen der Dinge. In: Globale öffentliche Güter in interdisziplinären Perspektiven. Hrsg.: M. Maring: 79.
- Packard, V. (1960): The Waste Makers. London.
- Poppe, E. (2017): Die zwei Seiten der geplanten Obsoleszenz – Blog Postwachstum. Postwachstum. Internet: <https://www.postwachstum.de/die-zwei-seiten-der-geplanten-obsoleszenz-20171030> (22.09.2020).
- Prakash, S., G. Dehoust, M. Gsell, T. Schleicher und D. R. Stamminger (2016): Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“. Dessau-Roßlau.

- Statistisches Bundesamt (2021): 10,3 Kilogramm Elektroabfall pro Kopf in Deutschland im Jahr 2018. Statistisches Bundesamt. Internet: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2021/PD21\\_11\\_p002.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2021/PD21_11_p002.html) (06.06.2021).
- Tröger, N., H. Wieser und R. Hübner (2017): Smartphones werden häufiger ersetzt als T-Shirts: Die Nutzungsmuster und Ersatzgründe von KonsumentInnen bei Gebrauchsgütern. In: Beiträge zur Verbraucherforschung. Internet: [http://www.verbraucherforschung.nrw/bzv6\\_5](http://www.verbraucherforschung.nrw/bzv6_5) (18.10.2020).
- Wieser, H. und N. Tröger (2015): Die Nutzungsdauer und Obsoleszenz von Gebrauchsgütern im Zeitalter der Beschleunigung. Eine Untersuchung in österreichischen Haushalten. Wien.

## **Kontakt**

*M.Sc. Magdalena Kitzberger, Wissenschaftliche Mitarbeiterin*

Technische Universität Hamburg (TUHH) / Circular Resource Engineering and Management (CREM)

Tel.-Nr. +49 40 428 78 35 27

E-Mail: [magdalena.kitzberger@tuhh.de](mailto:magdalena.kitzberger@tuhh.de)

## Anwendung von Kavitation zur Trennung von Leichtfraktionen aus dem Hausmüll mit anschließender Analytik

**Abstract:** Kavitation beschreibt den Vorgang des Kollabierens von Wasserdampfblasen im Medium Wasser. Kavitation ist aufgrund der verursachten Schäden an Pumpen und Schiffschrauben in diesem Zusammenhang ausführlich wissenschaftlich untersucht worden. Die Auswirkungen der Kavitationsbehandlungen auf diverse Abfallfraktionen sind noch nicht in der Literatur beschrieben. Hier ist das Ziel die Auswirkungen zu analysieren, um dieses Verfahren wissenschaftlich aufzuarbeiten. Durch die Kavitationsbehandlung können verschiedene Faser-Kunststoffverbände in die sortenreinen Ausgangs-Fraktionen aufgetrennt werden. Dies bildet die Grundlage für eine stoffliche Verwertung und die Schließung von Stoffkreisläufen. Die Kavitationsbehandlung der Fraktionen erfolgt durch das schlagartige Entspannen eines aufgebauten Unterdrucks. Hier entsteht ein sogenannter „Jet“, welcher durch das Kollabieren der Wasserdampfblasen einen Druck von  $10^5$  bar, welcher Punktuell auf Testmaterial trifft, aufbaut. Der erzeugte, örtlich begrenzte Druckstoß ist in der Lage, verschiedene Verbundfraktionen, wie z.B. Tetra-Packs, in ihre Grundbestandteile aufzutrennen.

### 1 Einleitung

Der Abfallwirtschaft stehen aufgrund des Wandels zur Kreislaufwirtschaft gravierende Transformationsprozesse bevor. Um Kreisläufe schließen zu können, ist es wichtig, das stoffliche Nutzpotalential von Abfall voll auszunutzen. Die stoffliche Nutzung von Hausmüllfraktionen ist momentan auf den Non-Food Bereich beschränkt. Es ist gem. § 8 (Kreislaufwirtschaftsgesetz, 2012) Aufgabe der Abfallwirtschaft, eine stoffliche Verwertung der thermischen Verwertung vorzuziehen. Hierzu gilt es Lösungsansätze zu finden und zu erforschen, um dies zu ermöglichen.

Unter den Rahmenbedingungen einer steigenden Weltbevölkerung sieht der Autor es für eine überlebenswichtige Notwendigkeit an, Stoffkreisläufe zu schließen und somit eine nachhaltige Ressourcennutzung zu etablieren. Dies gilt auch unter dem Aspekt des Konkurrenzdruckes auf globale Wohn- und Anbauflächen unter dem Ziel der Erhaltung der Biodiversität. Das Ziel ist, den Konkurrenzdruck dahingehend zu mindern, dass weniger dieser Flächen für die Ressourcenförderung genutzt werden müssen. Die Fragestellung der Forschung ist, ob eine Kavitationsbehandlung der Leichtverpackungsfraktionen/ Papier-Pappe-Karton (PPK)-Fraktionen dazu führen kann, dass eine stoffliche Verwertung der getrennten Fraktionen unter ökologischen und ökonomischen Aspekten sinnvoll ist. Für die Beantwortung dieser Fragestellung sind vor allem zwei Punkte von übergeordnetem Interesse: Der Einfluss der Kavitationsbehandlung auf die Sortenreinheit der Fraktionen sowie die Entkeimung der Fraktionen.

Hier stellt sich die Frage, wie intensiv der Einsatz der Kavitationsbehandlung auf welche Fraktionen eingesetzt werden muss, um eine stoffliche Nutzung zu ermöglichen.

Im Rahmen der Analyse der Trennschärfe einer Kavitationsbehandlung auf die Fraktionen wird erforscht, wie sich die Kavitation hier auswirkt. Hierfür wird die Ausbeute bestimmt, um mögliche Verluste der Behandlung zu zeigen. Ebenfalls lässt sich hier gravimetrisch die Trennschärfe der Kavitationsbehandlung bestimmen.

Um die Wirtschaftlichkeit zu bestimmen, wird das erzielte Ergebnis der Behandlung dem Energieverbrauch gegenübergestellt. Ggf. werden die hier gesammelten Erkenntnisse interessant, sobald grüne Energie im Überschuss vorhanden ist.

Kavitation ist bisher als negativer Effekt durch Schäden an Pumpen oder Schiffsschrauben in Erscheinung getreten (Brennen, 1995) (G. Wickert, 1971). Hier resultieren die Schädigungen aus dem Kollabieren der Wasserdampfblasen, welche einen Druckstoß „Jet“ bei der Kollabierung freisetzen, der die Materialien beschädigt. Faktoren, die den Druckstoß beeinflussen, sind das Schiffsschrauben-Design, die Rotationsgeschwindigkeit der Schraube und die Tauchtiefe des Objekts.

Das Start-Up „Repulping Technology“ hatte die Vision diese Kraft positiv zu nutzen, um gemischte Abfälle besser trennen zu können. Durch die Kavitationsbehandlung können bei Verbundstoffen wie Tetra-Packs die Faserstofffraktion von der PE-Folienfraktion und der Aluminiumfolienfraktion aufgetrennt werden.

Bereits im Rahmen der Masterarbeit des Autors wurde an diesem Verfahren geforscht. Hier wurden neue Erkenntnisse zur Auswirkung der Kavitation auf die Ausgangsmaterialien gewonnen. Die Masterarbeit kann aufgrund eines Sperrvermerks jedoch nicht als Quelle genutzt werden.

Die Repulping Technology GmbH&Co.KG besitzt zwei Versuchsanlagen. Eine Anlage für Versuche im Labormaßstab und eine weitere zum Arbeiten im kleinindustriellen Maßstab. Durch die Anlagen lassen sich sowohl kleinere Versuchsreihen durchführen, als auch eine großtechnische Umsetzung simulieren.

## **2 Methodik**

Durch die Kavitationsbehandlung können verschiedene Faser-Kunststoffverbände in die sortenreinen Ausgangs-Fraktionen aufgetrennt werden, was Grundlage für eine stoffliche Verwertung und die Schließung der Stoffkreisläufe ist.

Die Kavitationsbehandlung der Fraktionen erfolgt durch das schlagartige Entspannen eines aufgebauten Unterdrucks. Hier entsteht ein „Jet“, welcher Drücke von  $10^5$  Bar punktuell auf einen zu untersuchenden Testkörper aufbringt und durch das Kollabieren der Wasserdampfblasen im Medium Wasser generiert wird. (Brennen, 1995).

Der Kavitationsstofflöser (KSL) wird mit Proben befüllt und verschlossen, im Anschluss baut sich durch eine Vakuumpumpe das Vakuum auf, das Probenmaterial wird kontinuierlich durch einen Rotor durchmischt. Im Anschluss der Behandlung wird der KSL entleert und das Probenmaterial aufgearbeitet



und untersucht. Zielparameter sind hier die erreichte Sortenreinheit und die potentielle Reduktion der Keimzahl (Weuster-Botz, 2008). Um festzustellen, ob eine Behandlung wirtschaftlich zu realisieren ist, wird ebenfalls der Stromverbrauch pro Behandlung gemessen und zur Evaluation dem Behandlungsergebnis gegenübergestellt.

Als variable Parameter werden zur Behandlung die Anzahl der Stöße (schlagartige Entspannungen des Vakuums) und die Intensität des Vakuums angesehen, ebenfalls kann die Auswirkung der Kavitation bei unterschiedlichen Stoffdichten analysiert werden. Es wird ein wässriges Medium benötigt. Dieses Verfahren arbeitet demnach im Batch-System. Das Batch-System hat Nachteile hinsichtlich der benötigten Lagerkapazitäten vor- und nach der Behandlung. Des Weiteren muss die Anlage zeitaufwändig bestückt und geleert werden.

Der große Vorteil dieses Verfahrens ist die Flexibilität in Bezug auf die Versuchsparameter, da bedarfsgerecht für jede Fraktion ein eigenes Programm gefahren werden kann, welches auf die zu behandelnde Fraktion abgestimmt ist und gleichzeitig den ressourcenschonendsten Einsatz für das gewünschte Ergebnis verspricht.

Die Repulping Technology GmbH&Co.KG (Homepage: <https://www.repulpingtechnology.com/de/>) hat zwei Kavitationsanlagen in Besitz, an denen reproduzierbare Kavitationsbehandlungen durchgeführt werden können.

Diese Promotion soll sowohl das Trennverhalten durch die Kavitationsbehandlung charakterisieren, als auch eine mögliche Entkeimung durch die Kavitationsbehandlung untersuchen. Durch eine hinreichende Entkeimung kommt eine größere Bandbreite an späterer Nutzung der Fraktionen in Frage. Hier kann ein neuer Prozess etabliert werden, der einen Beitrag liefert, um die Kreisläufe der Abfallwirtschaft zu schließen.

Diese Arbeit wird das Entkeimungspotential untersuchen und die durch die Kavitationsbehandlung erreichte Sortenreinheit quantifizieren. Zur Bestimmung der Keimzahl schlägt der Autor das Plattenverfahren vor, möglich ist jedoch ebenfalls eine Analytik, welche bereits im Rahmen der Algenanalytik an der TUHH eingesetzt wird. Hier könnten durch die angelehnte Analyse an die Algenanalytik Synergien genutzt werden.

## **Danksagung**

Der Dank des Autors gilt der Stadtreinigung Hamburg, namentlich Prof. Dr. Siechau, für die Möglichkeit eine Promotion einreichen und vorstellen zu dürfen. Ebenfalls danke ich der TUHH, Frau Prof. Kuchta und Dr. Marco Ritzkowski für die Betreuung der Arbeit und Repulping Technology für das zur Verfügung stellen der Versuchsanlage.

## **Literatur/Quellen**

- Brennen, C. E. (1995). Cavitataion and Bubble Dynamics. Pasadena California: Oxford University Press.
- Wickert, G. S. (1971). Stahlwasserbau. Karlsruhe: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
- Kreislaufwirtschaftsgesetz. (1. Juni 2012). Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Berlin, Deutschland: Bundesregierung.
- Stadtreinigung Hamburg. (2020). Hausmüllmenge und Hausmüllzusammensetzung in der Freien und Hansestadt Hamburg im Jahr 2020, Seite 37-40. Hamburg: Stadtreinigung Hamburg.
- Weuster-Botz D. (2008): Umweltschonende und kosteneffizeinet Wasserentkeimung durch kontrollierte hydrodynamische Kavitation: Kavitationsentkeimer, Abschlussbericht 24003-23/ Tu München Bioverfahrenstechnik)
- Webseite: Repulping Technology GmbH & Co KG: <https://www.repulpingtechnology.com/de/> zuletzt aufgerufen: 09.01.2023

## **Kontakt**

*Nils Klemeyer, Project Manager Consulting*

HIICCE

Tel: 0151 40 60 1104

E-Mail: [nils.klemeyer@hiicce.hamburg](mailto:nils.klemeyer@hiicce.hamburg)

Homepage: <https://www.hiicce.de/>

## Aufbau einer Materialdatenbank zur Förderung des Verständnisses und der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft

**Abstract:** Eine nachhaltige Rohstoffnutzung und damit die Verringerung des Verbrauchs an Ressourcen ist eine der wichtigsten und größten Herausforderungen unserer Zeit. Der Rohstoffverbrauch des produzierenden Gewerbes ist in Deutschland konstant auf einem hohen Niveau. Die damit einhergehende Rohstoffgewinnung und Primärproduktion sind mit hohen Energieverbräuchen und umweltschädlichen Emissionen verbunden. Kreislaufwirtschaftliche sowie technische Kompetenzen mit Verbindung zum nachhaltigen Umgang mit Ressourcen in verschiedenen Stoffsystemen gewinnen deswegen stark an Bedeutung. Die universitäre Lehre endet jedoch vielfach an den Schnittstellen der Fachbereiche. Diese Schnittstellen müssen für ein ganzheitliches Verständnis überwunden werden, ermöglichen einen Perspektivwechsel und dienen den Studierenden als Vorbereitung für Interdisziplinarität. Dafür wird am Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe (ANTS) der RWTH Aachen eine Material- und Informationsdatenbank zur Förderung des Verständnisses und der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft aufgebaut. Diese werden in diesem Beitrag beschrieben. Über die Informationsdatenbank CirculateD werden Medien zu den Inhalten eines nachhaltigen, zirkulären Wirtschaftens online zur Verfügung gestellt, während im Material Assessment Lab (MAssLab) ergänzend reale Proben zur Anschauung ausgestellt werden. Die Evaluationen der Lehrveranstaltungen zeigen, dass die Nähe zur Praxis und das digitale Lernangebot die Motivation der Studierenden steigern und so bessere Lernergebnisse erzielt werden. Durch eine multimediale Lernumgebung können die verschiedenen Lerntypen abgeholt werden.

### 1 Einleitung

Der Rohstoffbedarf des produzierenden Gewerbes ist in Deutschland konstant auf einem hohen Niveau, global steigt der Rohstoffverbrauch weiterhin deutlich an (OECD 2019). 2019 wurden in Deutschland 945 Mio. Mg Rohstoffe aus der Umwelt entnommen und weitere 360 Mio. Mg aus dem Ausland importiert (Statistisches Bundesamt 2021). Die Rohstoffgewinnung und Primärproduktion sind mit hohen Energieverbräuchen (3.856 Petajoule) und umweltschädlichen Emissionen (z.B. Treibhausgase: 978 Mio. Mg CO<sub>2</sub>-Äquivalente) verbunden (Statistisches Bundesamt 2022a, 2022b). Zur Schonung der natürlichen Ressourcen und zur Reduktion der negativen Umweltauswirkungen durch die Produktion hat sich die Bundesregierung einer verstärkten Kreislaufführung von Materialien verschrieben (vgl. z. B. ProgRes, europäischer Green Deal). Dabei ist es essenziell, schon während der Entwicklung und Herstellung eines

Produkts den kompletten Lebenszyklus zu berücksichtigen und die Kreislauffähigkeit zu betrachten und zu optimieren. Dieses Bewusstsein für die Bedeutung der Kreislaufwirtschaft und deren Anforderungen muss in der Wirtschaft, aber auch in der Ausbildung von Nachwuchskräften weiter gestärkt bzw. geschaffen werden.

Um das Verständnis für Zusammenhänge der Lebenszyklusabschnitte bereits frühzeitig während des Studiums, aber auch an Wirtschaftsakteure\*innen, zu vermitteln, wird im institutsinternen Projekt Circular Material Database (CirculateD) am ANTS eine Materialdatenbank für anthropogene Stoffsysteme entlang der Wertschöpfungskette aufgebaut. Diese besteht zum einen aus physischen Handstücken, die die Gewinnung, Produktion, Nutzung und Verwertung bzw. Entsorgung von Stoffströmen und deren Verkettungen in dem institutsinternen Material Assessment Lab (MAssLab) veranschaulichen und so Rohstoffe, insbesondere Recyclingrohstoffe, visuell und haptisch erfahrbar machen. Zum anderen entsteht eine digitale Informationsdatenbank (CirculateD), in der im ersten Schritt 3D-Modelle der ausgestellten Handstücke gezeigt und Informationen zu den Charakteristiken der Handstücke sowie weitere Hintergrundinformationen zum Stoffstrom, der Herkunft und dem Lebenszyklusabschnitts zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus werden weiterführende Informationen zum Thema Kreislaufwirtschaft, wie z.B. zu Recyclingverfahren und ökologischen Bewertungsmethoden, und zu aktuellen Forschungsthemen bereitgestellt, sodass eine Art digitales Lehrbuch entsteht. Die Inhalte der Datenbank sollen dabei stetig erweitert und auch für weitere Fachbereiche geöffnet werden. Die Handstücke und die CirculateD sollen insbesondere dabei unterstützen, die Lerninhalte der Vorlesungen zu veranschaulichen sowie nachzuarbeiten und das Bewusstsein für Chancen und Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft zu stärken.

## **2 Methodik**

In der Konzeptphase werden die Ziele festgelegt, die mit der Datenbank erreicht werden sollen. Dies ist zum einen die Verbesserung der Lehre durch anschauliche und praxisnahe Ausstellungsstücke und eine digitale Verknüpfung zu weiterführenden Informationen. Zum anderen sollen die Zusammenhänge und Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft verdeutlicht und erfahrbar gemacht werden. Durch diese Abstimmung soll die optimale Interaktion mit und zwischen der physischen und digitalen Datenbank gewährleistet werden. Die Handstücke in der Ausstellung und die Artikel für das digitale Lehrbuch CirculateD werden dabei so gewählt, dass die Besonderheiten des jeweiligen Stoffstroms im entsprechenden Lebenszyklusabschnitt aufgezeigt werden können. Ein Terminal im MAssLab dient zur Verknüpfung der Handstücke mit der digitalen Datenbank (vgl. Abbildung 1). Über Quiz und E-Tests, die sich auf das digitale Lehrbuch und die Handstücke beziehen, sollen das MAssLab und die CirculateD in die Lehre eingebunden und die Studierenden zu einem Besuch angeregt werden. Dafür erhalten die Studierenden an regelmäßig angebotenen Präsenztagen im MAssLab Aufgaben, die sie mithilfe der CirculateD und den Handstücken lösen können, um so ein umfassendes Verständnis der Wertschöpfungsketten zu erhalten und auf Zusammenhänge hingewiesen zu werden.

### **2.1 Probenerfassung und Aufbau der Materialdatenbank**

Für die Materialdatenbank im MAssLab wird zunächst das Probenmaterial aus abgeschlossenen und laufenden Forschungsprojekten, Auftragsforschungen und Dienstleistungen des Institutes gesichtet und eine erste Kategorisierung nach Stoffströmen und Lebenszyklusabschnitt vorgenommen. Dabei sollen die Hauptstoffströme Papier, Kunststoffe, Glas und Metalle über den kompletten Lebenszyklus von

der Wiege bis ins Grab – bzw. bis zur Rückgewinnung als Sekundärrohstoff – exemplarisch dargestellt werden (vgl. Abbildung 1). Darüber hinaus werden Verbundwerkstoffe wie Baumaterialien, Elektro- und Elektronikgeräte und Verpackungen ausgestellt, um aufzuzeigen, wie vielfältig die Zusammensetzungen von Verbundsystemen sind und welche spezifischen technischen und kreislaufwirtschaftlichen Aufgabenstellungen mit dem Recycling einhergehen. Neben den Stoffströmen werden die verschiedenen Sammelsysteme (Leichtverpackungen, Glas, Papier, Sperrmüll, Pfandsystem, Elektro, Restabfall...) und die unrechtmäßige Entsorgung (z.B. Littering) in Deutschland betrachtet, um die Komplexität der Abfallbehandlung und die Mischung der einzelnen Stoffströme in der Sammlung zu verdeutlichen (vgl. Abbildung 1). Neben dem Recycling der Stoffströme werden auch die Wiederverwendung, die thermische Verwertung und die Beseitigung betrachtet. Damit einher geht auch die Anlagentechnik, die beim End-of-Life (EoL) Anwendung findet und ebenfalls im MAssLab präsentiert wird.

Nach der Kategorisierung der Bestandsproben erfolgt eine systematische Nummerierung der Proben nach dem Muster *Lebenszyklusabschnitt – Stoffstrom – fortlaufende Nummer*, damit die Proben im Lehrbetrieb direkt zugeordnet und besser organisiert werden können. Die Probensammlung wird fortlaufend über Forschungsprojekte und Kontakte zur Industrie um weitere Stücke ergänzt. Dafür werden Lebenszyklen skizziert und Rohstoffe und Produkte anhand der Wertschöpfungskette aufgenommen.

Das Konzept der Materialdatenbank sowie Kurzinformationen zu den Lebenszyklusabschnitten werden im MAssLab über Poster präsentiert. Darüber hinaus können die Stoffströme über Farbcodierungen auch in den verschiedenen Verbundmaterialien wiedergefunden werden.

## **2.2 Erstellung der Informationsdatenbank**

Die Informationsdatenbank wird wie ein Wiki aufgebaut und soll durch eine klare Strukturierung die Lehre als digitales Nachschlagewerk um weiterführende Informationen ergänzen. Dabei werden die Informationen auch hier entlang des Produktlebenszyklus geordnet. Außerdem werden allgemeine Informationen zur Kreislaufwirtschaft, zur Abfallaufbereitung und -bilanz sowie zu den rechtlichen Rahmenbedingungen und der Abfallgeschichte bereitgestellt. Am Aufbau der Materialdatenbank orientiert, werden die Lebenszyklen der zuvor genannten Stoffströme im Einzelnen aufgezeigt. In den Artikeln werden dazugehörige Informationen, Stoffströme oder Prozesse verlinkt. Die Informationen geben dabei einen allgemeinen Überblick und es wird auf weiterführende Literatur verwiesen. Zur Veranschaulichung werden zudem Videos verlinkt, z.B. zur Veranschaulichung von Aufbereitungsprozessen.

Die CirculateD wird öffentlich zugänglich und von überall abrufbar sein, wodurch sich das Lernen zeitlich flexibel gestalten lässt. Sie soll aber vor allem für die Präsenztermine und Eigenstudium im MAssLab die Vorlesungsinhalte vertiefen und so ein besseres Verständnis der Zusammenhänge in der Kreislaufwirtschaft ermöglichen.

## **2.3 Verknüpfung der physischen und digitalen Datenbank über die Ausstellungsproben**

Die Verknüpfung der physischen und digitalen Datenbank erfolgt beim Aufenthalt im MAssLab über die Ausstellungsproben. Diese werden mit einem QR-Code versehen, der über ein Terminal im MAssLab oder ein eigenes Mobiltelefon gescannt werden kann (vgl. Abbildung 1). Der QR-Code führt auf eine Übersichtsseite in der CirculateD, die für jede einzelne Probe angelegt wird und auf der die Probenherkunft

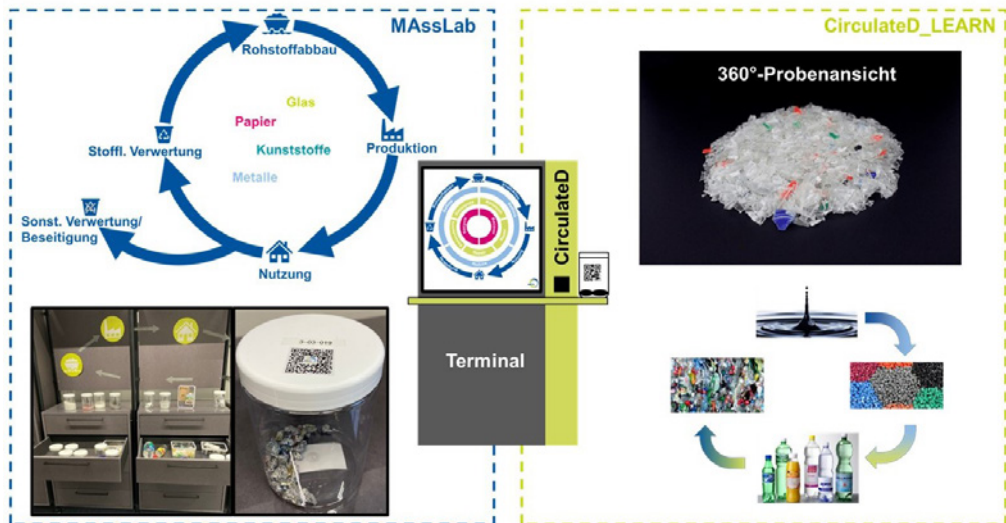


Abbildung 1: Aufbau und Verknüpfung der Material- und Informationsdatenbank

und -eigenschaften, wie z.B. die Zusammensetzung, hinterlegt sind. Für jede Probe wird eine 360°-Probenansicht erstellt, die nach dem Scannen des QR-Codes zu sehen ist. So können die Handstücke auch ohne Zugang zum MASSLab betrachtet werden. Von der Probenseite werden Verlinkungen zu weiterführenden und allgemeinen Informationsartikeln angeboten.

Themenspezifische Proben bzw. Handstücke können auch über den direkten Zugriff auf die CirculateD gefunden werden. Dabei erfolgt die Verknüpfung über die Informationsartikel. Auf diesen werden die Probenseiten der physischen Proben verlinkt, sodass über die Probennummer die Probe im MASSLab ausfindig gemacht werden kann. So können z. B. für einen bestimmten Aufbereitungsprozess dazugehörige Stoffströme und Handstücke gefunden und beispielsweise Trenn- oder Sortiererfolge begutachtet werden.

### 3 Fazit und Ausblick

Bei den jährlichen Evaluationen der Lehrveranstaltungen durch Studierende zeigt sich, dass durch die Ergänzung der theoretischen Lehre mit Praxisbeispielen und Handstücken die verschiedenen Lerntypen umfassender adressiert sowie motiviert werden können und die Lernziele besser erreicht werden. Außerdem bringen Alltagsbeispiele und Erfahrungsberichte den Studierenden die Ansätze und Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft näher. Dieses Verständnis soll nach dem abgeschlossenen Studium die Transformation der Industrie hin zur Kreislaufwirtschaft voranbringen, unterstützt durch das über die Datenbank CirculateD vermittelte Wissen.

Auch über die Lehre hinaus kann die Systematik der Kreislaufwirtschaft und Stoffströme bei verschiedenen gesellschaftlichen Akteur\*innen durch Veranstaltungen und Workshops im MAssLab weiterentwickelt werden. So soll das kreislaufwirtschaftliche Denken in der Industrie gesteigert werden.

Stand jetzt sind die Handstücke aus dem Institutsbestand für die einzelnen Stoffströme entlang des Lebenszyklus einsortiert. 2023 soll das MAssLab offiziell eröffnet und in die Lehre integriert werden.

## Literatur

OECD (2019): Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences. Paris: OECD Publishing.

Statistisches Bundesamt (2021): Materialflüsse in Millionen Tonnen. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Tabellen/material-](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Tabellen/material-energiefluesse.html;jsessionid=DA475C8CCA5E148E4A0884C274791116.live742)

[energiefluesse.html;jsessionid=DA475C8CCA5E148E4A0884C274791116.live742](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Tabellen/material-energiefluesse.html;jsessionid=DA475C8CCA5E148E4A0884C274791116.live742), zuletzt aktualisiert am 26.11.2021, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Statistisches Bundesamt (2022a): Primärenergieverbrauch nach Produktionsbereichen. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/energiefluesse-emissionen/Tabellen/primaerenergieverbrauch.html>, zuletzt aktualisiert am 12.09.2022, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Statistisches Bundesamt (2022b): Treibhausgasemissionen nach Inländerkonzept. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/energiefluesse-emissionen/Tabellen/treibhausgase.html;jsessionid=DA475C8CCA5E148E4A0884C274791116.live7>, zuletzt aktualisiert am 29.09.2022, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

## Kontakt

*Hannah Köhler, M. Sc., Wissenschaftliche Mitarbeiterin*

RWTH Aachen / Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe

Tel.-Nr.: 0241-80-92331

E-Mail: [hannah.koehler@ants.rwth-aachen.de](mailto:hannah.koehler@ants.rwth-aachen.de)

Homepage: <https://www.ants.rwth-aachen.de/go/id/eeby/>





# Die Verwertung organischer Reststoffe zu Futtermischungen für die Larven der Schwarzen Soldatenfliege in einer Insektenbioraffinerie

**Abstract:** Das Recycling von Bioabfällen über Biogas- und Kompostierungsanlagen erfüllt nur zu einem Teil die Kriterien und Ziele der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg und die übergeordneten Strategien von Bund und EU und deren bioökonomischen Ansatz. Zudem erfordern die immer steigenden Abfallmengen sowie Rohstoffknappheit weitere Abfallbehandlungsmethoden, die den bioökonomischen Ansatz erfüllen. Hier setzt die Aufgabenstellung des Projekts „Die Insektenbioraffinerie“ (InBiRa) an, bei dem organische Reststoffe aus Lebensmittelrückläufern, Kantinenabfällen bis hin zu Bioabfällen mit Hilfe der Schwarzen Soldatenfliege in hochwertige Produkte umgewandelt werden sollen. Dazu werden die organischen Reststoffe zu Futtermischungen für die Schwarze Soldatenfliege aufbereitet. Zudem werden das nicht verwertete Restsubstrat und Ausscheidungs- und Häutungsprodukte als weitere Stoffströme für die Evaluierung möglicher Verwertungspfade genutzt und hinsichtlich des Biogasertrags, der Kompostqualität, dem Heizwert und der Düngemittelherstellung untersucht.

## 1 Einleitung

Entlang der Lebensmittelkette entstanden im Jahr 2020 insgesamt etwa 11 Millionen Tonnen an Lebensmittelabfällen. Dabei entfielen 7 % auf den Handel, 17 % auf Gaststätten und Verpflegungsdienstleistungen, 59 % auf Privathaushalte und 2 % auf die Primärproduktion sowie 15 % auf die Verarbeitung und Herstellung. In den Daten sind auch nicht vermeidbare organische Abfälle wie Nuss- und Obstschnitzabfälle, Kaffeesatz, Knochen und Verdorbenes enthalten (destatis, 2023).

Derzeit werden die anfallenden Bioabfälle sowohl in Biogas- als auch in Kompostierungsanlagen einer Verwertung zugeführt. Hierdurch werden Bioabfälle zwar einem Recycling zugeführt, erfüllen mit diesem Verwertungspfad jedoch nur einen Teil der Kriterien und Ziele der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg und der übergeordneten Strategien von Bund und EU und deren bioökonomischen Ansatz. Dieser sieht es vor Rest- und Abfallstoffe wie die entlang der Lebensmittelkette entstanden organischen Abfälle in eine Wertschöpfungskette zu bringen, um daraus Sekundärrohstoffe für industrielle Zwecke herzustellen.

Im Rahmen des Projektes „InBiRa“ wird erstmals eine Insektenbioraffinerie als Pilotanlage aufgebaut, mit der organische Reststoffe aus Lebensmittelrückläufern und Bioabfällen mit Hilfe von Insekten in neue hoch-

wertige Produkte umgewandelt werden sollen. Das hierfür ausgewählte Insekt ist die Schwarze Soldatenfliege „*Hermetia illucens*“. Sie weist eine hohe Futterverwertungseffizienz und kurze Reproduktionszyklen auf und überträgt durch ihre nicht invasive Art keine Krankheiten (madebymade, 2022). Sie ist ein Allesfresser und kann somit Obst- und Gemüsereste, menschliche Ausscheidungen sowie tierische Exkrementen in vergleichsweise kurzer Zeit (gegenüber anderen Insekten) verstoffwechseln bzw. umwandeln (Gold M. et al., 2018 (aus Rozkosny, 1983; Schremmer, 1986); Shishkov, O. et al., 2019), womit sie für die Verwertung organischer Reststoffe bevorzugt eingesetzt werden kann. Ein großer Vorteil für die industrielle Anwendung der Larven besteht unter anderem darin, dass das Fett aus den Insektenlarven eine ähnliche Fettsäurezusammensetzung wie die tropischen Fette Palmöl und Kokosöl aufweist und somit beispielsweise eine Alternative zu vielen Produkten aus der Kosmetikindustrie darstellt (igb fraunhofer, 2022).

Im Rahmen des Projektes werden die organischen Reststoffe (Lebensmittelrückläufer bis hin zu Bioabfällen) am ISWA der Universität Stuttgart so weit aufbereitet bzw. verwertbar gemacht, dass diese den Fliegenlarven als Substrat dienen. Für eine effiziente Verwertung bzw. Umwandlung der organischen Reststoffe durch die Insektenlarven zu hohen Mengen an Larvenbiomasse, soll ein Nährstoffportfolio über verschiedene Futtermischungen erstellt werden. Als Benchmark-Produkt dient klassisches Schweinefutter, das bisher als Substrat zur Larvenfütterung eingesetzt wird. Dazu ist es erforderlich, die organischen Reststoffe zu zerkleinern, zu homogenisieren und ggfs. haltbar zu machen. Zudem übernimmt das ISWA die Evaluierung möglicher Verwertungspfade für das nicht verwertete Futter und die Ausscheidungs- und Häutungsprodukte, welche bei der Larvenentwicklung entstehen. Dieses sogenannte Restsubstrat (Frass) wird hinsichtlich des Biogasertrags, der Kompostierbarkeit inkl. der Kompostqualität, dem Heizwert und der Düngemittelherstellung untersucht. Des Weiteren sind Emissionsmessungen am Bioreaktor der Larvenmast geplant, anhand derer ein Konzept zur Abluftreinigung erstellt wird.

## **2 Methodik**

Die Versuche werden in drei verschiedenen Maßstäben durchgeführt. Im Laborversuch werden zunächst bis zu 0,5 kg an Futtermischung benötigt, im halbertechnischen Maßstab pro Ansatz 10 kg und im weiteren Projektverlauf wird auf eine Menge von 1 - 5 t aufskaliert. Es werden verschiedene Futtermischungen erstellt, welche an die Larven verfüttert (Fütterungen finden bei der *Hermetia Baruth GmbH* statt) und von Projektpartnern hinsichtlich der Larvenentwicklung (Larvenmasse, Überlebensrate, Umsatzrate des Ausgangsmaterials) bewertet werden. Mit dieser Methode werden die Futtermischungen iterativ weiterentwickelt und daraus Futtermischungskonzepte entwickelt. Die geeignetsten Mischungen werden in der Pilotanlage (1 - 5 t) getestet. Der bei der Fütterung entstehende Frass, der aus nicht verwertetem Futter, Exkrementen und Häutungsprodukten besteht, wird auf weitere Verwertungswege hin untersucht. Ein Überblick zur Methodik ist Abbildung 1 zu entnehmen.

### **2.1 Aufbereitung organischer Reststoffe zu Futtermischungen**

#### **2.2.1 Laboruntersuchungen zu den physikalischen Eigenschaften**

Um Kenntnisse über die Eigenschaften und Pumpfähigkeit der Futtermischungen zu gewinnen sowie deren Konsistenz auf die Anforderungen der Larven anzupassen, werden die organischen Reststoffe mit unterschiedlichen Methoden zerkleinert. Außerdem werden aus den zerkleinerten organischen Reststoffen verschiedene Mischungsverhältnisse erzeugt und deren Korngröße, Feuchtegehalt, Dichte, Wasserhalte-

kapazität und Viskosität analysiert. Des Weiteren wird die Zugabe von Zusatzstoffen zur Verbesserung der Konsistenz der Futtermischungen untersucht.

### 2.2.2 Aufbereitung und Mischungsverhältnisse

In einem ersten Schritt werden Backwaren und im Weiteren Backwaren zusammen mit Obst- und Gemüserückläufern charakterisiert, zerkleinert, gemischt und ein Feuchtegehalt von 75 % eingestellt. Dieser Feuchtegehalt gilt für die Larvenmast im Bioreaktor beim Projektpartner als optimal. Mit den Backwaren allein wird das erforderliche Nährwertverhältnis von Kohlenhydraten zu Proteinen (1:1+) (Gold et al., 2020) nicht erreicht. So werden über den Versuchszeitraum iterativ weitere Stoffströme hinzugemischt bis das Nährstoffportfolio für die angestrebte Larvenentwicklung erreicht wird. Ziel ist es, dass neben den Lebensmittelrückläufern und Kantinenabfällen letztlich Biomüll eingesetzt wird. Die hergestellten Mischungen (Dreifachansatz) werden an die Larven der Schwarzen Soldatenfliege verfüttert. Fütterungsversuche finden in der Halbtechnik bei der Hermetia Baruth GmbH und in der Pilotierung beim IGB Fraunhofer statt.

Für die Zerkleinerung werden verschiedene Zerkleinerungsmethoden (Schneidmühle, Häcksler, Hochleistungsmixer, etc.) sowie unterschiedliche Mischungsverhältnisse der einzelnen Stoffströme getestet. Je nach Art der Mischung der verschiedenen Rückläufer werden andere Feuchtegehalte erreicht. Dabei werden verschiedenen Fälle ( $\geq 75$  % Feuchte) betrachtet. Bei allen Futtermischungen werden die Parameter Trockensubstanz (TS), Glühverlust (GV), Rohasche, Gesamtkohlenstoff organisch (TOC), Gesamtstickstoff (TKN) und Phosphorgehalt (P) analysiert. Zudem wird bei der CHN-Analyse (Elementar Vario MAX CHN) der Gehalt an Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Stickstoffelementen in einer Probe gemessen. Die Nährwerte werden bisher rechnerisch über Nährwerttabellen (Angaben vom Projektpartner) ermittelt. Parallel wird eine Methodik zur rechnerischen Ermittlung des Proteingehalts untersucht, ergänzende Analysen zu weiteren Nährwerten wie dem Fettgehalt sind in Planung.

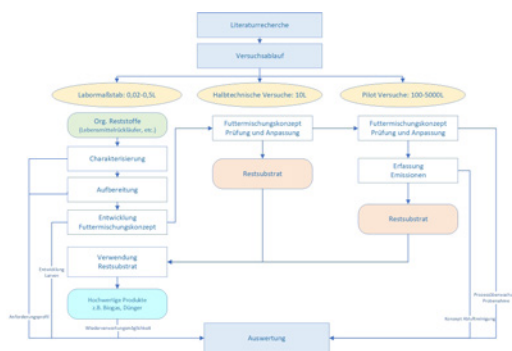


Abbildung 1: Überblick Methodik für die Insektenbioraffinerie.

## 2.2 Untersuchungen zur Verwendung des Restsubstrats (Frass)

Der Frass wird unter anderem auf seinen Biogas- und Methanertrag untersucht. Hierfür wird er unter definierten anaeroben Bedingungen einer Vergärung (Yieldmaster) unterzogen, um Aussagen zur grundsätzlichen Umsetzbarkeit der Biomasse zu Biogas, zu eventuell auftretenden Hemmungen des Prozesses und zur Gasausbeute zu gewinnen. Dazu wird das Restsubstrat mit Faulschlamm aus dem Lehr- und Forschungs-

klärwerk (LFKW) des ISWA angeimpft und mesophil bei 32 – 42 °C über ca. 25 Tage vergärt (nach VDI 4630). Mit Abschluss des Batch-Versuches wird der Biogasertrag sowie der Methan- und CO<sub>2</sub>-Gehalt ermittelt.

## Danksagung

Das Projekt *InBiRa* wird durch die EU und das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg im Rahmen des EFRE-Förderprogramms Bioökonomie – Bioraffinerien zur Gewinnung von Rohstoffen aus Abfall und Abwasser – Bio-Ab-Cycling gefördert.

## Literatur/Quellen

- Gold M.; Tomberlin J. K.; Diener S.; Zurbrügg, C.; Mathys, A. (2018): Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review. *Waste Management* 82: 302 – 318.
- Gold, M.; Cassar, C. M.; Zurbrügg, C.; Kreuzer, M.; Boulos, S.; Diener, S.; Mathys, A. (2020): Biowaste treatment with black soldier fly larvae: Increasing performance through the formulation of biowaste based on protein and carbohydrates. *Waste Management* 102: 319-329.
- igb fraunhofer, 2022. InBiRa - Mit Insekten zur Kreislaufwirtschaft [WWW Dokument]. URL <https://www.igb.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/2022/inbira-mit-insekten-zu-kreislaufwirtschaft.html> (Stand 20.10.22).
- madebymade, 2022. Insektenzüchter Pegau, Deutschland [WWW Dokument]. URL <https://madebymade.eu/> (Stand 20.10.22).
- destatis, 2023. Statistisches Bundesamt [WWW Dokument]. URL <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/lebensmittelabfaelle.html> (Stand 04.01.23).
- Rozkosny, R. (1983): A Biosystematic Study of the European Stratiomyidae (Diptera). Volume 2 – Clitellariinae, Hermediinae, Pachygasterinae and Bibliography, Series Entomologica. Springer Science & Business Media.
- Schremmer, F. (1986): Die polymetabole Larval-Entwicklung der Waffenfiegenart *Hermetia illucens*. Ein Beitrag zur Metamorphose der Stratiomyidae. *Ann. des Naturhistorischen Museums Wien* 88 (89): 405-429.
- Shishkov, O.; Hu, M.; Johnson, C.; Hu, D. L. (2019): Black soldier fly larvae feed by forming a fountain around food. *Journal of the Royal Society, Interface* 16 (151): 20180735

## Kontakt

*Dipl.-Ing. Bettina Krucker, wissenschaftliche Mitarbeiterin*

Universität Stuttgart/ Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA)

Tel.-Nr. 0711/685 636-95

E-Mail: [bettina.krucker@iswa.uni-stuttgart.de](mailto:bettina.krucker@iswa.uni-stuttgart.de)

Homepage: <https://www.iswa.uni-stuttgart.de/>

## Simple (Screening) Does the Trick – Siebklassierung zur Wertstoffanreicherung in Outputs von Restmüllsplittinganlagen

**Abstract:** Innerhalb der gemischten Siedlungsabfälle (Restmüll) in Europa befinden sich wesentliche Wertstoffpotentiale, welche, nicht nur in Anbetracht der EU-Recyclingzielquoten 2025/30, für eine stoffliche Verwertung herangezogen werden sollten. Als wesentlicher Vorschrift zum Recycling kann dabei die mechanische Aufbereitung der Abfälle genannt werden. Derzeit liegen in den Outputs von Restmüllsplittinganlagen in Österreich noch große Anteile an Stör- und Nichtwertstoffen vor. Zur Untersuchung der Abscheidungsneigung eben dieser wurden Siebanalysen mit vier Outputs aus zwei Anlagen durchgeführt. Mithilfe der Siebklassierung bei 125 mm und 60 mm konnten hierbei eine Anreicherung der Wertstoffe sowie Abscheidung von Störstoffen im Überkorn erreicht werden. Anknüpfend wurde mit vergleichsweise einfachen Aufbereitungsmethoden (Siebung) eine Produktion von Vorkonzentraten für das Recycling realisiert. Hierbei zeigt insbesondere die Siebung bei einer Maschenweite von 125 mm Potential. Ferner konnten Korngrößenklassen bestimmter Fraktionen im Restmüll identifiziert werden. Es erfolgte allerdings auch eine wesentliche Reduzierung des Massendurchsatzes, wodurch die Integration in den Anlagen bzw. die Applikabilität noch weiter untersucht werden müssen.

### 1 Einleitung

Nicht nur durch die Einführung konkreter Recyclingziele mit dem Kreislaufwirtschaftspaket der EU, sondern auch aus Gründen der Ressourcenschonung und der damit verbundenen Nutzung von Abfall als Ressource, müssen bisher unbeachtete Ströme für ein/das Recycling untersucht werden. In Österreich befinden sich erhebliche Wertstoffpotentiale im Restmüll, z.B. 10 % Kunststoffe oder 7,5 % Papier (BMK, 2021). Zusätzlich lassen sich stagnierende Erfassungsgrade und Recyclingquoten (Feil et al., 2017; Van Eygen et al., 2018) sowie Sättigungseffekte beim Ausbau der getrennten Sammlung in Europa feststellen (Haupt et al., 2018). Durch das Restmüllsplitting ist es möglich, zusätzliche Stoffströme für das stoffliche Recycling zu gewinnen. Im vorliegenden Beitrag wurden Siebungsversuche mit Outputs verschiedener Restmüllsplittinganlagen hinsichtlich ihrer Neigung zur Siebklassierung, Anreicherung von Wertstoffen und Abscheidung ungewünschter Materialien untersucht. Ziel war hierbei die Untersuchung der An- bzw. Abreicherung bestimmter Materialien und Produktgruppen in verschiedenen Korngrößenklassen.

## 2 Methodik

Für die Untersuchung der Siebklassierung wurden zunächst Probenahmen in zwei Restmüllsplittinganlagen durchgeführt und die Proben im Anschluss einer zweistufigen Siebung unterzogen (125 mm und 60 mm). Im Anschluss erfolgte eine Handsortieranalyse des Mittel- und Überkorns. In Abbildung 1 ist die methodische Vorgehensweise schematisch dargestellt.

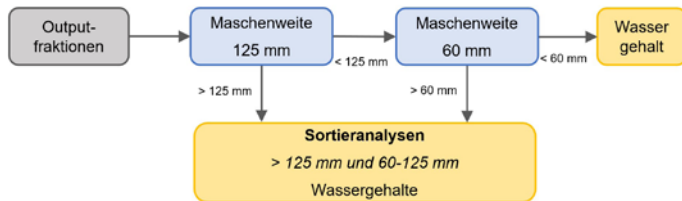


Abbildung 1: Versuchsablauf des zweistufigen Technikumsversuches zur Siebklassierung

### 2.1 Restmüllsplittinganlagen: Aufbereitung und Probenahme

Um die Auswirkungen der Siebklassierung auf die wertstoffhaltigen Outputfraktionen der Splittinganlagen zu untersuchen, wurde zunächst eine Probenahme durchgeführt. In der Anlage 1 werden die Abfälle zerkleinert, gesiebt, störstoffentfrachtet, metallentfernt, windgesichtet und anschließend mittels Nahinfrarot (NIR) in einen Strom für Ersatzbrennstoffe (positiv sortiert auf Kunststoffe ohne PVC und PU – Eject) und einen für die thermische Verwertung (negativ sortiert – Reject) getrennt. Anlage 2 beinhaltet eine Zerkleinerung, Siebung sowie Metallabscheidung und einen ballistischen Separator, der einen dreidimensionalen Hochkalorik- und einen zweidimensionalen Mittelkalorikoutput generiert. In Anlage 2 wird zusätzlich zu Restmüll auch Sperrmüll behandelt. Die Beprobung der Outputs erfolgte jeweils bei Normalbetrieb im fallenden Abfallstrom an den Abwürfen der Förderbänder. Um eine Tageszeitverteilung zu erreichen, wurden viertelstündlich Proben über eine Dauer von 8 Stunden genommen und Stundenmischproben hergestellt.

### 2.2 Technikumsversuche zur Siebklassierung

Die Stundenmischproben der Outputs, Eject und Reject aus Anlage 1 sowie Hoch- und Mittelkalorik aus Anlage 2 wurden in einem zweistufigen Siebungsversuch in drei Korngrößenklassen geteilt. Die Abfälle wurden mittels Vibrationsrinne auf zwei Flachsiebe mit den Maschenweiten 125 mm und 60 mm aufgegeben. Der Siebunterlauf der ersten Stufe (<125 mm) wurde in der zweiten Stufe in die Korngrößen 60-125 mm und <60 mm getrennt. Im Anschluss wurden Grob- und Mittelkorn (>125 mm und 60-125 mm) einer Sortieranalyse unterzogen.

### 2.3 Restmüllsplittinganlagen: Aufbereitung und Probenahme

Mittels Handsortierung wurden das jeweilige Grob- und Mittelkorn in erster Ebene in 12 Fraktionen sortiert. Neben den kunststoffhaltigen Wertstoffen (Kunststofffolien, Kunststoffverpackungen, Nichtverpackungen, PET-Getränkeflaschen, Verbundkunststoffe) wurden auch nicht-kunststoffhaltige Wertstoffe (Papier, Metal-

le, Glas, Textilien) unterschieden. Als Nichtwertstoffe wurden Hygieneartikel, organische und inerte Abfälle, sowie der Feinanteil (<50 mm) deklariert.

### 3 Ergebnisse

In der Abbildung 2, a) bis d) sind die Massenverteilungen ( $m/m_{\text{ges}}$ ) der Sortierfraktionen bzw. des Gesamtinputs in die Siebung auf die einzelnen Korngrößenklassen dargestellt. Über alle Anlagen, Outputs und Fraktionen konnte durch eine Siebung eine Abtrennung von Störstoffen und eine Anreicherung von Wertstoffen im Überkorn realisiert werden. In der Kornklasse >125 mm wurde großteils die Entfernung von Feinanteilen, Hygieneartikeln, Organik und inerten Stoffen erzielt. In der Anlage 1 konnten die Nichtwertstoffe auf einen Massenanteil von 10 % im Eject und 15 % im Reject reduziert werden, in Anlage 2 analog auf 23 % in der Hochkalorik und 8 % in der Mittelkalorik. Hierbei muss erwähnt werden, dass Holz per Definition der Hand-sortiermatrix als Organik gilt. Dadurch resultiert der hohe Nichtwertstoffanteil in der Hochkalorik durch die Mitbehandlung von Sperrmüll in der Anlage 2.

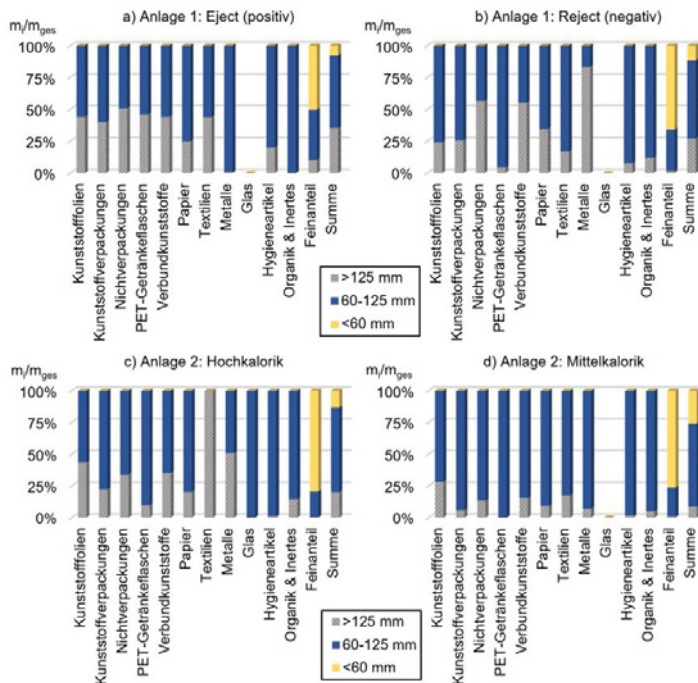


Abbildung 2: Grafische Darstellung der Massenverteilung ( $m/m_{\text{ges}}$ ) der Fraktionen auf die Korngrößenklassen für die untersuchten Outputs der Restmüllsplittingsanlagen. Beispielsweise befinden sich 40 % der Kunststoffverpackungen im Überkorn (>125 mm) bezogen auf die Inputmasse an Kunststoffverpackungen im Eject aus Anlage 1 und 60 % im Mittelkorn (siehe 2a).

Weiters konnte durch die Siebung die Korngrößenverteilung der Fraktionen in den Outputs festgestellt werden. In Anlage 1 erfolgen Verluste in der Positivsortierung vor allem bei Kunststofffolien, Kunststoffverpackungen und PET-Getränkeflaschen <125 mm. In Anlage 2 zeigt sich z.B. nach der ballistischen Separation, dass sowohl in der 2D- (Mittelkalorik) als auch in der 3D-Fraktion (Hochkalorik) 98 % der Hygieneartikel kleiner 125 mm vorliegen.

## 4 Diskussion

Insbesondere mit der Siebung bei 125 mm konnte eine Wertstoffanreicherung sowie Störstoffabscheidung erreicht werden, wodurch sich das Überkorn als Vorkonzentrat für eine stoffliche Verwertung bezeichnen ließe. Der geringere Massendurchsatz des Überkornes ist als negativ zu betrachten, dieser lag bei maximal 35 % des Ejects aus Anlage 1 und bei minimal 8 % der Mittelkalorik aus Anlage 2. Der Siebschnitt von 60 mm resultierte vor allem in einer Feinanteilabscheidung, diese könnte aber zumindest in Anlage 2 durch die Implementierung siebender Paddel im ballistischen Separator erzielt werden. Dennoch verdeutlichte dieser Siebvorgang den erheblichen Anteil an unerwünschten Partikeln <60 mm, welcher zwischen 7 % und 25 % lag. Generell kann eine Erhöhung der Qualität sowie Wertstoffanreicherung in den Outputs durch eine Siebung realisiert werden, aufgrund der Reduzierung des Massenflusses ist der Einsatzbereich jedoch begrenzt. Als wesentliche Erkenntnis kann die Korngrößenverteilung der Fraktionen gewertet werden. So erfolgen vor allem Verluste bei Partikelgrößen <125 mm. Dies ist u.a. zurückzuführen auf Größenverteilungseffekte auf Förderbändern und erlaubt somit eine Verbesserung der Informationslage der Prozesslinien.

## Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Forschungsinitiative *CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft* am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der TU Wien. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Gleichzeitig bedanken wir uns bei unseren Unternehmenspartnern Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoffrecycling Austria AG, Borealis AG, Brantner Österreich GmbH, Lenzing AG, Linz Service GmbH, MM Board and Paper AG, OMV Downstream GmbH, Wien Energie GmbH und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H.

## Literatur/Quellen

- BMK (2021): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2021 (Referenzjahr 2019).
- Feil, A.; Pretz, T.; Jansen, M.; Thoden van Velzen, E. U. (2017): Separate collection of plastic waste, better than technical sorting from municipal solid waste? *Waste Management & Research*, 35: 172–180. <https://doi.org/10.1177/0734242X16654978>
- Haupt, M.; Waser, E.; Würmli, J. C.; Hellweg, S. (2018): Is there an environmentally optimal separate collection rate? *Waste Management*, 77: 220–224. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.050>



Van Eygen, E.; Laner, D.; Fellner, J. (2018): Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in austria. Waste Management, 72: 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.040>

### **Kontakt**

*Dipl. Ing. Anna-Maria Lipp (Projektassistentin)*

Christian Doppler Labor für recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, TU Wien

Tel.-Nr.: +43 1 58801 166156

E-Mail: [anna-maria.lipp@tuwien.ac.at](mailto:anna-maria.lipp@tuwien.ac.at)

Homepage: [www.vt.tuwien.ac.at](http://www.vt.tuwien.ac.at)



## Evaluierung des Abfallvermeidungspotenzials zwischen chirurgischen Einweg- und Mehrweg-Klammernahtinstrumenten

**Abstract:** Im Gesundheitssektor hat die Patient:innensicherheit die oberste Priorität. Der Ressourcenverbrauch hinter den erbrachten Leistungen bekommt erst seit wenigen Jahren intensivere Aufmerksamkeit. Ein relevanter Ort der Abfallentstehung ist der Operationsraum/-bereich. Klammernahtinstrumente kommen in verschiedensten Operationsarten zum Einsatz. Wie in vielen anderen Bereichen auch wurden in den letzten 40 Jahren für Produkte und Instrumente Einweglösungen eingeführt. Vor dem Hintergrund der Ressourcendiskussionen greifen Produktentwickler beim Design vermehrt den Gedanken der Wiederverwendung unter Beibehaltung des Sicherheitsgedankens und der nun bestehenden Funktionalitäten in Neuentwicklungen auf. Diese Arbeit untersucht den Ressourceneinsatz zweier Klammernahtinstrumentensysteme, wovon bei einem das Konzept der Wiederverwendung integriert wurde. In unterschiedlichen Operationsarten zeigen sich Abfallvermeidungspotentiale zwischen 40% und 62%. Beim Total Material Requirement liegen die Vermeidungspotentiale bei mehr als 90%.

### 1 Einleitung

Die mit dem steigenden Ressourcenverbrauch verbundenen Risiken für Umwelt und den Menschen sind umfassend und weitreichend (Gan et al. 2019, Watts et al. 2019, Krausmann et al. 2018, Haas et al. 2020). Innerhalb des Gesundheitswesens ist die Chirurgie als ressourcenintensive Tätigkeit identifiziert, welche große Mengen an Abfällen erzeugt (Minoglou et al. 2017, Rizan et al. 2021, Kane et al. 2018, Wyssusek et al. 2019, Greenhealth 2021, Zygourkakis et al. 2017, Pachauri et al. 2019, MacGain et al. 2014). Medizinisches Einwegmaterial und Einwegartikel tragen erheblich zu diesem Umstand bei und sind damit ein relevanter Nutzer abgebauter Ressourcen (MacNeill et al. 2017, Wormer et al. 2013). In Anbetracht der Tatsache, dass bei vielen chirurgischen Eingriffen Klammernahttechniken zum Einsatz kommen, werden in dieser Studie zwei chirurgische Klammernahtsysteme unterschiedlicher Bauweise hinsichtlich ihres Ressourceneinsatzes analysiert. Ein System besteht gänzlich aus Einwegkomponenten, die nach Einsatz in einer Operation entsorgt werden (Single-Use-System), wohingegen beim Vergleichssystem verschiedene Produktteile als mehrwegfähig konstruiert sind (Multi-Use-System). Einzelne Produktkomponenten werden dreihundertmal wiederverwendet. Im Vergleich beider Systeme werden Abfallvermeidungspotentiale und Ressourceneinsparungspotentiale durch den Einsatz von Mehrwegsystemen berechnet.

## 2 Methodik

Zwei häufig verwendete chirurgische Klammersysteme, das Einwegsystem ECHELON FLEX™ (Single-Use-System) und das Mehrwegsystem Signia™ Stapling Technology von Medtronic (Multi-Use-System), wurden mechanisch in ihre einzelnen Materialkomponenten zerlegt, um die Zusammensetzung jedes Systems zu berechnen. Der Gesamtabfall sowie der Total Material Requirement (TMR) wurden dann für drei verschiedene chirurgische Verfahren berechnet: laparoskopische Sleeve-Gastrektomie, den laparoskopischen Magenbypass und die videoassistierte thorakoskopische (VATS) Lobektomie. Anschließend wurden die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen den beiden Systemen berechnet.

## 3 Ergebnisse

Für jedes betrachtete chirurgische Verfahren führte der Wechsel vom Single- zum Multi-Use-System zu einer Verringerung des Gesamtabfallaufkommens und des TMR pro Verfahren. Die Verringerung der Abfallmenge betrug dabei 40% (Sleeve-Gastrektomie), 70% (Magenbypass) und 62% (VATS-Lobektomie). Die Reduktion beim TMR wurde mit 92 % (Sleeve-Gastrektomie), 96 % (Magenbypass) und 95 % (VATS-Lobektomie) berechnet.

*Tabelle 1: Abfallaufkommen und Abfallvermeidungspotential für Single- und Multi-Use-Klammersnahtsysteme*

OP-Gruppe	Operationsart	Gesamtabfallmasse pro Operation [kg]		Abfallvermeidungspotential im Vergleich [kg]
		Single-Use-System	Multi-Use-System	
Bariatrisch	Sleeve Gastrektomie	0,72 kg	0,43 kg	-0,29 kg
	Magenbypass	1,38 kg	0,41 kg	-0,96 kg
Thorakal	VATS Lobektomie	1,39 kg	0,53 kg	-0,86 kg

*Tabelle 2: Ressourcenbedarf (TMR) und Vermeidungspotential für Single- und Multi-Use-Klammersnahtsysteme*

OP-Gruppe	Operationsart	TMR pro Operation [kg]		TMR-Vermeidungspotential im Vergleich [kg]
		Single-Use-System	Multi-Use-System	
Bariatrisch	Sleeve Gastrectomie	329 kg	27 kg	-303 kg
	Magenbypass	633 kg	25 kg	-608 kg
Thorakal	VATS Lobektomie	633 kg	34 kg	-599 kg

Das Konzept Wiederverwendbarkeit zeigt sich in einer erhöhten Komplexität und einer höheren Masse des Produktes. Ein wesentlicher Einflussfaktor von Mehrwegsystemen ist daher die Umlaufrate, um den Ressourcenbedarf auf mehrere Nutzungszyklen aufteilen zu können. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde gezeigt, dass das Multi-Use-System für alle betrachteten Operationsarten ab dem fünften Einsatz für weniger Abfallaufkommen und Ressourceneinsatz verantwortlich ist.

Der Wechsel von einem Single- zu einem Multi-Use-system bei der Sleeve-Gastrektomie, dem Magenbypass und der VATS-Lobektomie ermöglicht eine Verringerung des gesamten chirurgischen Abfalls und des Ressourcenbedarfs (ausgedrückt als TMR).

## Danksagung

Die Autor:innen bedanken sich bei der Universität für Bodenkultur Wien (Institut für Kreislauf- und Abfallwirtschaft) und dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Weiters bedanken sich die Autor:innen bei Dr Sanjay Purkayastha (St Mary's Hospital), Dr Tom Routledge (Guy's and St Thomas' Hospitals/King's College School of Medicine) und Dr Jasmine Winter Beatty (Imperial College London) für Ihre Unterstützung im Bereich der Operationsarten/-techniken.

Diese Studie wurde von Medtronic finanziell unterstützt. pulswerk GmbH und Coreva Scientific GmbH & Co KG erhielten von Medtronic Beratungshonorare für Arbeiten im Zusammenhang mit diesem Manuskript.

## Literatur/Quellen

- Gan CCR, Banwell N, Pascual RS, Chu C, Wang YW. Hospital climate actions and assessment tools: a scoping review protocol. *BMJ Open*. Dec 29 2019;9(12):e032561. doi:10.1136/bmjopen-2019-032561
- Greenhealth P. Greening the OR. Accessed 28.04.2021,
- Haas W, Krausmann F, Wiedenhofer D, Lauk C, Mayer A. Spaceship earth's odyssey to a circular economy – a century long perspective. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020/12/01/ 2020;163:105076. doi:10.1016/j.resconrec.2020.105076
- Kane GM, Bakker CA, Balkenende AR. Towards design strategies for circular medical products. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018/08/01/ 2018;135:38-47. doi:10.1016/j.resconrec.2017.07.030
- Krausmann F, Lauk C, Haas W, Wiedenhofer D. From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. *Global Environmental Change*. 2018/09/01/ 2018;52:131-140. doi:10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003
- MacNeill AJ, Lillywhite R, Brown CJ. The impact of surgery on global climate: a carbon footprinting study of operating theatres in three health systems. *The Lancet Planetary Health*. 2017/12/01/2017;1(9):e381-e388. doi:10.1016/S2542-5196(17)30162-6
- McGain F, Naylor C. Environmental sustainability in hospitals - a systematic review and research agenda. *J Health Serv Res Policy*. Oct 2014;19(4):245-52. doi:10.1177/1355819614534836
- Minoglou M, Gerassimidou S, Komilis D. Healthcare Waste Generation Worldwide and Its Dependence on Socio-Economic and Environmental Factors. *Sustainability*. 2017;9(2):220.
- Pachauri A, Shah P, Carney Almroth B, Sevilla N, Narasimhan M. Safe and sustainable waste management of self care products. *BMJ*. 04/01 2019;365:l1298. doi:10.1136/bmj.l1298
- Rizan C, Bhutta MF, Reed M, Lillywhite R. The carbon footprint of waste streams in a UK hospital. *Journal of Cleaner Production*. 2021/03/01/ 2021;286:125446. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125446
- Watts N, Amann M, Arnell N, et al. The 2019 report of The Lancet Countdown on health and climate change: ensuring that the health of a child born today is not defined by a changing climate. *Lancet*. Nov 16 2019;394(10211):1836-1878. doi:10.1016/S0140-6736(19)32596-6

Wormer BA, Augenstein VA, Carpenter CL, et al. The Green Operating Room: Simple Changes to Reduce Cost and Our Carbon Footprint. *The American Surgeon*. 2013;79(7):666-671. doi:10.1177/000313481307900708

Wyssusek KH, Keys MT, van Zundert AAJ. Operating room greening initiatives - the old, the new, and the way forward: A narrative review. *Waste Manag Res*. Jan 2019;37(1):3-19. doi:10.1177/0734242X18793937

Zygourakis CC, Yoon S, Valencia V, et al. Operating room waste: disposable supply utilization in neurosurgical procedures. *J Neurosurg*. Feb 2017;126(2):620-625. doi:10.3171/2016.2.Jns152442

## **Kontakt**

*Dipl.Ing., Markus Meissner, PhD Student*

Universität für Bodenkultur Wien / Österreichisches Ökologie-Institut / pulswerk GmbH

Tel.-Nr. + 43 6991 523 61 00

E-Mail: meissner@ecology.at

Homepage: www.ecology.at

## **CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale durch die Implementierung einer Mehrweg- und Kaskadenwirtschaft am Umwelt-Campus Birkenfeld**

**Abstract:** Das 2021 gestartete Forschungsprojekt „Mehrweg- und Kaskadenwirtschaft am Umwelt-Campus Birkenfeld der Hochschule Trier“ verfolgt das Ziel der Ressourcenschonung im Sinne der digitalisierten Kreislaufwirtschaft. Durch die Einführung eines Mehrwegsystems für Speisen to-go in der Mensa sowie durch den Aufbau einer Möbelbörse sollen messbare Abfallvermeidungseffekte erzielt werden. Mit dem Angebot der Möbelbörse am Wohnort Umwelt-Campus wird ein substanzieller Beitrag zur Reduktion des Sperrabfalls aus den Studierendenwohnheimen geleistet. Die Zirkularität der Ausleihpraxis und der Lebensdauer von Mehrwegbehältern und Möbeln im Detail zu untersuchen, wird durch die Digitalisierung und Nutzung der eigenen App IntakeDAV (DAV= Digitalisierte Abfallvermeidung) ermöglicht. Die Berechnung des Carbon-Footprint des eingesetzten Mehrwegbehälters liefert zudem Informationen über den Einfluss der Lebensdauer und die Anzahl der Nutzungszyklen bis zur ökologischen Vorteilhaftigkeit des Mehrwegbehälters.

### **1 Mehrweg- und Kaskadenwirtschaft am Umwelt-Campus Birkenfeld**

Die Studierendenwohnheime des Umwelt-Campus liegen auf dem Campusgelände in direkter Nachbarschaft zu den Gebäuden der Hochschule. Insgesamt acht Wohnheime bieten Platz für 499 Studierende. 161 Zimmer der Einzelapartments, Zweier- oder Vierer-WGs sind bei Einzug bereits möbliert, 338 Zimmer hingegen sind unmöbliert. Für Wohnheime übliche Mietzeiten von nur wenigen Monaten bis hin zu ein paar Jahren führen zu einer hohen Fluktuation und vielen Wohnungswechseln am Umwelt-Campus mit etwa 240-250 Ein- und Auszügen pro Jahr. Insbesondere durch die Internationalisierung der Hochschule steigt der Wohnungs- und Möblierungsbedarf für Gaststudierende aus dem Ausland, die zumeist nur ein Semester am Umwelt-Campus verbringen. Zu den Stoßzeiten der Ein- und Auszüge, die zu Beginn und Ende eines jeden Semesters liegen, fallen folglich große Mengen Sperrabfall an den Wohnheimen an.

Der zunehmende Wohlstand sowie die Schnelllebigkeit in einer globalisierten Welt lassen die zeitsparenden und bequemen Angebote für eine Unterwegsverpflegung, dem sogenannten Takeaway, in die Höhe schnellen. So betrug bereits im Jahr 2017 in Deutschland der Verpackungsabfall allein durch Menü- und Snackboxen knapp 120.000 t (NABU, 2018). Einwegbehälter in dem steigenden Angebot für Speisen to-go durch Mehrwegbehälter zu ersetzen liegt daher nahe und erfüllt die oberste Priorität der Abfallhierarchie.

Vor dem Hintergrund der beschlossenen Mehrwegangebotspflicht zum 01.01.2023 sowie zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft, u. a. im Hinblick auf die Sperrabfallmengen an den Studierendenwohnheimen hat der Fachbereich Umweltwirtschaft/Umweltrecht des Umwelt-Campus Birkenfeld (UCB) in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Informatik des Hauptcampus der Hochschule Trier in einem Forschungsvorhaben zur Implementierung eines Mehrweg- und Kaskadensystems für Speisen und Möbel die App IntakeDAV entwickelt, die eine pfandlose systemische Steuerung des Ausleihprozesses ermöglicht.

Die Daten einer durchgeführten Carbon-Footprint-Analyse des ausgewählten Mehrwegbehälters aus Bio-PP und einem Holzfaseranteil werden einem Einwegbehälter aus dem nachwachsenden Rohstoff Zuckerrohr-Bagasse gegenübergestellt. Die Berechnung des Carbon-Footprint zeigt den Einfluss der Lebensdauer und die Anzahl der Nutzungszyklen bis zur ökologischen Vorteilhaftigkeit des Mehrwegbehälters gegenüber dem Einwegbehälter. Die Integration dieser Daten in die App ermöglicht die Darstellung der Zirkularität jedes eingesetzten Mehrwegbehälters und liefert Informationen über den ökologischen „Break-Even“ gegenüber der Einwegalternative.

Die hohe Fluktuation sowie der große Anteil unmöblerter Zimmer in den Studierendenwohnheimen bieten Potenzial zur Wiederverwendung der studentischen Möbel. Durch die Errichtung einer physischen Möbelbörse können die bei den Auszügen entsorgten Möbel zwischengelagert und an neue Studierenden bei Einzug weitergegeben werden. Aufgrund der Gegebenheiten in Studierendenwohnheimen (kurze Mietdauer, kleine Zimmer) eignet sich hier insbesondere ein Ausleihsystem, sodass die Möbel möglichst lange in einem Kaskadensystem am Umwelt-Campus wiederverwendet, bevor sie anschließend über den Sperrabfall entsorgt werden. Durch eine Verknüpfung der physischen Möbelbörse mit der App IntakeDAV und einer Digitalisierung des Ausleihprozesses können zukünftig so Informationen über die Zirkularität und Lebensdauer der Möbel gewonnen werden. Das Ziel ist auch hier die ökologische Vorteilhaftigkeit des Leihsystems im Vergleich zur Entsorgung durch die Berechnung der Abfall- und CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenziale darzustellen. Zurzeit befindet sich die Möbelbörse in einem rein physischen Betrieb. Die Annahmen, Ausleihen und Rückgaben werden in Papierform dokumentiert und abgelegt.

## **2 Methodik**

### **2.1 Product-Carbon-Footprint des Mehrwegbehälters**

Der Einsatz von Rohstoffen sowie deren Verarbeitung hin zu einem Produkt ist stets mit Umweltauswirkungen verbunden (vgl. Frischknecht, 2020). Zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen des in der Mensa zum Einsatz kommenden Mehrwegbehälters bedient sich die Analyse des Software Programms Umberto LCA+. Der Untersuchungsrahmen umfasst die Vorkette der Rohstoffe, die Produktion, die Distribution der Ware nach Birkenfeld, die Nutzungsphase sowie die Nachnutzung. Als funktionelle Einheit (fE) wird definiert: 1 fE = 100 Essensausgaben in einer Takeaway-Verpackung.

Das vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) entwickelte Schadensmodell, IPCC 2013, wird zur Berechnung herangezogen und beschreibt die Umweltauswirkungen in kg/ CO<sub>2</sub>eq je fE.

Die Berechnung des Product-Carbon-Footprint basiert auf Angaben des Herstellers Greenbox, die dieser in Zusammenhang mit dem verwendeten Material sowie den Produktionsprozessen machte und welche die



Basis der Modellierung bilden. Da der Hersteller keine Primärdaten für den Produktionsprozess erhoben hat, bedient sich die Berechnung der vorgegebenen Datensätze der ecoinvent Datenbank 3.6.

Der Mehrwegbehälter wird aus einem Bio-Compound Granulat (58 % Anteil am Gesamtbehälter) in einem Spritzgussverfahren hergestellt. Dieses beinhaltet ein Bio-Polymer, hergestellt aus pflanzlichen Altspeiseölen, dem Additive hinzugemischt werden (2 % Anteil am gesamten Behälter). Dieser zweiprozentige Anteil enthält zum einen Farbpigmente sowie ein Additiv zur Einbindung der Holzfaser in die Polymermatrix. Aufgrund des geringen Anteils der Additive am Gesamtprodukt kann das Abschneidekriterium der Masse angesetzt werden, die Additive finden demzufolge als geringfügiger Input keine Berücksichtigung (vgl. Klöpffer/Grahl, 2009). Analog erfolgt die Produktion des Deckels aus PP in einem Spritzgussverfahren. Weiterhin besteht der Behälter zu 40 % aus einer Holzfaser aus Fichtenholz, resultierend aus Abfallströmen von Sägewerken, welche andernfalls der energetischen Verwertung zugeführt würden. In einem händischen Verpackungsprozess werden Deckel und Behälter zusammengeführt und in einer PP-Folie sowie einer Verpackungseinheit von 60 Stück in einer Kartonage verpackt. Die Distribution erfolgt mit einem 3,5–40 t LKW über eine gemittelte Wegstrecke von der Produktionsstätte in Bremen nach Birkenfeld von 500 km. Innerhalb der Nutzungsphase entstehen aufgrund des Spülprozesses (Wasser, Spülmittel, Strombedarf für Spülmaschine) Umweltauswirkungen, die ebenfalls in die Berechnung des Product-Carbon-Footprint einfließen. Die End-of-Life-Phase integriert die Umweltauswirkungen aufgrund der Entsorgung des Mehrwegbehälters über den Restmüll und folglich über eine Müllverbrennungsanlage. Eine Sensitivitätsanalyse liefert zudem Erkenntnisse über die Klimarelevanz der regenerativen Energieversorgung innerhalb der Nutzungsphase sowie des Einflusses der End-of-Life Behandlung in einem Open-Loop Recycling.

## 2.2 Prinzip der Möbelbörse

Alle Möbelstücke, die von den Studierenden in der Möbelbörse abgegeben werden, werden registriert und nummeriert. Anschließend können diese an neue Studierende ausgeliehen werden. Die Dauer der Ausleihe ist dabei unbegrenzt und kann von wenigen Wochen bis hin zu mehreren Jahren, über die gesamte Dauer des Studiums gehen. Anhand der Nummerierung können die Möbelstücke bei der Rückgabe wieder identifiziert werden.

Bei der Registrierung der Möbelstücke werden die Merkmale (Art, Material, etc.) vermerkt und das Gewicht geschätzt, um so den vermiedenen Sperrabfall berechnen zu können. Bei den Möbeln handelt es sich größtenteils um Schränke, Regale, Tische und Stühle. Gängige Materialien sind Holz, Kunststoff, Textilien und unterschiedliche Materialkombinationen. Die Sperrabfälle im Landkreis Birkenfeld werden aufgeteilt in Holz- und Restsperrabfälle unterschiedlich verwertet. Holzsperrabfälle werden aufbereitet und einer energetischen Verwertung in einem nahegelegenen Biomasseheizkraftwerk zugeführt. Restsperrabfälle werden ohne weitere Aufbereitung in einer MVA verbrannt (Ifas, 2016). Die Verbrennung von Abfall in einer MVA ist CO<sub>2</sub>-intensiv. 2018 wurden in deutschen Müllverbrennungsanlagen ca. 24 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, durchschnittlich 0,9 t pro Tonne Abfall freigesetzt. Der Anteil des CO<sub>2</sub> fossilen Ursprungs lag dabei bei 55 % (Warringa, 2021). Diese Daten können zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale der Möbelbörse herangezogen werden.

### 3 CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale

#### 3.1 Einsparpotenziale durch den Einsatz von Mehrweg

Die Berechnung des Product-Carbon-Footprint für den Mehrwegbehälter ergab einen Wert von 3,44 kg/CO<sub>2</sub>eq je fE (Mich, 2022). Der Einwegbehälter aus dem nachwachsenden Rohstoff Zuckerrohr-Bagasse wies hingegen einen Wert von 9,95 kg/CO<sub>2</sub>eq je fE auf, das Einsparpotenzial des Mehrwegbehälters liegt bei einer 100-fachen Nutzungen demnach bei 6,51 kg/CO<sub>2</sub>eq gegenüber einem Verbrauch von 100 Einwegbehältern (ebd.). Der ökologische Break-Even im Vergleich zur Einwegvariante wird mit der siebenten Nutzung des Mehrwegbehälters erreicht. Die Integration dieser Werte in die entwickelte App IntakeDAV ermöglicht die Darstellung der Zirkularität jedes Mehrwegbehälters und dient als Monitoring des eingesetzten Mehrwegsystems. Das Monitoring wird 2023 in der Mensa am Umwelt-Campus Birkenfeld gestartet und soll die wachsende Kreislaufwirtschaft (Wertstoffaufkommen, Mehrwegsysteme), Studierenden, Mitarbeitenden und Besuchergruppen motivierend und live vor Augen führen. Abbildung 1 zeigt das Dashboard innerhalb der entwickelten App und stellt die Zirkularität der Mehrwegbehälter dar.

Abbildung 1: Dashboard Zirkularität Mehrwegbehälter

Mensa UCB					
Eingesparte Einwegbehälter bisher	Kompensation initiale CO <sub>2</sub> e	Ausleihzyklen je Behälter für CO <sub>2</sub> e Benefit	Gesamtzahl Mehrwegbehälter im System	Anzahl individuelle Ausleihende	Aktuell ausgeliehene Mehrwegbehälter
<b>2340</b>	<b>100%</b> ⇌	<b>10</b> ⇌	<b>221</b>	<b>229</b>	<b>163</b> ≈
Ausgeliehen Heute	Zurückgegeben Heute	Rückgabedatum überschritten	Defekt-meldungen	Verlust-meldungen	Verlängerung der Ausleihdauer
<b>63</b>	<b>65</b>	<b>33</b> >	<b>0</b> >	<b>0</b> >	<b>0</b>
Ausgeliehen diese Woche	Zurückgegeben diese Woche	Ausgeliehen diesen Monat	Zurückgegeben diesen Monat	Ausgeliehen Insgesamt	Zurückgegeben Insgesamt
<b>160</b>	<b>177</b>	<b>1044</b>	<b>1032</b>	<b>2503</b>	<b>2340</b>

Quelle: Hartard, Rock (2022)

Den größten Impact auf den Product-Carbon-Footprint weist der Spülprozess in der Nutzungsphase des Mehrwegbehälters auf. In einer Sensitivitätsanalyse zeigte sich, dass der ermittelte CO<sub>2</sub>-Wert auf 0,94 kg/CO<sub>2</sub>eq je fE reduziert werden konnte, sofern für den Betrieb der Industriespülmaschine zertifizierter Ökostrom aus erneuerbaren Energien zum Einsatz kommt (ebd.). Das Einsparpotenzial kann demzufolge auf 9,01 kg/CO<sub>2</sub>eq je fE erhöht werden. Bei Skalierung dieser Werte auf den durchschnittlichen Verkauf von 2.000 Speisen zum Mitnehmen pro Jahr in der Mensa ergibt sich ein Einsparpotenzial von 180,2 kg/CO<sub>2</sub>eq.

Berücksichtigt man in der End-of-Life Phase die Kreislaufführung des Mehrwegbehälters in einem offenen Kreislauf anstelle einer Entsorgung über eine MVA, ergibt sich unter Anwendung der Avoided-Burden-Methode 50/50 je fE ein Wert von 3,41 kg/CO<sub>2</sub>eq, das Einsparpotenzial gegenüber der Einwegvariante beträgt demnach 6,54 kg/CO<sub>2</sub>eq (Mich, 2022).

### 3.2 Einsparpotenziale Möbelbörse

In den ersten sieben Monaten des physischen Betriebes in der Möbelbörse konnten bereits ca. 130 Möbel angenommen und etwa 115 Möbel wieder ausgeliehen werden. Das geschätzte Gesamtgewicht aller Möbel und folglich der vermiedenen Menge Sperrabfall beträgt ca. 1700 kg. Unter der Annahme, dass der gesamte Sperrabfall in einer MVA verbrannt wird, entspricht dies einer CO<sub>2</sub>-Einsparung von ca. 840 kg. Zukünftig sollen weitere Berechnungen unter der Berücksichtigung der unterschiedlichen Materialien der Möbel und folglich der unterschiedlichen Verwertungswege getätigt werden. Zudem wird die Etablierung eines versteigten Repair Workshops am Umwelt-Campus vorangetrieben, welcher u. a. die Aufwertung gebrauchter Möbelstücke einschließt.

### Danksagung

Das Projekt „Mehrweg- und Kaskadenwirtschaft am Umwelt-Campus Birkenfeld der Hochschule Trier“ wird durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz gefördert.

### Literatur/Quellen

- Frischknecht, R. (2020): Lehrbuch der Ökobilanzierung, Springer Spektrum
- Hartard, Susanne; Rock, Georg (2022): IntakeDAV for Mensa-to-go reusable tableware and digital platform for furniture exchange, Vortrag Kreislaufwirtschaftskonferenz Umwelt-Campus Birkenfeld, 26.10.2022
- IfaS (2016): Abfallwirtschaftskonzept des Nationalparklandkreises Birkenfeld 2015-2022, in: Abfallbetriebe des Nationalparklandkreises Birkenfeld, unter [https://www.egb-bir.de/fileadmin/pdf-downloads/Abfallwirtschaftskonzept\\_Nationalparklandkreis\\_Birkenfeld.pdf](https://www.egb-bir.de/fileadmin/pdf-downloads/Abfallwirtschaftskonzept_Nationalparklandkreis_Birkenfeld.pdf) (Zugriff: 09.01.2023)
- Klöpffer, W.; Grahl, B.(2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf, 1. Auflage, WILEY-CH
- Mich, Anne (2022): Herausforderungen der Implementierung eines nachhaltigen Mehrwegsystems für Speisen-to-go.(Masterthesis an der Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld, unveröffentlicht)
- NABU (2018): Abfallaufkommen durch Einweggeschirr und To-Go-Verpackungen nach Art in Deutschland im Jahr 2017, Hg. v. Statista, in: Statista, 01.10.2018, unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1013433/umfrage/abfallaufkommen-durch-einweggeschirr-nach-art-in-deutschland/> (Zugriff: 08.04.22)
- Warringa, G. (2021): Waste Incineration under the EU ETS – An assessment of climate benefits, Hg. v. CE Delft, in Zero Waste Europe (07.10.2021), unter [https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2021/10/ZWE\\_Delft\\_Oct21\\_Waste\\_Incineration\\_EUETS\\_Study.pdf](https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/2021/10/ZWE_Delft_Oct21_Waste_Incineration_EUETS_Study.pdf) (Zugriff: 09.01.2023)

## **Kontakt**

*M.A., Anne Mich, wissenschaftliche Mitarbeiterin; M.A., Klara Theobald, wissenschaftliche Mitarbeiterin*

Prof. Dr.-Ing. Susanne Hartard, Lehr-/Forschungsgebiet Industrial Ecology

Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld

Tel.-Nr. +49 6782 17-1513

E-Mail: [a.mich@umwelt-campus.de](mailto:a.mich@umwelt-campus.de); [k.theobald@umwelt-campus.de](mailto:k.theobald@umwelt-campus.de); [s.hartard@umwelt-campus.de](mailto:s.hartard@umwelt-campus.de)

Homepage: [www.umwelt-campus.de](http://www.umwelt-campus.de)

## Glasrückgewinnung aus Rost- und Bettaschen aus der Müllverbrennung

**Abstract:** Im Restmüll entsorgtes Verpackungsglas gelangt in Österreich zumeist über Müllverbrennungsanlagen in die Müllverbrennungaschen und wird somit zu großen Teilen deponiert. Das Glas geht dadurch für das Recycling verloren. Eine Abtrennung von Glas aus den Aschen ist jedoch technisch möglich. Insbesondere Bettaschen aus der Wirbelschicht enthalten große Mengen an Glas. Im Zuge eines Aufbereitungsversuchs wurden drei Rostaschen und drei Bettaschen aufbereitet. Aus den aufbereiteten Aschefraktionen 8-35 mm wurde Glas mittels sensorbasiertem Glasabscheider abgetrennt und dessen Menge bestimmt. Die Glasfraktionen aus den Rostaschen wurden aufgrund zu geringer Menge und Qualität nicht weiter betrachtet, während jene aus den Bettaschen händisch sortiert wurden. Dabei wurde ermittelt, wie viele Störstoffe in den abgeschiedenen Glasfraktionen vorliegen, welcher Glasanteil vom sensorbasierten Sortierer nicht erfasst wurde und wie viel Glas in den Aschefraktionen 0-8 mm vorliegt. Aus diesen Mengen konnte das gesamte Glaspotential der drei Bettaschen errechnet werden, welches 41%, 49% bzw. 65% beträgt.

### 1 Einleitung

In gemischt gesammelten Siedlungsabfällen aus Österreich finden sich etwa 4% bzw. 57.000 Tonnen Glasverpackungen (BMK, 2022). Gemeinsam mit dem Restmüll wird dieses Glas überwiegend in Müllverbrennungsanlagen (MVAs) eingebracht, wo es nach der Verbrennung in der Asche aufkonzentriert zurückbleibt. Die MVA-Aschen – und somit auch das enthaltene Glas – werden in Österreich nach einer Aufbereitung zur Abtrennung von Metallen weitgehend deponiert, obwohl insbesondere in Bettaschen aus der Wirbelschichtfeuerung große Glasmengen enthalten sind (Blasenbauer et al., 2022). Im Gegensatz zur Rostfeuerung liegt das Glas in den Bettaschen zudem weitgehend unverändert vor, da sich – im Gegensatz zu Rostaschen – kaum Schmelzagglomerate mit anderen Aschebestandteilen bilden (Mühl et al., 2022). Eine maschinelle Glasabtrennung aus MVA Aschen ist mittels sensorbasierten Sortiermaschinen technisch möglich (Makari, 2014)

Um die in den MVA-Aschen enthaltenen und technisch abtrennbaren Glasmengen zu ermitteln, wurde aus sechs aufbereiteten MVA-Aschefraktionen Glas abgetrennt und dessen Menge erhoben. Für die aufbereiteten Bettaschen wurde auch das gesamte Glaspotential sowie die Glasqualität bestimmt.

## 2 Materialien und Methodik

### 2.1 Verwendete Materialien

Für die Untersuchungen wurden drei Rostaschen und drei Bettaschen aus unterschiedlichen MVAs verwendet. Je MVA-Asche wurden 100-150 t im industriellen Maßstab im Nassverfahren (Setzmaschine) aufbereitet. Anschließend wurden die erhaltenen Bettascheefraktionen jeweils in die Korngrößen 0-8 und 8-35 mm gesiebt und von Metallen befreit (Mühl et al., 2022). Teilmengen der aufbereiteten Bettascheefraktionen 8-35 mm wurden nach einer zusätzlichen Metallabtrennung einer sensorbasierten Glasabscheidung im Technikumsmaßstab unterzogen.

### 2.2 Durchgeführte Untersuchungen

Die Outputs aus der Glasabscheidung – Glas- und Mineralikfraktionen 8-35 mm – wurden verwogen. Die erhaltenen Glasfraktionen aus den aufbereiteten Bettaschen wurden mittels händischer Sortierung auf ihre Zusammensetzung untersucht, wobei als Störstoffe Keramik, Steine und Porzellan (KSP) und Metalle unterschieden wurden. Die Sortierung erfolgte nach optischer Beurteilung nur für Partikel >4 mm. Auch aus den Mineralikfraktionen 8-35 mm der Bettaschen, welche nach der Glasabscheidung zurückblieben, sowie aus den übrigen aufbereiteten Bettaschen 0-8 mm wurde manuell Glas >4 mm aussortiert, um den Glasgehalt dieser Fraktionen zu ermitteln. Somit konnte das gesamte Glaspotential in den aufbereiteten Bettaschen berechnet werden, wobei folgende Glasanteile berücksichtigt wurden:

- Glasanteil in Glasfraktion 8-35 mm nach sensorbasierter Glasabscheidung (abzüglich Störstoffe)
- Glasanteil in Mineralikfraktion 8-35 mm nach sensorbasierter Glasabscheidung (nicht vom Sortierer erfasst Glas)
- Glasanteil aus Bettasche 0-8 mm (maschinelle Glasabscheidung wurde nicht durchgeführt, händische Sortierung für Korngröße >4 mm)

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über die durchgeführten Untersuchungsschritte.

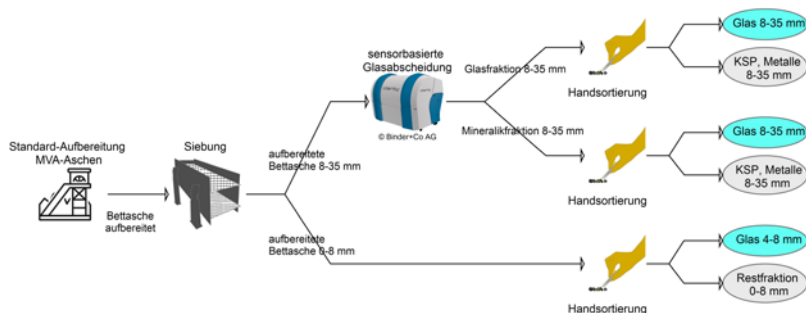


Abbildung 1: Durchgeführte Schritte zur Bestimmung des Glaspotentials; KSP: Keramik, Steine, Porzellan

### 3 Ergebnisse

Sämtliche Ergebnisse werden für die einzelnen Bettaschen A, B, und C sowie für die Rostaschen X, Y, und Z in dieser Reihenfolge dargestellt.

#### 3.1 Ergebnisse der sensorbasierten Glasabscheidung

Bei der sensorbasierten Glasabscheidung der Rostaschen wurden 5%, 11% und 26% der in den Sortierer aufgegebenen Rostaschen 8-35 mm als Glasfraktion abgetrennt. Bei den Bettaschen lag der Anteil der Glasfraktionen mit 59%, 64% und 73% der aufgegebenen Bettaschen deutlich höher.

#### 3.2 Ergebnisse der Handsortierungen

Die Glasfraktionen 8-35 mm aus den drei Bettaschen bestehen zu 14%, 9% bzw. 2% aus Störstoffen in Form von Metallen und KSP. Diese Ergebnisse halten die Vorgaben für eine Verwertung der Glasfraktion in der Behälterglasindustrie nicht ein, weshalb für diesen Verwertungspfad eine zusätzliche Nachreinigung der Glasfraktion erforderlich wäre (Friedrich et al., 2020).

Ein Teil des Glases in den aufbereiteten Bettaschen 8-35 mm wurde nicht vom sensorbasierten Sortierer erfasst und mit den Mineralikfraktionen 8-35 mm ausgetragen. Glas >4 mm macht dadurch 14%, 8% bzw. 14% der jeweiligen Mineralikfraktionen 8-35 mm aus.

Die aufbereiteten Bettascheffraktionen 0-8 mm, welche keiner Glasabscheidung unterzogen wurden, bestehen zu 30%, 31% bzw. 42% aus Glas >4 mm. Die Rostascheffraktionen 0-8 mm bestehen zu 5%, 10% und 18% aus Glas >4 mm.

#### 3.3 Glaspotential der Bettaschen

Aus den erhaltenen Mengenverhältnissen der Siebung und der Glasabscheidung (Abschnitt 3.1) sowie den Ergebnissen aus den Handsortierungen (Abschnitt 3.2) kann für die drei Bettaschen das Glaspotential >4 mm in den gesamten aufbereiteten Bettaschen 0-35 mm errechnet werden. Dieses Glaspotential >4 mm beläuft sich auf 41%, 49% bzw. 65% der gesamten aufbereiteten Bettaschen 0-35 mm.

Das Glaspotential der Rostaschen wurde aufgrund der niedrigen Mengen und Qualitäten der bei der Glasabscheidung erhaltenen Glasfraktionen 8-35 mm nicht ermittelt. Aus dem geringen Anteil an Glas in der aufbereiteten Rostascheffraktion 0-8 mm und der schlechten Qualität der abgeschiedenen Glasfraktionen 8-35 mm kann jedoch geschlossen werden, dass das Glaspotential aufbereiteter Rostaschen deutlich unter jenem der aufbereiteten Bettaschen liegt (Mühl et al., 2022).

## 4 Fazit und Schlussfolgerungen

Die Rückgewinnung von Wertstoffen aus MVA-Aschen kann dazu beitragen, Kreisläufe zu schließen. Insbesondere in Wirbelschicht-Bettaschen macht Glas einen großen Anteil aus. Eine maschinelle Abtrennung des Glases ist technisch möglich und lieferte im Falle der betrachteten Bettaschen auch gute Ergebnisse. Die abgetrennten Glasfraktionen lagen in einer Reinheit von über 85% vor. Für einen Einsatz in der Verpackungsglasindustrie werden jedoch sehr geringe Störstoffanteile in der Glasfraktion gefordert. Metalle, KSP, aber auch Spezialgläser (Bleiglas, hitzebeständiges Glas) können in der Behälterglaserzeugung zu Problemen führen. Zusätzliche Untersuchungen zur erzielbaren Glasqualität durch weitergehende Glas-aufbereitung können Aufschluss darüber geben, ob die Qualitätsvorgaben der Verpackungsglasindustrie erreicht werden können.

## Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Forschungsinitiative *CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft* am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der TU Wien. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Weiters bedanken wir uns sehr herzlich für die finanzielle und inhaltliche Unterstützung durch unsere Unternehmenspartner, in alphabetischer Reihenfolge: Brantner Österreich GmbH, Linz Service GmbH, Wien Energie GmbH, und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H. Dank gilt auch der Firma Binder+Co AG für ihre Unterstützung bei der Versuchsdurchführung.

## Literatur / Quellen

- Blasenbauer, D., Huber, F., Mühl, J., Fellner, J., Lederer, J., 2022 (submitted 2022). Comparing the quantity and quality of glass, metals, and minerals present in waste incineration bottom ashes from a fluidized bed and a grate incinerator. *Waste Management*.
- BMK, 2022. Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2022: Teil 1; Entwurfsfassung zur Konsultation. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien.
- Friedrich, K., Holzschuster, S., Fritz, T., Pomberger, R., Aldrian, A., 2020. Benchmark Analysis for Recycled Glass in Austrian Waste Management. *Detritus*, 87–98. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.14038>.
- Makari, C., 2014. Optical Sorting for the Recovery of Glass from WIP Slags: – Pilot Plant in Bratislava –, in: Thomé-Kozmiensky, K.J., Thiel, S. (Eds.), *Waste management*. TK-Verl. Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, pp. 345–354.
- Mühl, J., Feher, F., Skutan, S., Stockinger, G., Lederer, J., 2022. Rost- oder Wirbelschichtfeuerung bei Abfallverbrennungsanlagen: Was ist aus Sicht der Kreislaufwirtschaft von MVA-Aschen zu bevorzugen?, in: Thiel, S., Thomé-Kozmiensky, E., Senk, D.G., Wotruba, H., Antrekowitsch, H., Pomberger, R. (Eds.), *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 9: – Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –*. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Nietwerder, pp. 228–245.



**Kontakt**

*DI Julia Mühl, wissenschaftliche Mitarbeiterin*

CD Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, TU Wien

Getreidemarkt 9/166.1

A-1060 Wien

E-Mail: [julia.muehl@tuwien.ac.at](mailto:julia.muehl@tuwien.ac.at)

Homepage: [https://www.vt.tuwien.ac.at/mechanische\\_verfahrenstechnik\\_und\\_luftreinhaltechnik/cd\\_labor\\_kreislaufwirtschaft/](https://www.vt.tuwien.ac.at/mechanische_verfahrenstechnik_und_luftreinhaltechnik/cd_labor_kreislaufwirtschaft/)



# Optimierte Datenerfassung an einem Photovoltaik-Modul-Prüfstand durch den Einsatz von Kondensatoren als variable Last

**Abstract:** Um den Klimawandel zu bremsen, ist es notwendig Treibhausgas-Emissionen einzusparen. Dadurch erhalten erneuerbare Energien mehr Aufmerksamkeit. Die realistischste Option für Eigenheimbesitzer ist die Nutzung einer Photovoltaikanlage. Allerdings stellt sich die Frage, welche Leistung ein Photovoltaikmodul liefern kann. Das Ziel dieser Arbeit ist die Messung bei einem unbekannten PV-Moduls zu optimieren, wobei Zeiteinsparung, Digitalisierung aber auch Reduzierung des Arbeitsaufwandes im Vordergrund stehen.

## 1 Einleitung

Die erneuerbaren Energien werden von Jahr zu Jahr zur Reduzierung der Treibhausgase, wie zum Beispiel des Kohlenstoffdioxids, immer wichtiger. Deren Ausbau trägt auch zur Sicherstellung der Energie im eigenen Land bei, wobei der größte Anteil an erneuerbaren Energien in Deutschland die Windkraft mit 24%, gefolgt von der Photovoltaik mit 11%. (Angaben aus 2021) haben. Durch das Energiewende- und Klimaschutzgesetz, welches von Bundesland zu Bundesland unterschiedlich ausgelegt wird, gilt die Solarpflicht für Dachsanierungen, was den Ausbau der Photovoltaik vorantreiben sollte. Die vorliegende Arbeit soll zur Verbesserung der Bestimmung von Kennlinien unbekannter Photovoltaikmodulen durch den Einsatz von Kondensatoren als variable Last beitragen. Diese Kennlinie wird in einem Strom-Spannungsdiagramm aufgezeichnet, wodurch sich der Maximum-Power-Point ablesen und somit die maximale Leistung eines Photovoltaikmoduls bestimmen lässt. Meist wird die Leistung von PV-Module mit vielen unterschiedlichen Widerstandsgrößen bestimmt. Der Nachteil dieser Messmethode ist der Zeitaufwand durch den Wechsel der vielen Widerstände, die für die Durchführung einer präzisen Messung benötigt werden. Ein weiterer Nachteil bei Messungen an einem PV-Modul ohne Datenerfassung ist das Ablesen und Notieren der Strom- und Spannungswerte. Durch diese Nachteile wird die Lage des Maximum-Power-Point MPP des PV-Moduls verzerrt dargestellt.

## 2 Methodik

### 2.1 Prinzipieller Aufbau einer Solarzelle

Wenn eine Solarzelle mit Licht bestrahlt wird, entsteht durch jedes absorbierte Photon ein Elektronen-Loch-Paar. Durch das Raumladungszonenfeld werden die Elektronen-Loch-Paare getrennt. Löcher werden durch die Basis an die Rückkontakte befördert. Die Elektronen werden durch den Emitter zu den Frontkontakten befördert. Diese Frontkontakte bestehen aus dünnen Metallstreifen, welche die Elektronen zur Stromsammelschiene transportieren. Wird ein Verbraucher an beide Pole der Solarzelle angeschlossen, so kann dieser die gewandelte Energie aufnehmen und nutzen. Dieser Vorgang wird in Abbildung 1 veranschaulicht:

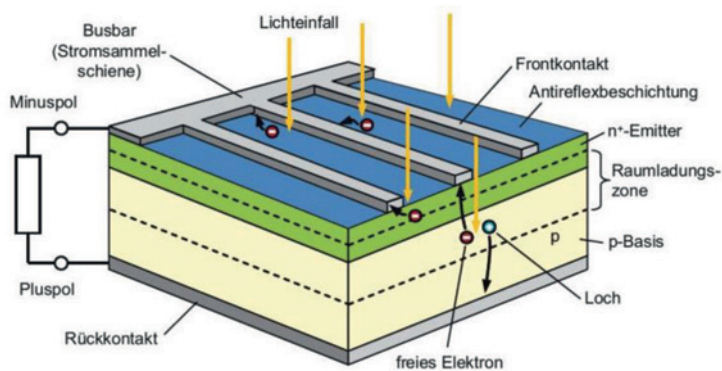


Abbildung 1: Aufbau einer Silizium-Solarzelle

## 2.2 Kenngrößen einer Solarzelle und Kennlinie

Bekannt ist, dass eine Solarzelle elektrischen Strom aus einfallendem Licht wandelt. Um damit Verbraucher zu betreiben, müssen die Kenngrößen Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung und Maximum-Power-Point bekannt sein. Durch diese Kenngrößen ist der Schutz eines elektrischen Verbrauchers gewährleistet. Der Kurzschlussstrom ist ein Maß dafür, wie viel Strom das entsprechende Modul maximal liefert. Durch diese Erkenntnis lässt sich im Nachhinein die Dicke der Leitung dimensionieren, welche den Strom leiten soll. Aus Sicherheitsgründen wird die Leitung meist größer dimensioniert, um Überlastungen zu verhindern. Die Leerlaufspannung ist ein Maß dafür, wie viel Spannung das entsprechende Modul maximal liefert. Diese Größe ist wichtig, um evtl. Schäden an elektronischen Bauteilen vorzubeugen, da die meisten elektronischen Bauteile eine maximale Spannungsgrenze besitzen. Der Maximum Power Point MPP beschreibt die Maximalleistung, die ein Photovoltaik-Modul liefern kann. Dies lässt sich aus der Multiplikation aus Strom und Spannung errechnen. Der MPP liegt dort, wo unter der Strom-Spannungs-Kurve die rechteckige Fläche am größten ist. Diese Fläche ist die Leistungs-Fläche, die meist für die bildliche Darstellung genutzt wird. Alle Kenngrößen werden in einem Strom-Spannungs-Diagramm dargestellt (Abbildung 2):

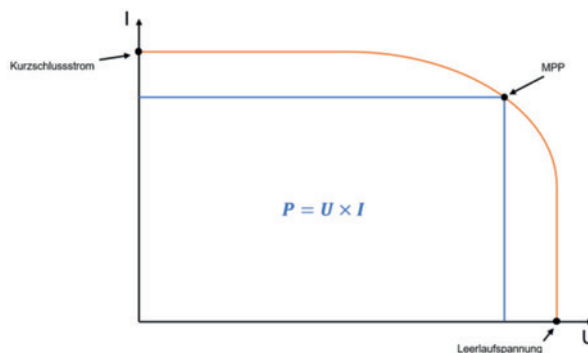


Abbildung 2: Strom-Spannungs-Diagramm

## 2.3 Photovoltaik-Modul-Prüfstand

Dieser Teststand soll den Ablauf der Datenerfassung an einem Photovoltaik-Modul durch den Einsatz von Kondensatoren als variable Last und mehreren Sensoren optimieren. Da ein Zusammenhang zwischen Temperatur und Wirkungsgrad besteht, wird die Temperatur als zusätzlicher Messwert durch einen Temperatursensor aufgezeichnet. Durch den Globalstrahlungssensor wird die Leistung der Sonnenstrahlung pro Quadratmeter am PV-Modul gemessen. Ein Winkel- und Ausrichtungssensor dient der Neigungs- und Standortbestimmung. Um alle Daten aufzuzeichnen und zu verarbeiten wird ein Mikrocontroller eingesetzt. Der Prüfstand wird den Zeitaufwand einer Messung minimieren und zudem die Daten digitalisieren. Das hat zur Folge, dass weniger Helfer bei einer Messung mit Datenerfassung gebraucht werden. Zudem kann durch den Einsatz von Kondensatoren einerseits die Strom-Spannungs-Kurve präziser dargestellt werden, andererseits wird keine Vielzahl an Widerständen benötigt, um dieselbe präzise Strom-Spannungs-Kurve zu erhalten wie bei Widerständen. Die Messwerte werden über ein W-Lan Netz an einen Computer gesendet. Der Computer verarbeitet diese Daten zu einer Strom-Spannungs-Kurve, um die maximale Leistung eines PV-Moduls zu bestimmen. Unter Verwendung von Datenbanken und einer automatischen Verarbeitung können große Mengen an Messwerten schnell und effizient von einem Computer verarbeitet werden. Der Prüfstand verfügt über eine Stufenreglung, um die Kapazitätsstufe des Kondensators auszuwählen und um verschiedene Varianten von PV-Modulen zu messen. Die Abbildung 3 verdeutlicht, wie die Messung eines PV-Moduls durch Widerstände mit starken Abweichungen die Lage des MPP des PV-Moduls nicht erfasst. Dieser Teststand generiert eine Methode, PV-Module zeiteffizient und mit einer Reduzierung des Arbeitsaufwandes zu messen und automatisch Strom-Spannungs-Kurven zu erstellen. Dadurch kann die Leistung von unbekannten PV-Modulen bei verschiedenen Bestrahlungswinkeln bestimmt werden.

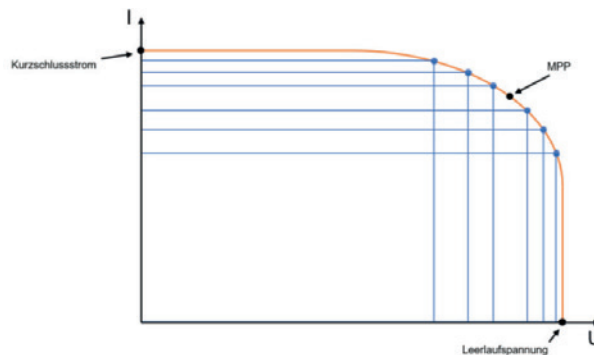


Abbildung 3: Leistungsmessung mit Widerständen

## Danksagung

Bedanken will ich mich bei Herrn Sebastian Georg, B. Eng und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Gierend für die hervorragende Zusammenarbeit.

## **Literatur/Quellen**

[Qua22] Quaschnig, Volker: Regenerative Energiesysteme: München: Hanser Verlag 2022

[Mer20] Mertens, Konrad: Photovoltaik Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis: München:Hanser Verlag 2020

Bundesamt Umwelt: Beitrag der erneuerbaren Energien zum Endenergieverbrauch in Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>, aufgerufen am 08.09.2022

Wörrle, J.: Solarpflicht: In welchen Bundesländern sie gilt oder geplant ist. <https://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/wo-eine-solarpflicht-gilt-206871/>, aufgerufen am 23.12.2022

## **Kontakt**

*Jan Maurice Nowara, Hiwi-Angestellter*

Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes

+49 681 5867-443

E-Mail: [jan.nowara@gmail.com](mailto:jan.nowara@gmail.com)

# Untersuchung der mikrobiellen Profile von 70 verschiedenen Biogasanlagen und Identifizierung signifikanter technischer und chemischer Einflussgrößen auf das Mikrobiom

**Abstract:** *Das Mikrobiom umfasst die Gesamtheit aller Mikroorganismen, die ein Makroorganismus (Mensch, Tiere, Boden oder Biogasanlage) besiedeln. Aufgrund der Komplexität und Individualität der interagierenden Parameter ist das Zusammenwirken des Mikrobioms nicht ausreichend erforscht. Diese Studie fokussiert auf die Beeinflussung des Mikrobioms von Biogasanlagen durch chemische, technische und mikrobielle Faktoren.*

## 1 Einleitung

Die Produktion von Biogas aus Substraten wie Bioabfall, Grünabfall, tierischen Fäkalien und Abwasser entspricht wichtigen Klima- und Nachhaltigkeitszielen wie der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft, optimaler Ressourcennutzung und der Produktion von erneuerbarem Strom und Gas. Damit hat die Produktion von Biogas mittels anaerober Vergärung eine entscheidende Bedeutung bei der Umsetzung des europäischen Green Deals mit dem Fit for 55-Paket [1, 2]. Ein Nachteil von Biogasanlagen ist, dass die ablaufende anaerobe Vergärung aufgrund der Vielzahl an beteiligten Mikroorganismen und biochemischen Prozessen als „Black Box“ betrachtet wird. Diese Vereinfachung führt zur Vernachlässigung des Mikrobioms, einer der wichtigsten Aspekte der anaeroben Vergärung. Mit mehr Wissen über das Mikrobiom und seine Wechselwirkungen mit anderen Parametern kann der Prozess der anaeroben Vergärung effizienter, robuster und schneller gestaltet werden. Diese Arbeit und das Projekt *Micro4Biogas* zielen darauf ab, die Mikrobiome einer Vielzahl an Biogasanlagen in verschiedenen Ländern der Europäischen Union zu analysieren. Darauf aufbauend werden Strategien zur Unterstützung und Modernisierung des Biogassektors im Allgemeinen entwickelt.

Um zunächst einen umfassenden Überblick über die Biogaslandschaft in Europa zu erhalten, wurden über 70 verschiedene Biogasanlagen in Deutschland, den Niederlanden, Belgien und Österreich hinsichtlich deren technischer, chemischer und mikrobieller Profile untersucht. Die umfassende Untersuchung des Mikrobioms knüpft an bestehende Forschungsarbeiten an [3, 4]. Darüber hinaus wird das bestehende Wissen zum Kernmikrobiom von Biogasanlagen auf Basis einer multivariablen Analyse erweitert. Damit können fundierte Aussagen zum Kernmikrobiom, dem parameterabhängigen Mikrobiom und der Manipulierbarkeit des Mikrobioms getroffen werden.

## 2 Methodik

### 2.1 Entnahme der Proben

Im Rahmen des Projektes *Micro4Biogas* wurde die Entnahme der Proben an den Biogasanlagen von den Projektpartnern Technischen Universität Dresden (TUD) für Deutschland und Österreich, von Bioclear earth b.v. für die Länder Niederlande und Belgien durchgeführt. Die Anlagenbetreiber wurden zunächst kontaktiert, das Projekt wurde vorgestellt und die Betreiber wurden gebeten, eine Probenahme in der jeweiligen Anlage zu genehmigen. In Abstimmung mit den Anlagenbetreibern wurden daraufhin die Entnahme der Proben geplant und durchgeführt. Insgesamt konnten auf diese Weise mehr als 70 verschiedene Proben an 45 Standorten entnommen werden. Die Suche nach den wichtigsten Mikroorganismen und die Standorte der Biogasanlagen, an denen Proben genommen wurden, sind in Abbildung 1 dargestellt.

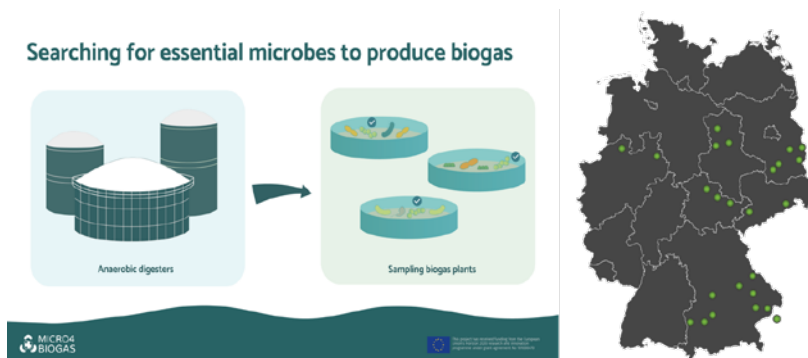


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Prozesses der Probennahme und Standorte in Deutschland und Österreich, an denen die Proben genommen wurden.

Es wurden pro Biogasanlage zwei Proben als Duplikat entnommen: Für die chemische Analyse des Schlammes wurde 1 l Probe benötigt, für die DNA-Sequenzierung 50 ml mit 50 Vol.-% Ethanol gemischte Probe. Die Proben wurden nach der Entnahme bei -10 °C gelagert, um Abbauprozessen und Veränderungen des Mikrobioms zu vermeiden. Die technischen Daten der Biogasanlagen wurden mit Hilfe einer Befragung der Anlagenbetreiber ermittelt. Dazu zählen Betriebstemperatur, Reaktorvolumen, Retentionszeit, Reaktortyp, Energieproduktion, Biogasproduktion, Substratart, Substratmenge, Beladungsrate und Additive.

### 2.2 Analyse der Proben

Bei der Entnahme Vorort wurden die Parameter pH-Wert, Leitfähigkeit und Redoxpotential direkt bestimmt, da sich diese durch den Prozess des Einfrierens ändern können. Die chemische Analyse wurde am Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft der Technischen Universität Dresden durchgeführt. Dafür wurde für jede Probe die spezifischen Parameter für die Bewertung des anaeroben Vergärungsprozesses bestimmt. Dazu zählen Trockensubstanz, organische Trockensubstanz, chemischer Sauerstoffbedarf, Ammonium, Total Kjeldahl Nitrogen, FOS/TAC, die einzelnen und gesamten organischen Säuren, Schwermetalle und Mikronährstoffe.



Das Mikrobiom wurde mit der bewährten Methode der 16S rRNA-Sequenzierung beim Projektpartner DARWIN in Valencia analysiert. Hierzu wurde die DNA zunächst mit einem DNA-Extraktionskit aus den Proben extrahiert. Die extrahierte metagenomische DNA wurde zur Amplifikation der hypervariablen Region V3-V4 des 16S ribosomalen RNA-Gens verwendet. Die konservierten Regionen V3 und V4 (470 bp) des 16S rRNA-Gens wurden mit folgendem PCR-Zyklus amplifiziert: anfängliche Denaturierung bei 95 °C für 3 min; 25 Amplifikationszyklen (30 s bei 95 °C, 30 s bei 55 °C, 30 s bei 72 °C); und 5 min Verlängerung bei 72 °C [5]. Die Taxonomie jeder Sequenzvariante wurde mit dem Classify-Sklearn-Modul des Feature-Classifer-Plugins bestimmt, wobei SILVA als Referenzdatenbank für die taxonomische Zuordnung verwendet wurde [6]. Mit diesem umfangreichen Datensatz an chemischen, mikrobiellen und technischen Parametern konnten ganzheitliche Zusammenhänge zwischen den Variablen ermittelt und visualisiert werden.

### 3 Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die Vielfalt der untersuchten Biogasanlagen anhand ausgewählter Parameter. Die Prozessparameter liegen in den Bereichen Prozesstemperaturen von 35 bis 63 °C, Reaktorvolumen von 200 m<sup>3</sup> bis 13.000 m<sup>3</sup>, durchschnittliche Verweilzeit von 4 bis 170 Tagen. Zu den untersuchten Anlagentypen gehören Pfropfenstromreaktoren, kontinuierliche Rührkesselreaktoren mit verschiedenen Mischsystemen, zweistufige Biogasanlagen und an Kläranlagen angeschlossene Biogasanlagen.

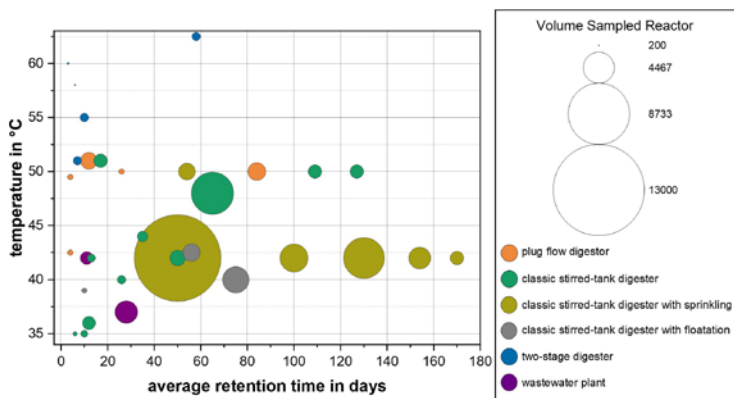


Abbildung 2: Visualisierung wichtiger Prozessgrößen der beprobten Biogasanlagen

Im Allgemeinen enthielten alle Proben größere Mengen an Bakterien als Archaeen, obwohl einige Proben überraschend hohe Mengen an Archaeen aufwiesen, insbesondere *Methanosarcina* und *Methanosaeta*. Die beobachteten mikrobiellen Gemeinschaften ähneln denen, die zuvor für anaerobe Vergärungsanlagen beschrieben wurden [7,8]. Die vorläufigen Ergebnisse zeigen, dass anaerobe Vergärungsanlagen ein Kernmikrobiom besitzen, das heißt eine Gruppe bestimmter Mikroorganismen, die in jeder Vergärungsanlage nachgewiesen werden können. Zu diesem gehören die Mikroorganismen *Limnochordia* MBA03, *Proteiniphilum*, *Caldicoprobacte* und eine nicht kultivierte Spezies aus den *Dethiobacteraceae*. Die Korrelationsanalyse ergab positive und negative Korrelationen zwischen mehreren mikrobiellen Taxa und

bestimmten Parametern wie chemischer Sauerstoffbedarf, pH-Wert, organischer Stickstoff, Ammoniak, Redoxpotential, organische Trockensubstanz und anderen. Die Ergebnisse der ganzheitlichen Untersuchung des Mikrobioms von anaeroben Vergärungsanlagen wird derzeit in einer wissenschaftlichen Publikation zusammengefasst, weswegen die Ergebnisse in diesem Beitrag sehr allgemein dargestellt sind. Ausführlichere Informationen zu den parameterabhängigen Mikrobiomen und den Variablen, die das Mikrobiom von Biogasanlagen beeinflussen, werden in naher Zukunft veröffentlicht.

## 4 Ausblick

Im Folgenden wurden statistische Methoden (multivariate Verfahren) eingesetzt, um Zusammenhänge zwischen mikrobiellen Profile, den technischen Kenngrößen und den chemischen Parametern zu identifizieren. Dadurch konnten signifikante Einflussgrößen wie beispielsweise Temperatur, Substrat, Stickstoffgehalt, Verweilzeit und deren konkrete Wirkung auf das Mikrobiom ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Studie werden demnächst in einer wissenschaftlichen, von Experten begutachteten Fachzeitschrift veröffentlicht.

Im weiteren Verlauf des Projektes *Micro4Biogas* werden einzelne Hochleistungsmikroorganismen aus Mikrobiom isoliert und kultiviert. Die Isolate sollen die Leistung von bestehenden Biogasanlagen verbessern.

## Danksagung

Das Projekt *Micro4Biogas* wurde von der Europäischen Union im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizon 2020 unter der Fördervereinbarung Nr. 101000470 finanziert.

## Literatur/Quellen

- [1] The European Commission, "The European Green Deal," *Official Journal of the European Union*, 2019.
- [2] The European Commission, "Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality," 2021.
- [3] S. Dykstra, L. Jansen, and C. Gallert, "Syntrophic acetate oxidation replaces acetoclastic methanogenesis during thermophilic digestion of biowaste," *Microbiome*, vol. 8, no. 1, p. 105, 2020.
- [4] R. H. Kirkegaard, S. J. McIlroy, J. M. Kristensen et al., "The impact of immigration on microbial community composition in full-scale anaerobic digesters," *Scientific reports*, vol. 7, no. 1, p. 9343, 2017.
- [5] L. Satari, A. Guillén, À. Vidal-Verdú et al., "The wasted chewing gum bacteriome," *Scientific reports*, vol. 10, no. 1, p. 16846, 2020.
- [6] C. Quast, E. Pruesse, P. Yilmaz et al., "The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools," *Nucleic acids research*, vol. 41, Database issue, D590-6, 2013.
- [7] S. Ma, F. Jiang, Y. Huang et al., "A microbial gene catalog of anaerobic digestion from full-scale biogas plants," *GigaScience*, vol. 10, no. 1, 2021.
- [8] C. Fang, L. Zhou, Y. Liu et al., "Effect of micro-aerobic conditions based on semipermeable membrane-covered on greenhouse gas emissions and bacterial community during dairy manure storage at industrial scale," *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, vol. 299, p. 118879, 2022.

**Kontakt**

*Pascal Otto*

Technische Universität Dresden, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Pratzschwitzer Str. 15, 01796 Pirna

E-Mail: [pascal.otto@tu-dresden.de](mailto:pascal.otto@tu-dresden.de)

*Christian Abendroth*

Brandenburgische Technische Universität Brandenburg, Fachgebiet Kreislaufwirtschaft

Siemens-Halske-Ring 8, 03046 Cottbus

E-Mail: [christian.abendroth@b-tu.de](mailto:christian.abendroth@b-tu.de)



# Prognose von Zeitreihen in Abhängigkeit der Emissionswerte mit FNN und CNN

**Abstract:** Künstliche Neuronale Netze (KNN) konnten in den letzten Jahren durch verbesserte Trainingsverfahren und höhere Rechenleistung einige beachtliche Erfolge vorweisen. Im Ingenieurwesen wurden KNN seit den 1990er Jahren erprobt, erreichten aber durch die technischen Grenzen keine größere Verbreitung. Die exponentielle Zunahme der Rechenleistung und die Verfügbarkeit besserer Trainingsalgorithmen versprechen bessere Trainingsergebnisse. Die vorliegende Arbeit untersucht diese KNN der neuesten Generation auf ihre Anwendbarkeit auf ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen. Es werden Deep-Learning-Modelle mit unterschiedlichen Netzstrukturen anhand standardisierter Versuchsdaten trainiert und getestet, um einen digitalen Zwilling einer Verbrennungsanlage für feste Brennstoffe zu erhalten. Ziel ist die Vorhersage von Prozesszuständen und Emissionswerten, insbesondere Stickoxide, ausschließlich auf Basis bekannter Stellgrößen.

## 1 Einleitung

Die Computertechnik entwickelt sich in ständiger und rasanter Geschwindigkeit, so dass die Rechenleistung in der heutigen Zeit ein solches Ausmaß erreicht hat, um noch tiefer in die Anwendungsmöglichkeiten der Künstlichen Intelligenz (KI) einzusteigen. Künstlich Neuronale Netze (KNN) stellen dabei die essenzielle Grundlage dar, um die komplexer werdenden Aufgabestellungen mit Hilfe von vielversprechenden Algorithmen und Lernstrategien zu berechnen. Das Ziel ist es, über dieses numerische Konstrukt innerhalb eines Prozesses Zusammenhänge abzubilden, die je nach gewünschter Funktion eine Prognose über ein technisches Verhalten liefert. In diesem Bezug dient die Handlungsweise biologischer Neuronen im Gehirn als Vorbild.

Gerade im Anwendungsbereich von thermischen Verwertungsanlagen, deren Verbrennungsprozesse je nach Maßstab der Anlage nicht mehr über einfache Netzstrukturen dargestellt werden können, werden tiefer gehende Netzstrukturen benötigt, um die Abbildungsgenauigkeit zu erhöhen. Die dafür relevanten Methoden zur Optimierung von KNN fallen unter das Thema *Deep Learning (DL)* als ein Teilgebiet der KI. Während Deep Learning sich mit dem Aufbau der Geflechte von KNN beschäftigt, liegt eine Ebene darüber im *Machine Learning (ML)* der Fokus auf der allgemeinen Lernstrategie und deren Einsatz über numerische Algorithmen. In dieser Arbeit wurde als Lernstrategie vorerst das sogenannte *Supervised Learning* (Überwachtes Lernen) angewendet, welches nichts anderes bedeutet als ein Training, dem klar vorgegeben wird, welches Ergebnis zu welcher Eingabe gehört, um die Anpassung zu regulieren. Bei der Wahl der Netzstrukturen für DL werden *Feedforward Neural Network (FNN)* und *Convolutional Neural Network (CNN)* zur näheren Betrachtung herangezogen. Da ein Verbrennungsversuch von Biomasse und Abfallprodukten ein

zeitlich abhängiger Prozess bezüglich seines Ablaufs in mehreren Phasen (zeitliche und örtliche Überlappung) mit sich zieht, sollten diese in ihrer Auswertung nicht nur als einzelne Datenpunkte betrachtet werden, sondern als Zeitreihe. Es soll dabei ein Vergleich von alten, einfachen Netzmodellen gegenüber modernen, dem Prozess angemessenen Netzmodellen dargestellt werden.

## 2 Grundlagen Künstlicher Neuronaler Netze

### 2.1 Feedforward Neural Network (FNN)

Der prinzipielle Aufbau eines KNN liegt dem Wissen zugrunde, dass wie in der Biologie Neuronen Informationen, die sie als Input (Eingangsinformation) erhalten, weiter an das nächste Neuron in Form eines Outputs (ausgegebene Information) transportieren. Ein FNN bildet sich genau aus dieser Vorgehensweise zusammen, allerdings liegen mehrere Neuronen in einer Schichtebene und jedes Neuron der vorangegangenen Ebene koppelt sich mit sämtlichen Neuronen der darauffolgenden Schicht. Der Ausgangspunkt gibt die erste Neuronenschicht als *Input Layer* vor und die letzte Schicht als Ausgabe ist der *Output Layer*. Dazwischen befindet sich im einfachsten Fall nur eine weitere Neuronenschicht oder im Fall von tiefgehenden Systemen des DL mehrere Zwischenschichten, welche als *Hidden Layer* (versteckte Schicht) bekannt sind. Neuronen dienen dabei als Berechnungseinheiten, deren Information über Gewichte und Schwellenwerte eingebettet in einer Aktivierungsfunktion übermittelt werden, um eine Nichtlinearität zu erzeugen und dabei schließlich Zusammenhänge von komplexen Mustern zu erkennen. Gewichte stellen ein Maß der Bedeutsamkeit der Information dar, während der Schwellenwert beeinflusst, ob das Neuron letztendlich aktiviert wird oder die Informationsweitergabe an dieser Stelle für das jeweilige Neuron beendet ist. Eine Aktivierungsfunktion gibt dabei den Wertebereich der Ausgabe eines jeden Neurons vor und ist somit für die Nichtlinearität verantwortlich.

### 2.2 Convolutional Neural Network (CNN)

Ein CNN kann im Vergleich zu FNN als eine Vervollständigung über weitere Berücksichtigungen der Gesamtheit des Prozesses angesehen werden. Das primäre Ziel ist die zusätzliche Betrachtung umliegender Dateninformation, wie beispielsweise vorangegangene und nachfolgende Datenpunkte in einer Zeitreihe, um diese ausgehend von einem zentralen Datenpunkt miteinander zu verrechnen. Eine Zeitreihe wird unter Verwendung eines eindimensionalen *Convolutional Layers* (Faltungsschicht) mit Filtern abgerastert, wodurch je nach Anzahl der Filter in gleichem Maße sogenannte *Feature Maps* generiert werden. *Feature Maps* betonen auf logischer Weise relevante Merkmale und bilden sie auf mehreren Ebenen ab. Der darauf folgende *Pooling Layer* soll die Dimensionalität und das Rauschen verringern. Anschließend ist es vonnöten über eine Umgestaltung der Schicht einen eindimensionalen Vektor zu erstellen, dessen Informationen in einen einfachen, vollverknüpften *Hidden Layer* (siehe 2.1) und schließlich in den *Output Layer* weitergeleitet werden.

### 3 Prozessbeschreibung, Datenerhebung und Training

#### 3.1 Prozessbeschreibung und Datenerhebung

Für die Datenerhebung wurden Verbrennungsversuche in einem Ofen, welcher mit einer Nennwärmeleistung von 10 kW arbeitet, über manuelle Beschickung mit Scheitholz durchgeführt. Abgesehen vom Ofen beinhaltet die Laboranlage auch Steuereinrichtungen, wie ein drehzahlgesteuerter Saugzug, Primär- und Sekundärluft-Klappe, welche als Stellgrößen während des Betriebs konstant gehalten wurden. Alle weiteren Daten, welche für das KNN-Training relevant sind, wurden über gegebene Messeinrichtungen erfasst und zusätzlich in Tabelle 1 aufgeführt. Die Aufzeichnung fand dabei entweder kontinuierlich statt oder es wurde ein Einzelwert ermittelt und über die Zeitreihe hinweg ergänzt.

Tabelle 1: Struktur der Daten

Größe	Einheit	Art	Bemerkung
Sauerstoff	Volumen-%	Kontinuierlich	
Kohlenstoffdioxid	Volumen-%	Kontinuierlich	
Rauchgastemperatur	°C	Kontinuierlich	
Kohlenstoffmonoxid	mg/m <sup>3</sup> (i.N.tr.)	Kontinuierlich	
Stickstoffmonoxid	mg/m <sup>3</sup> (i.N.tr.)	Kontinuierlich	Ausgangsgröße
Umgebungslufttemperatur	°C	Einzel	
Umgebungsluftfeuchte	RH	Einzel	
Brennstoffmasse	kg	Einzel	
Klappenstellung Primärluft	%	Einzel	
Klappenstellung Sekundärluft	%	Einzel	
Rauchgasgeschwindigkeit	m/s	Einzel	

Aus statistischen Gründen wurden je sechs Versuche für 18 verschiedene Variationen der Stellgrößen durchgeführt. Die Daten liegen als *Comma-Separated-Values* (CSV) Datei vor und werden mit Hilfe der Programmiersprache *Python* aufbereitet. Diese 108 Versuche beziehen sich stets auf 40-Minuten-Aufzeichnungen, welche je auf ein Drei-Sekunden-Intervall normiert wurden, um fehlerhafte Messungen auszugleichen. Die Normierung sorgt für 801 Datenpunkte pro Versuch und somit einen gesamten Datensatz von 86.508 Datenpunkten, welche abhängig von ihrem Minimum und Maximum auf ein Intervall von 0 bis 1 linear abgebildet werden.

#### 3.2 Training des Neuronalen Netzes

Innerhalb der Umgebung von *Visual Studio Code* (VSC) kommen einige *Python*-Bibliotheken zur Datenaufbereitung zum Einsatz, wie beispielsweise *NumPy* für Matrizen. An dieser Stelle liegt allerdings für die tatsächlichen Berechnungen des KNN-Trainings die in *Tensorflow* integrierte *Keras*-Bibliothek im Fokus. Dieses *Framework* gewährleistet die Berechnungen über die Grafikkarte, während die einzelnen Versuche mit ihren Stellgrößen und Ergebnissen über ein zentrales Dashboard von *WandB* (*Weights and Biases*) tabellarisch und graphisch dargestellt werden können.

Für das Supervised Learning werden die 108 Versuche jeweils als Ganzes auf Trainings- und Validierungsdaten im Verhältnis von 80:20 aufgeteilt und ausgewertet. Das Training selbst wird über den Backpropagation-Algorithmus zur Minimierung der Kostenfunktion mit Hilfe des Gradientenabstiegs und der Modifikation der Gewichte im Neuronalen Netz umgesetzt. Je nach Auslegung der Netzstruktur und der Wahl des Trainings gibt es unterschiedliche Hyperparameter, die zu beachten sind. Die wichtigsten Größen sind dabei die Lernrate, Batchgröße, Epochengröße und Anzahl der Neuronen sowie die Poolgröße und die Anzahl der Filter, welche allerdings nur bei CNN zum Einsatz kommen. Die Lernrate wurde über alle Versuche konstant gehalten. Die letztendliche Bewertung, wie gut ein KNN trainiert hat, soll anhand des mittleren relativen Fehlers (mean relative error, MRE) ermittelt werden.

Bei den KNN handelt es sich um folgende Parametereinstellungen:

*Tabelle 2: Einstellung der getesteten Hyperparameter*

KNN	Batchgröße	Epochengröße	Neuronen	Poolgröße	Filter
<b>FNN</b>	3 - 5	500 - 1000	100 - 1600	-	-
<b>CNN</b>			100 - 1200	3 - 4	4 - 14

## 4 Vergleich der Ergebnisse

In der Lernphase für das KNN wurden für das CNN 253 verschiedene Trainings und für das FNN 24 verschiedene Trainings ausgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass mit den Validierungsdaten keine Modifikation des Netzes mehr durchgeführt wird, sollten die Werte des Validierungs-MRE dabei in ihrem Verlauf tendenziell schlechter ausfallen als die des Trainings-MRE. Die Ergebnisse des Validierungs-MRE gelten für den realen Anwendungsfall als repräsentativer und sollen daher zur Auswertung im Fokus stehen. Grundsätzlich stellt sich jedoch heraus, dass sich mit steigender Neuronenanzahl für beide Netzstrukturen proportional dazu auch die Vorhersage bezüglich der Stickoxidwerte optimieren lässt. Batch- und Epochengröße stehen in keiner eindeutigen Kausalität mit dem Erfolg des Netzes zusammen, ohne die Kombinationen weiterer Hyperparameter miteinzubeziehen. Während sich bei CNN die Anzahl der Filter zwischen sechs und zwölf als vielversprechend zeigt, scheint die Poolgröße keine klaren Zusammenhänge aufzuweisen. Die beste Konfiguration für das CNN bezüglich des niedrigsten Validierungs-MRE ermöglicht einen Wert von 13,4 %.

## Literatur/Quellen

- [1] Biewald, L.: „Experiment Tracking with Weights and Biases“, Weights & Biases. <http://wandb.com/>, abgerufen am 11.01.2023
- [2] Nielson, M.: Neural Networks and Deep Learning. [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Computer\\_Science/Applied\\_Programming/Book%3A\\_Neural\\_Networks\\_and\\_Deep\\_Learning\\_\(Nielsen\)](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Computer_Science/Applied_Programming/Book%3A_Neural_Networks_and_Deep_Learning_(Nielsen)), abgerufen am 11.01.2023
- [3] Steinwender, J.; Schwaiger R.: Neuronale Netze programmieren mit Python. Rheinwerk Verlag, 2020
- [4] TensorFlow Developers: [https://www.tensorflow.org/api\\_docs/python/tf/keras](https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras), abgerufen am 11.01.2023



**Kontakt**

*Elena Pabst, wissenschaftliche Mitarbeiterin*

Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes

E-Mail: [mam.elena.pabst@htwsaar.de](mailto:mam.elena.pabst@htwsaar.de)



## **Maritime Abfall- und Abwasserentsorgungstechnologie: Abgasreinigung für die thermische Abfallentsorgung auf Schiffen**

**Abstract:** Das Verbundvorhaben „Maritime Abfall- und Abwasserentsorgungstechnologie“ (MAAT) adressiert die Reduktion schädlicher Umweltauswirkungen durch Kreuzfahrten, die durch eine unzureichende Abfallbehandlung hervorgerufen werden. Diese ergeben sich vor allem aus der anfallenden Abfallmatrix aus Klärschlämmen, Speiseresten und Verpackungsabfällen, die bisher auf Schiffen in einfachen Feuerungen mit allenfalls rudimentärer Abgasreinigung verbrannt werden. Die Ausstattung solcher Anlagen mit einer umfassenden Abgasreinigungstechnologie ermöglicht es, Emissionsstandards einzuhalten, die auch für klassische Müllverbrennungsanlagen an Land gelten. Im Verbundprojekt wird ein neues thermisches Verwertungsverfahren auf Kreuzfahrtschiffen entwickelt. Zentrale Bausteine sind das gestufte thermische Feuerungssystem und eine sekundäre, trockene Abgasreinigungstechnologie, die vom Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER) an der RWTH Aachen konzeptioniert und entwickelt wird. Oberstes Ziel ist ein sicheres Unterschreiten der Grenzwerte der 17. Bundesimmissionsschutzverordnung (17. BImSchV), um einen Betrieb in Häfen weltweit zu ermöglichen. Um den Anforderungen eines maritimen Einsatzes zu entsprechen, wird eine wartungs- und rückstandsarme Betriebsweise angestrebt. Der Anlagenaufbau wird modular und einfach adaptierbar gestaltet, um auf veränderte Abfallzusammensetzungen und damit einhergehende veränderte Emissionsprofile reagieren zu können.

### **1 Einleitung**

Auf Kreuzfahrtschiffen fällt täglich eine beträchtliche Abfallmenge an. Die wesentlichen Fraktionen sind Klär- bzw. Fäkalschlämme, Speisereste sowie Verpackungsabfälle. Da die Platzverhältnisse auf den Schiffen beschränkt sind und die Reedereien unter Kostendruck stehen, findet nach dem Stand der Technik nur eine unzureichende Abfallbehandlung statt. Diese adressiert hauptsächlich die Massen- und Volumenreduktion. In den einfachsten Fällen wird der Abfall an Bord gesammelt und im nächsten Hafen an Dritte übergeben (AIDA, 2019). Dies ist insbesondere im Hinblick auf weltweit unterschiedliche Entsorgungsstandards kritisch zu bewerten. Zudem werden an Bord kleine thermische Beseitigungsanlagen betrieben, um das Abfallvolumen zu reduzieren. Aufgrund mangelnder Emissions-Vorgaben ist ein Betrieb dieser Anlagen mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden und daher nur in internationalen Gewässern gestattet.

## 2 Zielstellung

Im Verbundvorhaben **MAAT** (**M**aritime **A**bfall- und **A**bwasserentsorgungstechnologien) wird ein umwelt-schonendes Abfallmanagementsystem für Kreuzfahrtschiffe entwickelt. Das Konzept soll bezüglich der Umweltauswirkungen dem Stand der Technik von Verwertungssystemen an Land entsprechen. Es umfasst die vollständige Prozesskette von der Sammlung der Abfälle auf dem Schiff bis zur Entsorgung von Reststoffen und soll weltweit umsetzbar sein. Zentraler Baustein ist ein gestuftes thermisches Verwertungssystem mit einer nachgeschalteten Rauchgasreinigungsanlage, die es ermöglicht, die strengen Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV sicher einzuhalten. Das Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe an der RWTH Aachen (TEER) verantwortet die Entwicklung der Rauchgasreinigung.

### 2.1 Herausforderungen

Die Entwicklung der sekundären Rauchgasreinigung ist an verschiedene Randbedingungen geknüpft. Dem wirtschaftlichen Druck der Kreuzfahrtbranche entsprechend muss der Anlagenbetrieb kosteneffizient agieren. Hieraus resultiert ein möglichst geringer Personalaufwand, der nur bei einem einfachen, wartungsarmen und kontinuierlichen Betrieb realisierbar ist. Daher wird ein hoher Automatisierungsgrad angestrebt. Neben diesen allgemeinen und überwiegend wirtschaftlichen Herausforderungen müssen verschiedene schiffs- und abfallseitige Randbedingungen berücksichtigt werden.

Zu den schiffsseitigen Randbedingungen zählen beispielsweise die begrenzten räumlichen Gegebenheiten, die eine platzsparende und effiziente Konzeptionierung und Errichtung der Rauchgasreinigung erfordern. Das Reststoffaufkommen muss entsprechend niedrig ausfallen, um Lagerflächen zu reduzieren. Verschleißteile müssen trotz kompakter Bauweise einfach ersetzt werden können. Dazu ist eine Robustheit der Anlage gegenüber wechselnden Witterungsbedingungen erforderlich (Wellengang, hohe Luftfeuchtigkeit etc.). Im Falle von Betriebsstörungen (z. B. Stromausfall) muss ein sicherer Abfahrbetrieb gewährleistet werden. Zudem muss die wechselnde Anwesenheit des Schiffs in Häfen, nationalen und internationalen Gewässern berücksichtigt werden. In internationalen Gewässern gelten die von der IMO (International Maritime Organization) erlassenen Abgasgrenzwerte. Diese sind bei weitem nicht ausreichend, um einen Betrieb in nationalen Gewässern, insbesondere in Häfen zuzulassen. Damit die Anlage weltweit genehmigt und betrieben werden kann, müssen die strengsten international geltenden Emissionsvorgaben eingehalten werden. Diese entsprechen den Grenzwerten der 17. BImSchV. Zur Umsetzung eines kontinuierlichen Anlagenbetriebs ist außerdem die weltweite Betriebsmittelversorgung und fachgerechte Reststoffentsorgung zuverlässig abzusichern.

Abfallseitig muss die Rauchgasreinigung für ein Abfallgemisch ausgelegt werden, das zu bedeutenden Teilen aus Klärschlamm und Verpackungsabfällen besteht. Der Stand der Technik bei Rauchgasreinigungsanlagen hinter Klärschlammfeuerungen sieht in der Regel nasse Verfahren vor. Eine solche ist aus verschiedenen der zuvor genannten Randbedingungen (begrenzter Platz, niedriges Reststoffaufkommen, geringe Betriebskosten, Wellengang etc.) nicht umsetzbar, sodass für diesen Anwendungsfall eine trockene Speziallösung erforderlich wird. Ein besonderer Fokus liegt auf der trockenen Sauergasabscheidung in chlorarmer Atmosphäre, die aus dem zu erwartenden Brennstoffmix resultiert. Es muss zudem mit Emissionen persistenter organischer Schadstoffe (z. B. PAK) und Schwermetallen gerechnet werden. Eine sekundäre Abscheidung von Stickoxiden muss nicht berücksichtigt werden, da diese primärseitig im thermischen System erfolgen soll.

## 2.2 Teilziele der Konzeptionierung

Aus den Herausforderungen, die sich bei der Entwicklung der sekundären Abgasreinigung ergeben, können vier Teilziele für die Konzeptionierung abgeleitet werden:

- Hohe Abscheideleistung gegenüber persistenten organischen Schadstoffen und Schwermetallen
- Schadstoffabscheidung mit trockenem Reststoffaustrag, ohne kontaminiertes Abwasser
- Nachgeschaltetes, modulares System zur sekundären Abgasreinigung
- Kompakter Anlagenaufbau und wartungsarmer Betrieb

Die Schwermetall- und Sauer gasabscheidung wird als Trockensorption in Flugstrom- oder Wirbelschichtreaktoren konzeptioniert. Mögliche Sorptionsmittel sind Natriumbicarbonat (Sauer gas) und Aktivkohle (Schwermetalle). Grundsätzlich sind aber auch Mischungen verschiedener Sorptionsmittel (z. B. Natriumbicarbonat und Kalkhydrat) denkbar, um Nachteile einzelner Sorptionsmittel auszugleichen. Zur Abscheidung von Partikeln und dem beladenen Sorptionsmittel sind Gewebefilter vorgesehen. Der Filterstaub stellt den einzigen festen Rückstand der Rauchgasreinigung dar. Er wird an Bord gelagert, um einer umweltverträglichen Entsorgung an Land zugeführt zu werden.

## 3 Methodik

Die Umsetzung des Projekts umfasst den Bau einer Versuchsanlage im Technikumsmaßstab, die experimentelle Optimierung der einzelnen Verfahrensschritte sowie die Konzeptionierung und Inbetriebnahme eines Demonstrators im Anwendungsmaßstab. Die Verfahrensfindung erfolgt auf Basis von Erfahrungen, Berechnungen und Simulationen. Unterstützend werden Laboranalysen von realen Abfallmischungen durchgeführt. Die Ergebnisse werden zur Plausibilisierung der theoretischen Auslegung verwendet.

Die praktische Verfahrensauslegung erfolgt in experimentellen Grundlagenuntersuchungen. Dort werden die Abscheideleistungen der einzelnen Apparate gegenüber  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  und Staub zunächst an synthetischen Abgasen ermittelt. Das synthetische Abgas wird auf Basis eines berechneten Emissionsprofils hergestellt. Es besteht die Möglichkeit, Abscheideleistungen der Aggregate gegenüber einzelnen Schadstoffen zu untersuchen und aggregatspezifische Grenzwerte zu formulieren. Schwermetalle und persistente organische Schadstoffe werden dem synthetischen Abgas aus Sicherheitsaspekten nicht hinzugefügt. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse werden die Komponenten optimiert und soweit erforderlich verfahrenstechnisch angepasst.

Im nächsten Schritt wird ein reales Feuerungsabgas genutzt, um die Wirksamkeit des Gesamtverfahrens gegenüber Fluorwasserstoff, Schwermetallen sowie persistenten organischen Schadstoffen (PCDD/F, PAK) nachzuweisen, die in den Untersuchungen mit Modellabgas nicht betrachtet werden können. Außerdem bietet die Verschaltung mit einer Feuerungsanlage die Möglichkeit instationäre Prozesse (An- und Abfahren) sowie einen Dauerbetrieb zu untersuchen.

Die gewonnenen Erkenntnisse der theoretischen und praktischen Untersuchungen werden zum Bau eines Demonstrators im Anwendungsmaßstab verwendet. Dieser wird abschließend im Verbund mit der gestuften Feuerung unter realistischen Versuchsbedingungen mit Original-Schiffsabfällen getestet und final bewertet.

## 4 Ausblick

Im Rahmen der experimentellen Grundlagenuntersuchungen werden relevante Erkenntnisse zur sekundären, trockenen Abgasreinigung bei der thermischen Verwertung gemischter Schiffsabfälle, bestehend z. B. aus Klärschlämmen und Kunststoffen, erwartet. Besonders hervorzuheben ist die trockene Sauer-gas-Abscheidung in chlorarmer Atmosphäre. Eine Übertragung auf weitere Branchen ist zu erwarten. Durch die jüngste Novelle der Klärschlamm- und Düngemittelverordnung gewinnen beispielsweise zunehmend kleinere, dezentrale Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen an Bedeutung, für die effiziente Lösungen in der Abgasreinigung notwendig sind.

## Danksagung

Das Verbundprojekt MAAT wird in Kooperation mit der Firma Martin Systems, der Firma LiPRO Energy und dem Lehrstuhl für Gas- und wärmetechnische Anlagen an der Technischen Universität Freiberg bearbeitet und durch das *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz* (BMWK) im Rahmen des *Maritimen Forschungsprogramms* gefördert.

## Literatur/Quellen

AIDA Cruises (2019): AIDA Cares 2019. [https://media.aida.de/fileadmin/user\\_upload/v4/Unternehmen/Nachhaltigkeit/Content-Bilder/2019/190711\\_AIDAcares2019\\_Gesamt\\_DE.pdf](https://media.aida.de/fileadmin/user_upload/v4/Unternehmen/Nachhaltigkeit/Content-Bilder/2019/190711_AIDAcares2019_Gesamt_DE.pdf) [Stand 27.12.2022]

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Kontakt

*Erik Peters. M. Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter*

Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER), RWTH Aachen

Tel.-Nr. 0241/8090718

E-Mail: [peters@teer.rwth-aachen.de](mailto:peters@teer.rwth-aachen.de)

Homepage: [www.teer.rwth-aachen.de](http://www.teer.rwth-aachen.de)

## Zirkuläre Produktentwicklungsmethodik für Serienprodukte

**Abstract:** Industrielle Produktentwicklungsprozesse müssen zukünftig den gesamten Lebensweg von Produkten beginnend mit der Rohstoffförderung bis zum Ende des Lebenszyklus berücksichtigen, um neben den bisher üblichen Eigenschafts- und Nutzenprofilen der Produkte zusätzlich noch kreislaufwirtschaftliche Anforderungen wie Lebenszeitverlängerung, Weiternutzung oder hochwertiges Recycling hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Klimafreundlichkeit und Ressourceneffizienz bewerten zu können. Dies erfordert bei der Produktentwicklung prozessbegleitend möglichst automatisch anwendbare Bilanzierungsinstrumente und gleichzeitig die Berücksichtigung zirkulärer Geschäftsmodelle. Bisher fehlen hierfür überzeugende praxisorientierte Lösungsansätze. Um diese Forschungslücke zu schließen, stellt der vorliegende Beitrag die Operationalisierung eines übergreifenden Design for Circularity anhand eines auf zirkulären und technisch orientierten Vorgaben basierenden Entscheidungsbaums dar. Die Integration eines solchen Entscheidungsbaums in industrielle Produktentwicklungsprozesse ermöglicht den an Produktentwicklungen beteiligten Akteurinnen und Akteuren eine einfache und systematische Berücksichtigung kreislaufwirtschaftlicher und umweltrelevanter Informationen.

### 1 Einleitung

Im Produktentstehungsprozess (PEP) werden nicht nur spätere Kosten, sondern bereits auch der Großteil der Umweltwirkungen und die Kreislauffähigkeit zukünftiger Produkte und Services festgelegt. Die Analyse und Optimierung der Umwelleistung von Produkten erfolgen bislang jedoch häufig erst nach Fertigstellung eines Konstruktionskonzepts (Bender und Gericke 2021) und damit bereits für viele grundlegende Festlegungen zu spät. Industrielle Produktentwicklungs- und Konstruktionsprozesse müssen zukünftig den gesamten Lebensweg von Produkten von der Rohstoffförderung und Materialauswahl bis zum Ende des Lebenszyklus berücksichtigen, um neben den bisher üblichen Eigenschafts- und Nutzenprofilen der Produkte zusätzlich noch kreislaufwirtschaftliche Verbesserungen wie z.B. Lebenszeitverlängerung oder hochwertiges Recycling hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Klimafreundlichkeit und Ressourceneffizienz direkt und möglichst ohne Zusatzaufwand bewerten zu können.

Dies erfordert bei der Produktentwicklung prozessbegleitend anwendbare Bilanzierungsinstrumente und gleichzeitig die Berücksichtigung zirkulärer Geschäftsmodelle. Bisher fehlt es in diesem Aufgabenfeld noch an konkreten Lösungsansätzen (Tura et al. 2019), die praktisch anwendbar sind, eine hohe Nutzerakzeptanz erreichen und ein breites Produktspektrum adressieren können.

Um diese Anwendungs- und Forschungslücke weiter zu schließen hat sich das Forschungsvorhaben „DfC-Industry“<sup>1</sup> die Operationalisierung der „Design for Circularity“-Ansätze durch weitgehend automatisierte Berücksichtigung in industriellen Produktentstehungsprozessen zum Ziel gesetzt. Dies soll anhand eines auf kreislaufwirtschaftlichen und technisch orientierten Vorgaben basierenden Entscheidungsbaums für den industriellen PEP erreicht werden.

## 2 Forschungskontext und Methodenentwicklung

### 2.1 Design for Circularity

In Anlehnung an Kirchherr et al. (2017) wird die Kreislaufwirtschaft als ein Wirtschaftssystem verstanden, das das „End-of-Life“-Konzept durch die Reduzierung, die Wiederverwendung, das Recycling und die Rückgewinnung von Materialien in Produktions-/Vertriebs- und Verbrauchsprozessen ersetzt und dabei das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung verfolgt. Zirkularität („Circularity“) kann daher als vollständige Umsetzung bzw. Zielzustand der Kreislaufwirtschaft verstanden werden. Der Schlüssel für ein erfolgreiches Design for Circularity (DfC) liegt in der Art und Weise, wie Produkte entworfen und die verschiedenen Anforderungen der Kreislauffähigkeit erfüllt werden (Kamp Albæk et al. 2020).

Der Stand des Wissens zur CE wurde mittels Literaturanalysen erfasst. Die forschungsleitende These der Arbeiten war, dass die Kreislauffähigkeit lediglich zum Teil von produktinhärenten Eigenschaften bestimmt wird, jedoch zusätzlich von weiteren Faktoren wie z. B. Einflüssen während der Nutzungsphase oder auch den Geschäftsmodellen des Produkthanbieters oder Dritter abhängt. Daher wurden die Literaturanalysen-Ergebnisse insgesamt fünf Dimensionen zugeordnet, die zentrale Einflussfelder auf die Kreislauffähigkeit von Produkten widerspiegeln:

- Die Dimension „Marktrahmen“ bildet die gesetzliche Grundlage ab und enthält nationale sowie internationale Gesetze, Normen und Verordnungen.
- Die Dimension „Circular Business Models“ (CBM) umfasst zirkuläre Geschäftsmodelle und kreislaufwirtschaftliche Strategien (Geissdörfer et al. 2020; Lewandowski 2016; Lüdeke-Freund et al. 2018; Charter 2019; Hansen 2020; Ellen MacArthur Foundation 2013).
- „Ecodesign Approaches“ (Ökodesign-Ansätze) lassen sich als weitere Dimension aus der EU-Richtlinie 2009/125/EC (Europäische Kommission 2022) ableiten. Sie geben Orientierungspunkte für die Umsetzung von CE am Produkt, welche direkt im PEP Anwendung finden.
- Die Dimension „Life Cycle Intensity“ berücksichtigt, dass Produkte i. d. R. in nur einer oder wenigen ihrer Lebenszyklusphasen erhebliche Umweltwirkungen hervorrufen. (Wimmer und Züst 2001)
- Die Elemente in der Dimension „Indikatoren“ unterstützen die Quantifizierung und Evaluierung von Ecodesign-Ansätzen innerhalb des PEP.

<sup>1</sup> Das Projekt „DfC-Industry“ mit dem Förderkennzeichen FKZ 03EI5005A wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Förderprogramms Ressourceneffizienz im Kontext der Energiewende für die Projektlaufzeit vom 01.02.2022 – 31.01.2024 gefördert und durch den Projektträger Jülich begleitet. Die Projektpartner Robert Bosch GmbH, iPoint-systems GmbH und das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH/Smart Enterprise Engineering wirken an dem Projekt unter der Leitung des Instituts für Industrial Ecology (INEC) der Hochschule Pforzheim mit.



## 2.2 Entscheidungsunterstützung für ein Design for Circularity

Die Vielzahl der Dimensionen und Handlungsebenen stellt eine Herausforderung für die Operationalisierung des DfC im PEP dar. Entscheidungsmatrizen und Entscheidungsbäume können zur Strukturierung herangezogen werden und bieten eine gute Möglichkeit, Akteurinnen und Akteure im PEP praxisorientiert zu unterstützen. Eine Entscheidungsmatrix stellt Varianten gegenüber und bietet durch ein Bewertungsraster eine Entscheidungsunterstützung. Durch die Bewertung der Wechselwirkungen können Abhängigkeiten und Einflussfaktoren ermittelt werden. Evaluierte Matrizen dienen dann als Grundlage zur Erstellung eines Entscheidungsbaums zur Zirkularitäts-Bewertung. (Grünig und Kühn 2013)

Ein Entscheidungsbaum stellt den komplexen, mehrstufigen Entscheidungsprozess mit allen möglichen Entscheidungsoptionen transparent dar. Sein Nutzen entsteht durch die Visualisierung komplexer Entscheidungsprobleme und Zusammenhänge einzelner Elemente sowie die systematische und strukturierte Beschreibung aller Entscheidungsoptionen. (Schawel und Billing 2012)

Zur Unterstützung der Umsetzung eines DfC im PEP wurden die in Kapitel 2.1 dargestellten Dimensionen und Handlungsebenen verdichtet und in einen Entscheidungsbaum überführt, der schematisch in Abbildung 1 dargestellt ist. Der Entscheidungspfad führt zu technischen Prinzipien zur Umsetzung der Zirkularität („DfC Principles“) und ordnet passende konstruktive Lösungsansätze („Action items“) zu.

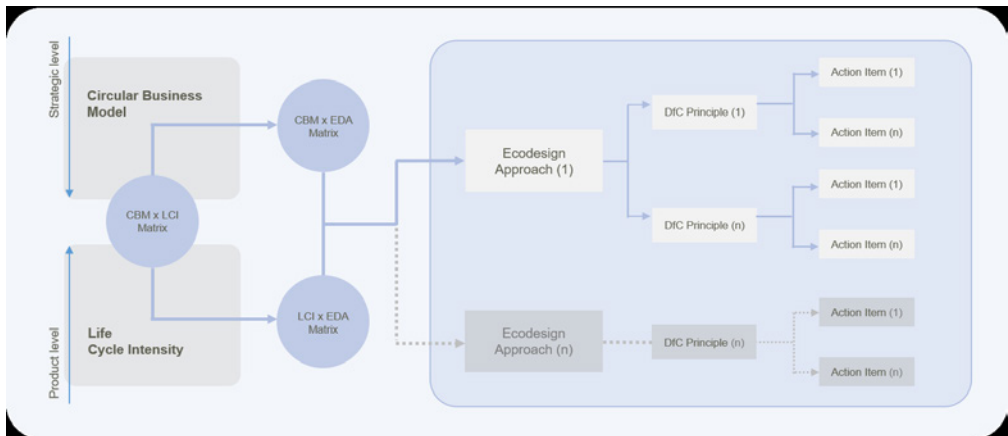


Abbildung 1: Entscheidungsablauf (schematisch) für industrielle Produktentwicklungsprozesse (CBM = Circular Business Model; LCI = Life Cycle Intensity; EDA = Ecodesign Approach; DfC Principle = Design for Circularity Principle)

Der mehrstufige Auswahlprozess innerhalb des Entscheidungsbaums wird durch die Berücksichtigung der drei Dimensionen Circular Business Models (CBM), Ecodesign Approaches (EDA) und Life Cycle Intensity (LCI) bestimmt. Die Kombination der Dimensionen erfolgte durch Matrizen, die während des Vorhabens jeweils durch mehrere Expertinnen und Experten für Kreislaufwirtschaft und Produktentwicklung aus Sicht von Wissenschaft und industrieller Entwicklungspraxis bewertet wurden:

- Die LCI x CBM-Matrix stellt Produktgruppen mit unterschiedlichen Phasenintensitäten (LCI) den CBM gegenüber. Hiermit kann die Leitfrage „Welche LCI-Produktgruppe ist für ein zirkuläres Geschäftsmodell besonders geeignet?“ beantwortet werden.
- Die LCI x EDA-Matrix stellt Produktgruppen mit unterschiedlichen Phasenintensitäten den Ecodesign Approaches gegenüber. Damit soll die Leitfrage „Welche Ecodesign-Ansätze sind bei welcher LCI-Produktgruppe besonders wirksam?“ beantwortet werden.
- Die CBM x EDA-Matrix kann die Leitfrage „Welche Ecodesign-Ansätze unterstützen welches zirkuläre Geschäftsmodell?“ beantworten.

Der methodische Ansatz des DfC-Vorhabens sieht nach dem Durchlaufen des Entscheidungsbaumes zunächst die Bereitstellung technischer bzw. konstruktiver Lösungsansätze zur konkreten Umsetzung der DfC-Prinzipien im PEP vor. Diese durch das Vorhaben bereitgestellten Informationen können und sollen dann in Unternehmen durch Materialvergleichslisten, Beständigkeitsbewertungen, Verfügbarkeitsinformationen zu Rezyklaten oder weitere, unternehmensspezifische Hinweise ergänzt werden. Bei Bedarf können die vorgeschlagenen Lösungen vom Entwicklungsteam z. B. durch einen paarweisen Vergleich der Zirkularitätskriterien priorisiert werden. In einer späteren Entwicklungsstufe ist vorgesehen, auch diese Priorisierung bevorzugt unter Nutzung bestehender Indikatorensysteme prozessintegriert und möglichst automatisiert bestimmen zu lassen.

Die PEP-Integration dieses Ansatzes ermöglicht den beteiligten Akteurinnen und Akteuren die einfache und systematische Berücksichtigung kreislaufwirtschaftlicher und umweltrelevanter Informationen und deren konstruktive Umsetzung. Der Entscheidungsbaum stellt dafür auf individuelle Produkte und Geschäftsmodelle der Anwender zugeschnittene Empfehlungen bereit. Dabei berücksichtigt er den Reifegrad der im Unternehmen bestehenden Innovations- und Produktentwicklungsprozesse.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH, dem Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH/Smart Enterprise Engineering sowie der iPoint-systems GmbH. Das Projekt DfC-Industry wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert und den Projektträger Jülich betreut. Auch ihnen gilt der Dank des Autorenteam. Die alleinige Verantwortung für diesen Text liegt bei den Autoren.

## Literatur/Quellen

Bender, B.; Gericke, K. (2021): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Charter, M. (2019): Designing for the circular economy. London, New York, NY: Routledge, 2019.

Ellen MacArthur Foundation (2013): Towards the Circular Economy. Economic and business rationale for an accelerated transition. Online verfügbar unter <https://emf.thirdlight.com/link/x8ay372a3r11-k6775n/@/preview/1?o>, zuletzt geprüft am 21.04.2022.

- Europäische Kommission (2022): Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC, vom 2022/0095.
- Geissdoerfer, M.; Pieroni M.; Pigosso, D.; Soufani, K. (2020): Circular business models: A review. In: Journal of Cleaner Production 277, S. 123741. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123741.
- Grünig, Rudolf und Kühn, Richard (2013): Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme. Ein heuristischer Ansatz. 4. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kamp Albaek, J.; Shabazi, S.; Mcaloone, T.; Pigosso, D. (2020): Circularity Evaluation of Alternative Concepts During Early Product Design and Development. In: Sustainability 12 (22), S. 9353. DOI: 10.3390/su12229353.
- Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. (2017): Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In: Resources, Conservation and Recycling 127, S. 221-232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- Lüdeke-Freund, F.; Gold, S.; Bocken, N. (2018): A Review and Typology of Circular Economy Business Model Patterns. In: Journal of Industrial Ecology 23 (1), S. 36-61. DOI: 10.1111/jiec.12763.
- Schawel, C.; Billing, F. (2012): Top 100 Management Tools. Das wichtigste Buch eines Managers: ABC-Analyse bis Zielvereinbarung. 4., überarb. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler
- Tura, N.; Hanski, J.; Ahola, T.; Stahle, M.; Piiparinen, S.; Valkokari, P. (2019): Unlocking circular business: A framework of barriers and drivers. In: Journal of Cleaner Production 212, S. 90-98. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.202.
- Wimmer, W.; Züst, R. (2001): Ecodesign-Pilot. Produkt-Innovations-, Lern- und Optimierungs-Tool für umweltgerechte Produktgestaltung - mit deutsch/englischer CD-ROM. Zürich: Verl. Industrielle Organisation.

## Kontakt

*Annika Pruhs, Wissenschaftliche Mitarbeiterin*  
Hochschule Pforzheim/ Institut für Industrial Ecology  
Tel.: +49 7231 28 6139  
annika.pruhs@hs-pforzheim.de  
<https://www.hs-pforzheim.de/>



## Charakterisierung von Kunststofffolien in ausgewählten Abfallströmen

**Abstract:** Mit dem Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft hat die EU ein ambitioniertes Programm vorgelegt, um Europa zukünftig umweltfreundlicher, wettbewerbsfähiger und wirtschaftlich unabhängiger von Importen zu machen (EC, 2020). Eine der Maßnahme, die dazu führen soll, sind Recyclingziele für die wichtigsten Abfälle, inklusive Verpackungen aus Kunststoff (EPR, 2018). Vor allem die im Verpackungsbereich sehr häufig eingesetzte Folienfraktion weist eine unklare Zusammensetzung auf, weshalb die Recyclingquote momentan noch nicht erfüllt werden kann. Ziel dieser Arbeit ist es durch entsprechende Sortieranalysen die Eigenschaften von Kunststofffolien in unterschiedlichen Abfallströmen zu erfassen um das Potential der möglichen Recyclingfähigkeit dieses Wertstoffes abzuschätzen. Hierzu wurden Folien aus vier ausgewählten kunststoffreichen Abfallströmen erfasst, die zunächst einer Trocknung und anschließend einer zweistufigen händischen Sortierung hinsichtlich Optik, Akustik und Haptik unterzogen wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem im Restmüll das Potential noch ausgeschöpft werden kann. In diesem Abfallstrom finden sich hauptsächlich Monolayer-Folien aus LDPE, wobei mehr als die Hälfte aufgrund ihrer Transparenz gut recyclingfähig wäre. Jedoch muss hierbei auch der hohe Wassergehalt und Anhaftungsgrad berücksichtigt werden. Letzteres könnte beispielsweise durch Wasch- und Aufbereitungsversuche zukünftig untersucht werden. Das in dieser Arbeit verwendete Konzept zur Charakterisierung von Kunststofffolien kann aber bereits als erste Hilfestellung für die Planung und Dimensionierung von Abfallbehandlungsverfahren genommen werden.

### 1 Einleitung

Laut BMK fallen in Österreich jährlich etwa 300.000 Tonnen an Kunststoffverpackungsabfällen an, wovon derzeit etwa nur ein Viertel dem mechanischen Recycling zugeführt wird (BMK, 2022). Neben PET-Flaschen sind Kunststofffolien aufgrund ihrer vielseitigen Eigenschaften und ihres geringen Gewichtes im Verpackungsbereich am häufigsten vertreten. Die Novelle der EU Verpackungsrichtlinie sieht eine Recyclingquote von mindestens 50 % bis 2025 und 55 % bis 2030 für Kunststoffverpackungen vor (EPR, 2018). Obwohl der Grad der getrennten Erfassung von Kunststofffolien in Österreich relativ hoch ist, liegt deren Recyclingquote mit 18 % noch weit unter dem gewünschten Ziel der EU (Van Eygen et al., 2018). Damit die ambitionierten Recyclingquoten der EU zeitnah erreicht werden können, müssen die einzelnen Bereiche der Abfallbehandlung optimiert werden, angefangen bei der getrennten Sammlung, über die Sortierung bis

zum eigentlichen Recycling. Um diese Schritte dementsprechend zu dimensionieren und zu verbessern ist die exakte Kenntnis über die Qualität des zu behandelnden Abfallstromes erforderlich. Vor allem die Folienfraktion weist eine unklare Zusammensetzung bzw. Eigenschaften auf, wodurch deren Recyclingrate aktuell nicht entsprechend angehoben werden kann. Vor diesem Hintergrund soll die vorliegende Arbeit durch Sortieranalysen unterschiedlicher Abfallströme ein Konzept für die Charakterisierung von Kunststofffolien in kunststoffreichen Abfallströmen liefern, welches zur Beurteilung der Recyclingfähigkeit dienen soll.

## 2 Methodik

### 2.1 Herstellen der Folienfraktionen

Im Zuge der Arbeit wurden insgesamt vier Abfallströme beprobt, die im Folgenden näher beschrieben sind:

- Abfallstrom 1 und 2: Hierfür wurden Stichproben aus dem Restmüll (1) und der getrennten Kunststoffsammlung (2) einer österreichischen Großstadt genommen und analysiert.
- Abfallstrom 3: In einer mechanischen Restmüllsortieranlage mit einer Behandlungsmenge von ca. 80.000 t/a wurden Proben aus der durch Siebung und ballistische Trennung erzeugten 2D-Fraktion (3) genommen.
- Abfallstrom 4: Aus einer weiteren mechanischen Restmüllsortieranlage (Behandlungsmenge von 200.000 t/a) wurden Proben aus einer kunststoffreichen Fraktion genommen, welche durch Siebung, Windsichtung und NIR-Abscheidung erzeugt wurde.

Aus diesen Abfallströmen wurde 2D-förmiges, dünnes (Wandstärke < 1 mm) Material als Kunststofffolien definiert. Hierzu zählen neben Verpackungsfolien und folienartige Verpackungen von Haushaltswaren und Lebensmitteln auch Nichtverpackungsfolien wie Müllbeutel. Biogene Folien und folienähnliche Materialverbunde aus z.B. Kunststoff und PPK wurden von der Untersuchung ausgeschlossen. Diese Kunststofffolien wurden im ersten Schritt aus den Proben händisch aussortiert.

### 2.2 Trocknungsverlust

Nach der Aussortierung der als Folien definierten Materialien aus den Proben der vier ausgewählten Abfallströme wurde der Wassergehalt der Folienfraktionen bestimmt, indem die Proben bei Hallentemperatur bis zur Massenstabilität getrocknet wurden. Bezogen auf die Feuchtmasse wurde anschließend der Wassergehalt bzw. Trocknungsverlust gemäß Formel 1 berechnet.

$$\text{Wassergehalt}_{\%} = \frac{\text{Feuchtmasse} - \text{Trockenmasse}}{\text{Feuchtmasse}} * 100\% \quad (1)$$

### 2.3 Sortieranalyse Ebene 1: Farbe und Aufdruck

In der ersten Sortierebene wurden die Folien nach Farbe und Bedruckung sortiert, unterschieden nach: farblos, farbig, schwarz, bedruckt und metallisiert. Als farblos werden unbedruckte Folien bezeichnet, welche transparent, opak oder weiß sind. Die Kategorie farbig umfasst alle mit Masterbatch eingefärbten, bunten Folien. Die Kategorie schwarz enthält dunkle, meist mit Ruß eingefärbte Folien. Bedruckt sind jene, welche einen Aufdruck in der Größe von mindestens 5 % der Gesamtoberfläche aufweisen. Metallisierte Folien, d.h.

mit Aluminium bedampfte oder laminierte Folienverbunde, wurden in dieser Sortierebene ebenso erfasst. Diese sind durch die metallisch-glänzende bzw. silberne Oberfläche optisch gut erkennbar und bilden die Ausnahme der erfassten Folienverbunde.

Überdies erfolgte die Sortierung nach Recyclingfähigkeit. Eine farbige bedruckte Folie wurde der Kategorie bedruckt zugeordnet, da diese schlechter rezyklierbar als rein farbige ohne Aufdruck sind. Die Hierarchie der Recyclebarkeit ist somit von sehr gut bis schlecht: farblos > farbige > bedruckt > schwarz > metallisiert.

## 2.4 Sortieranalyse Ebene 2: Polymertyp

In der nächsten Ebene wurden die Folien mit Ausnahme der metallisierten Folienverbunde nach Polymertyp mithilfe des in der Praxis bereits etablierten sogenannten Rascheltests sortiert. Hierbei wurden die Folien hinsichtlich ihrer Eigenschaften haptisch und auditiv in LDPE und PP unterschieden. Folien aus LDPE sind elastisch und dehnfähig und fühlen sich wachsartig und weich an. Folien aus PP sind hingegen steifer und rascheln (Wagener Verpackung GmbH). Bei der Durchführung wurden raschelnde Folien positiv aussortiert, der Hypothese nach bestehen diese aus PP, alle anderen aus LDPE. Weiters wurde das Rissverhalten zur Hilfestellung genommen. Ließ sich eine Folie mithilfe des Rascheltests nicht eindeutig in eine Kategorie einordnen, wurde händisch ein Riss initiiert. PP-Folien weisen hierbei ein spröderes Rissverhalten und eine höhere Weiterreißfestigkeit als LDPE-Folien auf. Multilayer-Folien wurden in dieser Ebene aufgrund ihrer Komplexität nicht betrachtet.

## Ergebnisse

Die Analysen der Abfallströme aus der Großstadt ergaben in der Folienfraktion aus dem Restmüll (Abfallstrom 1) einen Wassergehalt von 27 % und jener aus der getrennten Kunststoff-Sammlung (Abfallstrom 2) einen Wassergehalt von 12 %.

In Abbildung 1 wird die Zusammensetzung des Abfallstromes 3, nämlich die Folienfraktion des 2-D Outputstroms aus der ersten mechanischen Restmüllsortieranlage, welcher durch ballistische Separation erzeugt wurde, veranschaulicht. Hierbei ist mehr als die Hälfte der LDPE-Folien, welche in diesem Abfallstrom zu knapp 90 % vorzufinden sind, unbedruckt und nicht eingefärbt und somit gut recyclingfähig. Die Sortierung der Zusammensetzung der Folienfraktion aus dem kunststoffreichen Outputstrom der zweiten beprobten Restmüllsortieranlage (Abfallstrom 4), welche mit NIR-Sortierung ausgestattet ist, und die Analyse der Zusammensetzungen der Probenahmen der Großstadt liefern vergleichbare Ergebnisse, weshalb an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden soll.

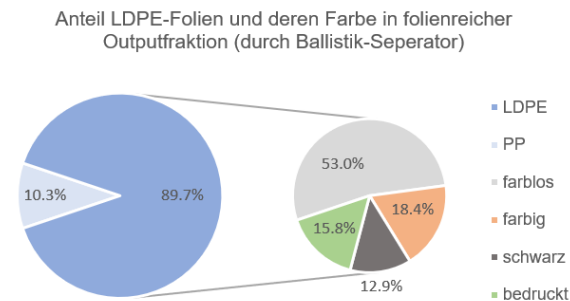


Abbildung 1: Zusammensetzung (in Gew.-%) der Folienfraktion des folienreichen Outputstroms einer Restmüllsortieranlage

## Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem Folien im Restmüll, welche überwiegend aus LDPE bestehen, ein hohes Recyclingpotential besitzen. Andererseits weisen die Folien aus diesem Abfallstrom einen hohen Wassergehalt und Verschmutzungsgrad auf, wobei letzteres beispielsweise durch Wasch- und Aufbereitungsprozesse zukünftig analysiert werden könnte. In diesem Zuge sollte daher auch der ökonomische Nutzen einer Aussortierung und Aufbereitung für mögliches Recycling dieses Materialstroms näher untersucht und bewertet werden. Zudem soll erwähnt werden, dass in der Arbeit ausschließlich Monolayer-Folien analysiert worden sind, wohingegen im Verpackungsbereich vorwiegend komplexe Mehrschichtfolien im Trend liegen. Hier gilt es künftig, ein neues bzw. erweitertes Sortierkonzept für eine schnelle und einfache Identifizierung und Charakterisierung dieser Folien zu entwickeln.

## Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist Teil der Forschungsinitiative CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften der TU Wien. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Gleichzeitig bedanken wir uns bei unseren Unternehmenspartnern Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoffrecycling Austria AG, Borealis AG, Brantner Österreich GmbH, Lenzing AG, Linz Service GmbH, MM Board and Paper AG, OMV Downstream GmbH, Wien Energie GmbH und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H., sowie bei der Magistratsabteilung Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien (MA 48).



## Literatur/Quellen

- BMK (2022): Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2022. Teil1; Entwurfsfassung zur Konsultation. Online verfügbar unter: [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/abfall/aws/bundes\\_awp/bawp2022.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/bundes_awp/bawp2022.html), 16.01.2023.
- EC (2020): A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe. European Commission (EC), Brussels
- EPR (2018): Richtlinie (EU) 2018/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle. Fundstelle: Amtsblatt der Europäischen Union. In: Amtsblatt der Europäischen Union L 150/141.
- Van Eygen, E. et al. (2018): Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in Austria, Waste Management 72, pp. 55-64
- Wagener Verpackung GmbH: Verpackungslexikon. Online verfügbar unter <https://www.wagener-verpackung.de/verpackungslexikon>, zuletzt geprüft am 16.01.2023

## Kontakt

*Ricarda Rainer, studentische Mitarbeiterin*

Technische Universität Wien / Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften, Christian Doppler Labor für eine Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft

Tel.-Nr. +43 660 5196971

E-Mail: [ricarda.rainer@tuwien.ac.at](mailto:ricarda.rainer@tuwien.ac.at)

Homepage: <https://www.tuwien.at/tch/icebe>



## RFID-Tool zur Partikelverfolgung in der Abfallwirtschaft

**Abstract:** Die Abfallwirtschaft befindet sich seit einigen Jahren in einem digitalen Wandel. Als zentrale Aufgabe gilt es Behandlungsprozesse zu optimieren, das allerdings eine Echtzeitcharakterisierung der Abfälle in Behandlungsanlagen erfordert. Darüber hinaus ist es aufgrund der hochfrequenten Schwankungen der Abfalleigenschaften erforderlich, Daten von unterschiedlichen Messstellen in einer Anlage demselben Abfall zuzuordnen und ein geeignetes Prozessverständnis aufzubauen, um diese beispielsweise für das Training von Machine-Learning Modellen nutzen zu können. Ziel dieser sensorischen Überwachung von Materialströmen ist es, in Zukunft Anlagen so zu optimieren, damit mit einer solchen Heterogenität von Abfällen leichter und effizienter umgegangen werden kann. Von der zentralen Fragestellung her entspricht diese Partikelüberwachung einer Verweilzeitmessung. Dafür gibt es noch kein etabliertes Messverfahren im Bereich der mechanischen Aufbereitung fester Abfälle. Ein hohes Potential dafür haben allerdings RFID-basierte Techniken, welche für die Verfolgung einzelner Partikel in einem Abfallstrom durch eine Anlage genutzt werden können. In der vorliegenden Arbeit soll kurz die Hardware, der Versuchsaufbau sowie erste Einsatzerfahrungen im Zusammenhang mit relevanten Forschungsfragen vorgestellt werden.

### 1 Einleitung

Die Versuche der vorliegenden Arbeit wurden im Rahmen des Projektes Rewaste F in einem Entsorgungsunternehmen in der Obersteiermark in Österreich durchgeführt. Rewaste F ist ein Nachfolgeprojekt von Rewaste 4.0, das die Basis für die Forschungsschwerpunkte bildet und eine Weiterentwicklung in Richtung partikel-, sensor- und datenbasierten Kreislaufwirtschaft ermöglicht (Sarc & Pomberger, 2021).

Die einfachste Möglichkeit RFID in einem Materialstrom einzubinden, ist es, sogenannte passive Tags an die Partikel anzubringen und diese dann zu identifizieren. Bei RFID handelt es sich um die englische Abkürzung Radio Frequency Identification, die den Übergriff für eine Reihe von Technologien bildet, auf der die Übertragung von Mikrowellen im Radiofrequenzbereich basieren und zur Identifikation von Objekten bzw. auch als Datenaustausch verwendet werden (National Research Council, 2004). Ein RFID-System (siehe Abb. 1) besteht dabei aus drei Komponenten: den RFID-Tags – spezielle Etiketten, wo die ID des Partikels gespeichert wird, eine Antenne zur Übertragung von Signalen und ein Lesegerät zum Schreiben und Auslesen von gespeicherten Daten (Finkenzeller, 2015).

Die Anwendungsgebiete von RFID sind sehr breit gefächert, von der Identifizierung und Überwachung von Personen, Tieren und Gegenständen bis hin zur Logistik, Supply Chain Management und Gesundheitsmanagement sowie unseren tagtäglichen Bezahlssystemen (Abad et al., 2009). Im Bereich der Abfallwirtschaft hat RFID Potential, als attraktive Lösung Partikel kontaktlos zu identifizieren und somit auch zu verfolgen. Damit verbunden sind allerdings noch diverse Forschungsfragen wie die Detektionszuverlässigkeit und die Genauigkeit der Zeitmessung.

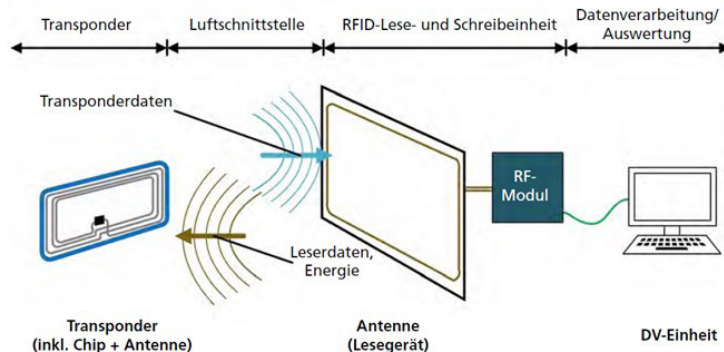


Abbildung 1: Allgemeiner Aufbau eines RFID-Systems (Kern, 2007)

## 2 Methodik und Diskussion der ersten Ergebnisse

### 2.1 Aufbau und Durchführung der Versuche

Für die Versuche wurden ausgewählte Partikel mit RFID-Tags versehen und anschließend in unterschiedlichen Bereichen der Anlage in den Materialstrom eingebunden, wo sie dann von den installierten RFID-Antennen im besten Fall detektiert wurden. (siehe Abb. 2)

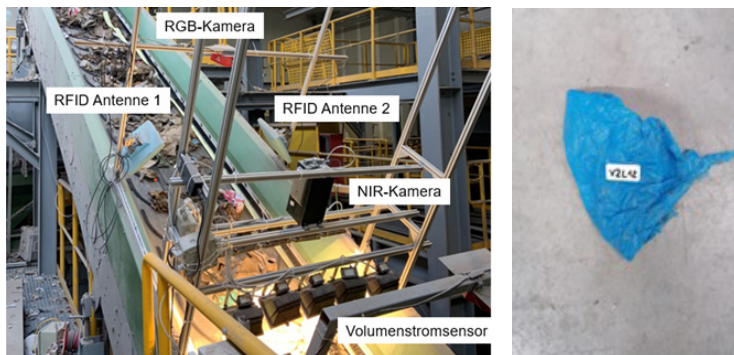


Abbildung 2: Teilausschnitt der Anlagenversuche: RFID-Antennen werden zusätzlich noch mit einer NIR & RGB-Kamera sowie Volumenstromsensor unterstützt. Rechts: Beispiel für ein Leichtgutpartikel im Versuch (Foto: © Rewaste F)

Hierbei wurden passive Tags mit Ultra High Frequency (UHF) verwendet, da sie eine kostengünstige Variante bilden und die Leserate mit zunehmender Frequenz steigt (Kern, 2007). In den ersten Versuchen wurde zwischen Leichtgut- und Schwergutfraktion unterschieden, die später für andere Fragestellungen von Relevanz sind.

Zur Erkennung der jeweiligen Partikel wird die im Tag gespeicherte, individuelle ID-Nummer beim Passieren der Leseinheit elektromagnetisch ausgelesen und somit ein Zeitstempel von den RFID-Antennen erfasst. Die Antennen haben eine relativ große Streuungsweite, sodass einem Partikel mehrere Zeitstempel in einem kurzen Abschnitt zugewiesen werden. Die generierten Daten wurden dann in einer geeigneten Entwicklungsumgebung zunächst einer umfangreichen Datenaufbereitung sowie anschließenden Analyse unterzogen.

## 2.2 Datenanalyse

Ziel dieser Datenanalyse bzw. Visualisierung ist es, eine Aussage über die Detektionshäufigkeiten von RFID-Tags in einem Materialstrom zu treffen bzw. die Überlebensraten zu beobachten. Dazu sind unterschiedliche Modelle zur Beurteilung über die statistische Verteilung anzuwenden und Ausreißeranalysen durchzuführen, um mögliche Ansätze in Richtung der Machine-Modelling Algorithmen zu tätigen. In den abgebildeten Quantile-Quantile (QQ)-Plots (siehe Abb. 3) kann eine erste Verteilung der im Rahmen eines Versuches gemessenen Datenpunkte beobachtet werden. Diese folgt am ehesten einer Normalverteilung, mit einigen wenigen Ausreißern. Die Aussage wird zusätzlich von einem positiven Shapiro Wilk Test bestätigt. Für die Ausreißerdetektion gibt es bereits geeignete Verfahren (z.B. IQR,  $3\sigma$ -Rule, z-score), die auf Vertrauenswürdigkeit und Vorhersagegenauigkeit geprüft werden. Um einen einfachen Verteilungsvergleich zu realisieren, ist ein Box Plot die einfachste Methode. Dabei werden nur diejenigen Messwerte, die außerhalb des dreifachen IQR-Bereiches um den Median liegen, als Ausreißer identifiziert (Miranda, 2010).

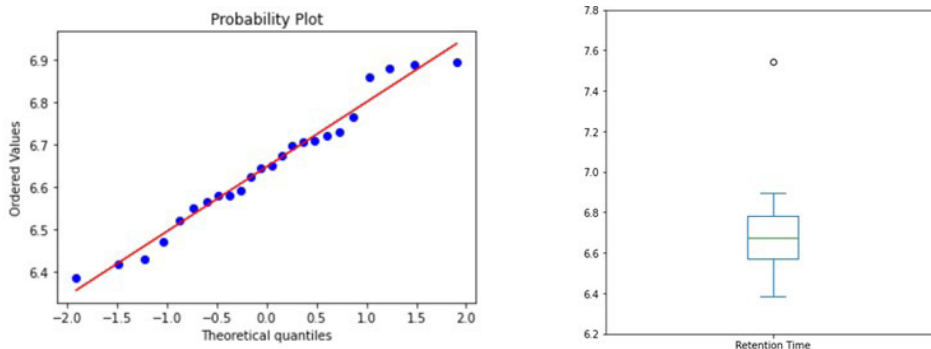


Abbildung 3: Links: QQ-Plot des ersten Versuches. Rechts: Box Plot für die Verweilzeitmessung und bereits möglicher Ausreißeridentifikation

Die bisherigen Auswertungen liefern bereits erste vielversprechende Ergebnisse, die eine gute Basis für weitere Optimierungen im Bereich der Prozessüberwachung liefern könnten. Eine Maschinen- und Prozessüberwachung bietet die Möglichkeit Daten zu generieren, auf deren Grundlage die Anlagenperformance gesteigert wird und so eine Reduktion von Energieverbräuchen erreicht werden kann (Kroell et al. 2022a).

Außerdem können durch diese Überwachungsmodelle weitere Maschinenparameter aufgedeckt werden, die einen hohen Einfluss auf den Anlagenbetrieb haben.

## Danksagung

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

## Literatur/Quellen

- Abad, E.; Palacio, F.; Nuin, M.; Zárate, A. González de; Juarros, A.; Gómez, J. M.; Marco, S. (2009): RFID smart tag for traceability and cold chain monitoring of foods: Demonstration in an intercontinental fresh fish logistic chain. In Journal of Food Engineering 93 (4), pp. 394–399.
- Finkenzeller, Klaus (2015): RFID-Handbuch. Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. 7., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser.
- Kern, Christian (2007): Anwendung von RFID-Systemen. 2., verb. Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch).
- Kroell, N., Chen, X., Greiff, K., Feil, A. (2022a) Optical sensors and machine learning algorithms in sensor-based material flow characterization for mechanical recycling processes: A systematic literature review. Waste management (New York, N.Y.) Volume 149, S. 259–290. DOI:10.1016/j.wasman.2022.05.015
- Miranda, J. W. (2010). *Data Mining Anomalieentdeckung*. Technischer Bericht, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig.
- National Research Council (2004): Radio frequency identification technologies. A workshop summary. Washington, DC.: National Academies Press.
- Sarc, R., Pomberger, R. (2021) „ReWaste4.0“– Abfallwirtschaftliches Kompetenzzentrum am AVAW der Montanuniversität Leoben. Leoben: Processes, 2021, 9 (5), 764. doi:<https://doi.org/10.3390/pr9050764>.

## Kontakt

Alisa Rizvan, BSc. (studentische Mitarbeiterin)

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

+43 660/ 61 00 229

[alisa.rizvan@unileoben.ac.at](mailto:alisa.rizvan@unileoben.ac.at)

[https://www.avaw-unileoben.at/de/forschung-ag\\_poa/](https://www.avaw-unileoben.at/de/forschung-ag_poa/)

## Innovative Recyclingmöglichkeiten für ausgediente Lithium-Ionen Energiespeichersysteme

**Abstract:** *FuLiBatteR, ein Modul koordiniert von der K1-MET GmbH, dass im Rahmen des österreichischen Kompetenzzentrums COMET der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft gefördert wird, untersucht die Steigerung der Recyclingfähigkeit von Lithium-Ionen-Batterien (LIBs). Dabei soll neben den gängigen Inhaltsstoffen wie Aluminium, Kupfer, Kobalt, Mangan und Nickel besonders auf die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe wie Lithium, Phosphor, Silizium und Graphit geachtet werden. Das unmittelbare Ergebnis am Ende des Moduls ist die Weiterentwicklung und Kombination bestehender Verfahren aus den Bereichen Pyrometallurgie, (Bio)Hydrometallurgie und mechanischer Vorbehandlung zu einer Best-Practice-Behandlungsrouten. Diese Route wird am Ende der Projektzeit einer ökologischen Bewertung im Vergleich zum LIBRES/Redux Referenzverfahren unterzogen, um Maßnahmen brach liegender Verbesserungspotentiale für das LIB-Recycling aufzuzeigen. Stoffkreisläufe kritischer Rohstoffe werden geschlossen und die Versorgungssicherheit der darauf angewiesenen Industriezweige verbessert. Durch die Erhebung der ökologischen Auswirkungen werden Daten generiert, die bisher nicht oder kaum öffentlich zugänglich waren. Das ermöglicht die Diskussion über ökologisch sinnvolles LIB-Recycling im Sinne einer nachhaltigen Produktion.*

### 1 Einleitung

Je mehr Lithium-Ionen-Batterien (LIB) durch die E-Mobilität zum Einsatz kommen, desto schwieriger wird es, die dafür notwendigen Rohstoffe zu beschaffen. Eine Möglichkeit, den Bedarf für die Produktion in Europa (EU) abzufedern, besteht im Recycling ausgedienter Energiespeichersysteme. Momentan gibt es mehrere unterschiedliche Verfahren, die auf diesem Bereich als Stand der Technik (SdT) gelten

Die SdT-Batterie-Recyclingverfahren konzentrieren sich hauptsächlich auf die mechanische Behandlung mit optionaler vorheriger thermischen Zelleaktivierung (Pyrolyse). Das erleichtert die spätere Handhabung durch Zerstörung des leicht entzündlichen Elektrolyten und Versprödung des an den Elektrodenableiterfolien anhaftenden Aktivmaterials. Das so gewonnene Aktivmaterial ist ein feinkörniges schwarzes Pulver, das bis zu 70 Gew.-% der Batteriemasse ausmacht (Arnberger, et al., 2018). Es besteht hauptsächlich aus pulverförmigem Kohlenstoff (C) und enthält die kritischen Elemente Lithium (Li), Phosphor (P), Kobalt (Co), und Silizium (Si) (hauptsächlich aus neuen Elektrodenmaterialien) sowie weitere wirtschaftlich wichtige Metalle, wie Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Mangan (Mn) in unterschiedlichen Konzentrationen. Bisherige

Forschungsarbeiten ergaben, dass je nach angewandter Methode der mechanischen Behandlung, Unterschiede in der Zusammensetzung, den physikalischen Eigenschaften und dem Gehalt an Verunreinigungen vorliegen (Windisch-Kern, et al., 2021). Nach der mechanischen Vorbehandlung wird das Aktivmaterial später an nachgelagerte Recyclingpartner zur Weiterverarbeitung durch pyrometallurgische oder hydrometallurgische Verfahren übergeben.

In kommerziellen pyrometallurgischen Verwertungswegen wie zum Beispiel in Anlagen der Umicore NV/SA (Buchert & Sutter, 2020) werden die ausgedienten LIBs ohne Vorbehandlung durch direkten Einsatz in pyrometallurgischen Hochtemperaturöfen verarbeitet. Elemente, wie Li, C und Mn, werden nicht selektiv zurückgewonnen, sondern gehen als Emissionen verloren oder landen in der Prozessschlacke. Da der Aufwand für die Metallrückgewinnung aus Schlacken hoch und der wirtschaftliche Nutzen eher gering ist, wird die sogenannte mineralische Phase häufig entsorgt, in der Regel auf Deponien. Die darin enthaltenen Metalle können daher nicht in den Stoffkreislauf rückgeführt werden. Darüber hinaus ist eine alternative Anwendung in der Bauindustrie, z. B. als Straßenbaumaterial, das mit Oberflächen-, Poren- und Grundwasser interagiert, aber aufgrund gesetzlicher Beschränkungen des Gehaltes an leicht löslichen Stoffen in Österreich nicht möglich (BMLFUW, 2015).

Bei der hydrometallurgischen Aufbereitung von Aktivmaterialien werden die Metalloxide gelöst, während der Graphit als fester Rückstand abgetrennt wird. Die Rückgewinnung von Graphit ist von wachsender Bedeutung, da die LIB-Produktion in den nächsten Jahren weiter ansteigen wird und weiterhin ein gewisses Versorgungsrisiko darstellt.

Schließlich wird die anstehende Novellierung der Batterieverordnung höhere Sammelquoten von 65-70 % für LIB sowie höhere Recyclingquoten als die derzeitige von 50 % aus der letzten gültigen Fassung fordern (z. B. 90 % Verwertung von Co, Cu und Ni, 35 % Verwertung von Li im Jahr 2025 und noch höhere Ziele für 2030 (Europäische Kommission, 2020)), was den politischen Druck für Recyclingaktivitäten weiter erhöht.

Die Umweltauswirkungen von LIBs sind ebenfalls von Interesse. Die Produktion ist ressourcenintensiv, und einige Rohstoffe stammen aus Ländern mit einem hohen Risiko von Versorgungsengpässen (Europäische Kommission, 2020). Darüber hinaus kann die Umwelt- und Humantoxizität der hergestellten Produkte und Rückstände verringert werden. Insgesamt wird die Wiederverwendung zurückgewonnener Sekundärrohstoffe in der industriellen Produktion als sehr günstig angesehen, muss aber den Anforderungen an den Input genügen (Mohr, et al., 2020; Unterreiner, et al., 2016). Daher muss die Forschung innovative, effiziente, und nachhaltige Recyclingverfahren entwickeln.

Das von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft geförderte COMET-Modul FuLIBatteR möchte hier das fehlende Bindeglied zur Schließung von Stoffkreisläufen und vorhandenen Datenlücken für Entscheidungsträger sein. Das Projekt mit einer Laufzeit von vier Jahren (gestartet am 1.7.2022) hat das Ziel, unterschiedliche Rückgewinnungsmöglichkeiten von Rohstoffen aus dem Aktivmaterial von LIB zu untersuchen und neue Möglichkeiten der Recyclingeffizienzsteigerung aufzuzeigen. In drei Sub-projekten beschäftigen sich wissenschaftliche und Unternehmenspartner aus Österreich, Deutschland und England mit physikalischen (Sub-Projekt 1), pyrometallurgischen (Sub-Projekt 2) bis hin zu bio-hydrometallurgisch-elektrochemischen (Sub-Projekt3) Aufbereitungsprozessen. Hauptaugenmerk liegt auf der Rückgewinnung der Elemente Li, Co, P, Graphit (laut EU als kritische Rohstoffe eingestuft), den Wertmetallen Ni, Co und Mn, sowie Si aus neuen LIB-Systemen.



Alle Teilprojekte wird durch das Querschnittsthema der ökologischen Bewertung verbunden. Dabei soll ein Maßnahmenkatalog beziehungsweise eine Grundlage für Entscheidungsträger und Anlagenbetreiber im Sinne nachhaltiger Batterieproduktion und Batterierecycling entstehen. Im Rahmen der im ersten Subprojekt entstehenden Dissertation sollen daher primär folgende Forschungsfragen beantwortet werden.

**Forschungsfrage 1:** Inwiefern lassen sich die LIB-Recyclingquoten in den drei Verfahrensbereichen Aufbereitung, Pyrometallurgie und Biohydrometallurgie im Vergleich zum gewählten Referenzverfahren durch die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse steigern?

**Forschungsfrage 2:** Wie wirken sich die untersuchten LIB-Recyclingverfahren auf die Umwelt aus und welches ist im Vergleich als am ökologisch vorteilhaftesten zu bewerten?

## **2 Methodik**

### **2.1 Ökologische Bewertung**

Die ISO-Normen 14040 und 14044 bieten einen wichtigen Rahmen für die Ökobilanzierung. Dieser Rahmen überlässt jedoch den einzelnen Experten, Praktikern und Datenentwicklern eine Reihe wichtiger Entscheidungen, die individuell interpretiert werden können, was zu Unterschieden in der Konsistenz, Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit der Bewertungsergebnisse führt. Auch die methodischen Annahmen, die den Lebenszyklusdaten zugrunde liegen, können sehr unterschiedlich sein, so dass die Daten aus verschiedenen Quellen nicht miteinander kompatibel sein können. Aus diesen Gründen wurde beschlossen den Regeln aus dem Handbuch des Europäischen Joint Research Center bezüglich ökologischer Bewertungen (Europäische Kommission, 2010) zu folgen. In Tabelle 1 werden die ersten Überlegungen hinsichtlich Zielsetzung der ökologischen Bewertung dargestellt. Im nächsten Schritt sollen der Betrachtungsraum und die zu erhebenden Daten festgelegt werden.

Tabelle 1: Die sechs Aspekte der Zielsetzung einer Lebenszyklusanalyse

Nr.	Aspekt der Zieldefinition	Kategorie	Anwendung in der Ökologischen Bewertung
1	Beabsichtigte(r) Verwendungszweck(e) der Ergebnisse	a. Vergleich einer bestimmten Dienstleistung b. Strategieentwicklung: Vorhersage und Analyse der Umweltauswirkungen allgegenwärtiger Technologien, Rohstoffstrategien usw.	a. Vergleich verschiedener LIB Recyclingprozesse b. Recycling von kritischen Rohstoffen
2	Limitierungen auf Grund der Methode, Annahmen und Einschränkung der Auswirkungen	a. Das untersuchte System b. Geographische Beschränkung c. Produkte	a. Beschränkung auf die Erforschung der Umweltauswirkungen des Recyclings von LIB; es wird davon ausgegangen, dass die Rohstoffgewinnung, die Produktions- und Nutzungsphase von LIB im Durchschnitt für alle EoL-LIB ähnlich ist und keinen signifikanten Beitrag zur Gesamtdarstellung in dem gewählten Betrachtungsraum liefert b. Die Europäische Union c. Annahme eines für den EU-Elektromobilitätsmarkt typischen LIB-Mix
3	Gründe für die Durchführung der Studie und Entscheidungskontext	a. Treiber und Motivation	a. Quantifizierung von Umweltauswirkungen untersuchter LIB-Recyclingprozesse b. Unterstützung bei der Entscheidung über nicht bindende Empfehlungen für eine ökologisch bevorzugte künftige Handhabung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien in der Europäischen Union

## Danksagung

Die Autorin bedankt sich bei der K1-MET GmbH, dem Kompetenzzentrum für Metallurgie, für die finanzielle Unterstützung. FuLiBatter ist ein COMET (Competence Center for Excellent Technologies) Modul aus dem österreichischen Kompetenzzentren-Programm der FFG. Es wird gefördert durch das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, das Bundesministerium für Arbeit und Wirtschaft, die Bundesländer Oberösterreich und Steiermark und durch die Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft (SFG). Des Weiteren wird K1-MET von der Upper Austrian Research GmbH unterstützt. Neben der öffentlichen Förderung wird dieses Forschungsprojekt durch die Unternehmenspartner Audi AG, BRAIN Biotech AG, Ebner Industrieofenbau GmbH, RHI Magnesita GmbH, Saubermacher Dienstleistungs AG, TÜV SÜD Landesgesellschaft Österreich GmbH, und voestalpine High Performance Metals GmbH, sowie die wissenschaftlichen Partner acib, Coventry University, Montanuniversität Leoben, Universität für Bodenkultur und UVR-FIA unterstützt.

## Literatur/Quellen

- Arnberger, A., Rutrecht, B. & Coskun, E., 2018. Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. In: T. V. K. Thomé-Kosmiensky, Hrsg. *Recycling und Rohstoffe*. s.l.:s.n.
- BMLFUW, 2015. *Recycling-Baustoffverordnung*. BGBl. II, Nr. 181/2015.
- Buchert, M. & Sutter, J., 2020. *Stand und Perspektiven des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität*, Darmstadt: Ökoinsitut e. V..
- Europäische Kommission, 2020. Study on the EU's list of Critical Raw Materials – Final Report, Brüssel, Belgien: EC.
- Europäische Kommission, E., 2020. *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020*, Brüssel, Belgien: EC.
- Europäische Kommission – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability. 2010. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance*. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010
- Mohr, M., Peters, J. F., Baumann, M. & Well, M., 2020. Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes. *Industrial Ecology*, 24(6), pp. 1310-1322.
- Unterreiner, L., Jülch, V. & Reith, S., 2016. Recycling of Battery Technologies – Ecological Impact Analysis Using Life Cycle Assessment (LCA). *Energy Procedia*, Issue 99, pp. 229-234..
- Windisch-Kern, S. et al., 2021. Recycling chains for lithium-ion batteries: A critical examination of current challenges, opportunities and process dependencies. *Waste Management*, Issue 138, pp. 125-139.

## Kontakt

DI Bettina Rutrecht, Wissenschaftliche Mitarbeiterin K1-MET GmbH

Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel.-Nr. 0043 664 5908522 / 0043 3842 402 2274

E-Mail: [bettina.rutrecht@k1-met.com](mailto:bettina.rutrecht@k1-met.com)

Homepage: [www.k1-met.com](http://www.k1-met.com)



## **Schlüsselfaktoren für den Umweltnutzen der Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft: Status quo und zukünftige Trends**

**Abstract:** *Jährlich fallen in Deutschland in Privathaushalten etwa 2.500 kt Kunststoffverpackungsabfälle an. Die Behandlung dieser Abfälle folgt dem Grundsatz Materialkreisläufe zu schließen und schädliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu reduzieren. Um langfristige Schlüsselfaktoren für den Umweltnutzen der Kunststoffverpackungsabfallbewirtschaftung zu identifizieren, wurden die Umweltauswirkungen der Bewirtschaftung von Kunststoffverpackungsabfällen quantifiziert und relevante Faktoren mittels einer Perturbationsanalyse bestimmt. In Zukunftsszenarien wurden zu erwartende Veränderungen der Material- und Energiesysteme infolge von Maßnahmen zur Begrenzung der Globalen Erwärmung entsprechend des Pariser Klimaabkommens berücksichtigt. Die Studie belegt, dass die Analyse von Umweltauswirkungsmechanismen vor dem Hintergrund sich verändernder Randbedingungen grundlegend für die Identifizierung ökologisch langfristig vorteilhafter Abfallbewirtschaftungsstrategien ist.*

### **1 Einleitung**

In Deutschland fallen jährlich etwa 2.500 kt Kunststoffverpackungen in privaten Haushalten als Abfall an. Obwohl Kunststoffverpackungen aufgrund ihrer Herstellung aus fossilen Rohstoffen und ihres Beitrags zur Meeresvermüllung in der Kritik stehen, werden diese weiterhin beispielsweise im Lebensmittelverpackungssektor eingesetzt, da sie vielfältige Barrierefunktionen erfüllen und somit zur Verlängerung der Lebensdauer von verpackten Lebensmitteln und zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen beitragen. Nach der Nutzungsphase fallen Kunststoffverpackungen als Abfälle an, deren Behandlung nach dem Grundsatz erfolgt, Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu minimieren und Materialkreisläufe zu schließen. Das Ziel der dargestellten Studie ist es, die Umweltauswirkungen der deutschen Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft zu quantifizieren und Schlüsselfaktoren zu identifizieren, die die Umweltauswirkungen der Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft in Deutschland heute und zukünftig maßgeblich beeinflussen.

### **2 Methodik**

Die Ökobilanzierung ist ein standardisiertes Verfahren zur Quantifizierung von Umweltauswirkungen, die über den Lebensweg eines Produktes oder einer Dienstleistung entstehen (siehe ILCD 2010; DIN EN ISO 14040:2006; DIN EN ISO 14044:2006). Das Ziel der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Ökobilanz war es, die Umweltauswirkungen der Bewirtschaftung von Kunststoffverpackungsabfällen, die im Jahr

2017 in Privathaushalten anfielen, zu quantifizieren. Entsprechend wurde die Behandlung der angefallenen Kunststoffverpackungsabfälle als funktionelle Einheit festgelegt. Die Kunststoffverpackungsabfälle stehen ohne ökologischen Rucksack zur Verfügung („zero burden assumption“). Alle anderen Inputs in die Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft, z.B. in Form von Energie, Brennstoffen oder Materialien wurden angerechnet. Die Koproduktion von Rezyklaten oder genutzter Energie aus der thermischen Verwertung wurde durch Systemerweiterung (subtraktiver Ansatz) berücksichtigt. Für diese Koprodukte wurden funktionsäquivalente Produkte identifiziert, die für das betrachtete Jahr und Gebiet durchschnittliche Produkte widerspiegeln (attributive Ökobilanz). Zur Berücksichtigung der Koproduktion von Materialien wurden massenbasierte Substitutionsfaktoren genutzt, für Energie- und Brennstoffsubstitutionen wurden die Substitutionsfaktoren heizwertäquivalent ermittelt. Die Umweltauswirkungen wurden anhand von 16 Wirkungskategorien (Globale Erwärmung, Ozonabbau, Humantoxizität (karzinogen und nicht-karzinogen), Feinstaub, Ionisierende Strahlung, Photochemische Ozonbildung, Terrestrische Versauerung, Terrestrische Eutrophierung, Eutrophierung der Meere, Ökotoxizität, Landnutzung, Ressourcenverbrauch (Wasser, Mineralien und Metalle, fossil)) quantifiziert und anhand von globalen Normalisierungsfaktoren in Personen-äquivalente umgerechnet. Im Ökobilanzmodell wurde zwischen sechs Materialien (starre Kunststoffe aus PE-HD, PP, PET, PS und EPS sowie Folien) sowie fünf Abfallbehandlungspfaden unterschieden (siehe Abbildung 1). Zu den Behandlungspfaden zählen die Aufbereitung von über das Mehrwegpfandsystem gesammelten Flaschen (TP1), das Recycling von Flaschen aus dem Einwegpfandsystem (TP2), die Sortierung und Verwertung von Abfällen aus der Leichtverpackungsabfallsammlung (TP3) sowie die thermische Verwertung (TP4) oder mechanisch-biologische Behandlung (TP5) von über den Restabfall erfassten Fehlwürfen. Inventardaten zur Beschreibung des Systems wurden diversen Studien, Statistiken und der ecoinvent-Datenbank (v3.7.1, cut-off) entnommen und an die Ergebnisse einer Materialflussanalyse der Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft in Deutschland angepasst (basierend auf Schmidt und Laner 2021, siehe Schmidt und Laner (eingereicht) für eine detaillierte Beschreibung der genutzten Datenquellen).

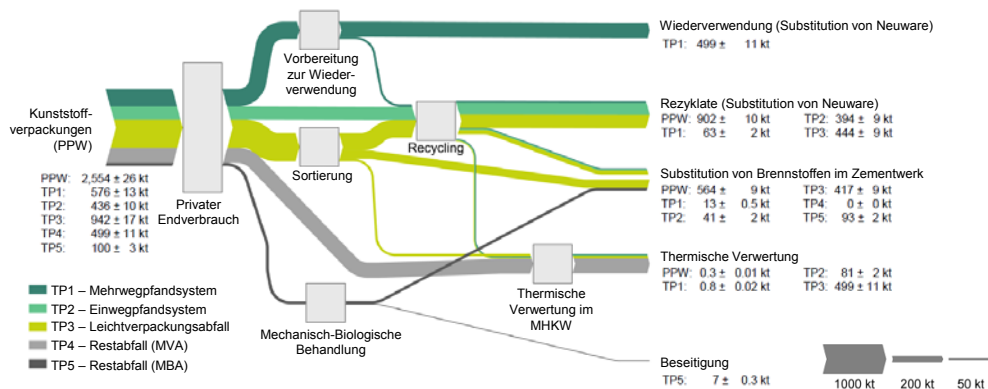


Abbildung 1: Bewirtschaftung von Kunststoffverpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2017

Zur Berechnung der Ökobilanz wurde das Python-Paket Brightway2 (Mutel 2017) genutzt. Um potentielle zukünftige Trends bezüglich der Umweltauswirkungen der Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft abzuschätzen, wurden die Hintergrunddaten der Ökobilanz mithilfe des Python-Pakets premise (Sacchi et al. 2022) entsprechend einer in Hinblick auf das Pariser Abkommen, das eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C vorsieht (UN 2015), zu erwartenden Transformation von Material- und Energiesystemen angepasst. Die tatsächliche Gestaltung und Umsetzung in verschiedenen Industriesektoren hängt insbesondere von politischen Entscheidungen ab. Die in dieser Studie verwendeten Zukunftsszenarien basieren auf den Ergebnissen des integrierten Bewertungsmodells IMAGE v3.2 (Stehfest et al. 2014), das auch als Grundlage für die Sachstandsberichte des Weltklimarats (IPCC) genutzt wird.

Schlüsselfaktoren für den Umweltutzen der Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft wurden anhand einer Perturbationsanalyse bestimmt, bei der die Ökobilanz für inkrementelle Änderungen jedes einzelnen Parameters wiederholt wurde, während alle anderen Parameter unverändert blieben („One-At-A-Time-Approach“, Clavreul et al. 2012). Die Ergebnisse der Perturbationsanalyse wurden anhand von Sensitivitätsquoten ausgewertet. Diese berechnen sich aus dem Verhältnis der relativen Änderung der Ökobilanzergebnisse zur relativen Parameteränderung. Entsprechend weist beispielsweise eine Sensitivitätsquote von 10% darauf hin, dass eine Parametersteigerung um 50% zu einer Änderung des Ökobilanzergebnisses um 5% führt. Um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern, wurden die Parameter entsprechend ihrer Verwendung im Ökobilanzmodell in Parameterkategorien eingeteilt.

### 3 Ergebnisse

Die Bewirtschaftung von Kunststoffverpackungsabfällen trägt in allen 16 betrachteten Wirkungskategorien zur Verringerung von Umweltauswirkungen bei. Während die Behandlung getrennt gesammelter Kunststoffverpackungsabfälle (TP1-TP3) in allen Wirkungskategorien zu Gutschriften führt, resultiert die Behandlung von Kunststoffverpackungen, die als Fehlwürfe über den Restabfall erfasst wurden, in den Wirkungskategorien Globale Erwärmung (siehe Abbildung 2a) und Ressourcenverbrauch (Wasser) zu Umweltbelastungen (siehe Schmidt und Laner (eingereicht) für eine Darstellung der Ergebnisse in allen Wirkungskategorien). Dabei ist die mechanisch-biologische Behandlung mit anschließender Nutzung der Kunststoffe als Ersatzbrennstoff in Zementwerken (TP5) der direkten Abfallverbrennung (TP4) aufgrund der höheren Gutschriften für die Substitution fossiler Brennstoffe vorzuziehen. Die größten Entlastungsbeiträge werden durch die Wiederverwendung und das Recycling getrennt gesammelter Kunststoffverpackungsabfälle erzielt. Auch unter den sich bis ins Jahr 2050 stark verändernden Rahmenbedingungen trägt die Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft zur Verringerung von Umweltauswirkungen bei, allerdings ist aufgrund sinkender Gutschriften für die Substitution von Brennstoffen, Energie und Materialien in 10 der 16 betrachteten Wirkungskategorien ein Rückgang des Umweltutzens der Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft zu beobachten. Während in Bezug auf die thermische Verwertung von Kunststoffverpackungsabfällen in Müllverbrennungsanlagen die Erzeugung von Strom und Wärme geringere Gutschriften einbringt, wirken sich die fossilen Kohlendioxidemissionen aus der Müllverbrennung stärker belastend auf die Netto-Bilanz der Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft in Deutschland aus (siehe Abbildung 2b).

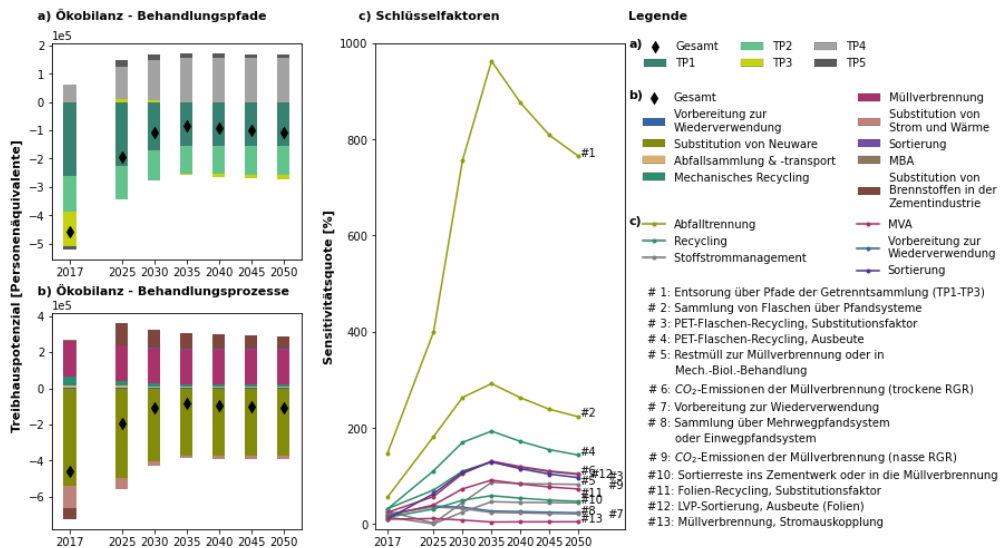


Abbildung 2: Umweltauswirkungen und Schlüsselfaktoren der Bewirtschaftung von Kunststoffverpackungsabfällen in der Kategorie Globale Erwärmung

Die Perturbationsanalyse zeigte, dass in Bezug auf die Globale Erwärmung 13 von 273 Parametern Sensitivitätsquoten von mehr als 10% aufwiesen (siehe Abbildung 2c). Getrenntsammlungsparameter sind in allen Wirkungskategorien relevant und gewinnen zukünftig noch stärker an Bedeutung. Weitere Schlüsselfaktoren, die in den Zukunftsszenarien ein größeres Gewicht erlangen, sind die Menge und Qualität erzeugter Rezyklate. Außerdem wurden auch die Energierückgewinnung aus der thermischen Verwertung von Restabfällen und Reststoffen aus mechanischen Aufbereitungsprozessen als Schlüsselfaktoren für die Umweltauswirkungen identifiziert. Hingegen spielen Änderungen bezüglich des Transports oder des Hilfsgüterverbrauchs nur eine untergeordnete Rolle.

## 4 Fazit

Die Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft trägt zur Reduktion von Umweltauswirkungen bei. Dieser Umwelt-nutzen wird voraussichtlich auch zukünftig selbst unter stark veränderten Randbedingungen erhalten bleiben. Potentielle Strategien zur Optimierung des Umweltnutzens der Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft sollten auf langfristige Schlüsselfaktoren abzielen. Solche Faktoren, die aufgrund des zu erwartenden Rückgangs von Gutschriften aus der thermischen Verwertung weiter an Bedeutung gewinnen, sind insbesondere die Separierung von Kunststoffverpackungsabfällen vom Restabfall (in Haushalten oder Abfallbehandlungsanlagen) sowie die Steigerung von Rezyklatmengen und -qualitäten. Tiefgehende Analysen von Umweltauswirkungsmechanismen vor dem Hintergrund sich verändernder Randbedingungen, wie in dieser Studie sind grundlegend für die Identifikation optimaler Abfallbewirtschaftungskonzepte und sollten auf weitere Fallstudien ausgeweitet werden, um Entscheidungsunterstützung zur Gestaltung der Abfallwirtschaft aus ökologischer Sicht bereitzustellen.



## Literatur

- Clavreul, J.; Guyonnet, D.; Christensen, T. H. (2012): Quantifying uncertainty in LCA-modelling of waste management systems. Waste management. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.07.008.
- DIN EN ISO 14040:2006: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.
- DIN EN ISO 14044:2006: Environmental Management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.
- ILCD (2010): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide on LCA - Detailed guidance. Joint Research Center of the European Union.
- Mutel, C. (2017): Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment. The Journal of Open Source Software. DOI: 10.21105/joss.00236.
- Sacchi, R.; Terlouw, T.; Siala, K.; Dirnaichner, A.; Bauer, C.; Cox, B. et al. (2022): PRospective EnvironMental Impact asSEment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models. Renewable and Sustainable Energy Reviews. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112311.
- Schmidt, S.; Laner, D. (2021): The multidimensional effects of single-use and packaging plastic strategies on German household waste management. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.06.003.
- Schmidt, S.; Laner, D. (eingereicht): Environmental Performance of Plastic Packaging Waste Management in Germany: Current and Future Key Factors.
- Stehfest, Elke; van Vuuren, Detlef P.; Kram, Tom; Bouwman, Lex (2014): Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0. Model description and policy applications.
- UN (2015): Paris Agreement. [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf).

## Kontakt

*Sarah Schmidt, M.Sc., Wissenschaftliche Mitarbeiterin*

Universität Kassel

Tel.-Nr. +49-561-804-3954

E-Mail: [sarah.schmidt@uni-kassel.de](mailto:sarah.schmidt@uni-kassel.de)

Homepage: [www.uni-kassel.de/go/RMAT/](http://www.uni-kassel.de/go/RMAT/)



# Konstruktion und Bau eines Wärmeüberträgers zur Evaluation von Machine-Learning-Tools für den digitalen Zwilling in der Verfahrenstechnik

**Abstract:** Obwohl es zum Bereich Wärmeübertragung zahlreiche zuverlässige Fachliteratur mit sehr genauen Berechnungsmethoden gibt, fehlt gerade im Bereich der Wärmeübertragung am querumströmten Rohrbündel eine hinreichend genaue Methodik. Der VDI-Wärmeatlas spricht für seine iterative Berechnung von Abweichung um ca.  $\pm 20\%$ . Zur genaueren Analyse und besseren Prognose wird ein modularer Prüfstand konstruiert und gebaut, an welchem der Wärmeübergang am querumströmten Rohrbündel untersucht werden kann. Ziel ist es, anhand dieses Prüfstandes Wärmeübertragungsversuche unter variablen Bedingungen mit veränderlichen Eingangsgrößen durchzuführen und durch passend eingesetzte Messtechnik Daten zu erheben, welche zum Trainieren eines künstlich neuronalen Netzes (KNN) dienen und zur gleichzeitigen Erstellung eines digitalen Zwillings des Prüfstandes. Somit sollen sich weitere Prognosen im KNN durchführen lassen und dadurch zuverlässige, genaue Berechnungen zum Wärmeübergang angefertigt werden.

## 1 Einleitung

Der Wärmeübergang an einem querumströmten Rohrbündel ist von vielen einzelnen Faktoren abhängig. Zum einen beeinflusst der Heißluftstrom in seiner Kapazität als auch in seiner Anströmung die Wärmeübertragung, aber auch das zu erwärmende Medium, in diesem Fall Wasser im Rohrbündel, hat einen entscheidenden Einfluss mit seinem Fließverhalten, der Strömungsgeschwindigkeit und der Eintrittstemperatur. Diese Faktoren müssen für eine zuverlässige Betrachtung einstellbar und auf einem konstanten Wert zu halten sein. Des Weiteren ist die Anordnung des Rohrbündels für die Berechnung des Wärmeübergangs nach dem VDI-Wärmeatlas von großer Wichtigkeit, aber auch für die fluiddynamische Betrachtung und das Wärmeübergangsverhalten in der Realität. In den unteren Reihen des Rohrbündels, also denen, welche als Erstes angeströmt werden und an welchen auch als Erstes Wärmeübergang stattfindet, herrschen große Verwirbelungen des anströmenden Fluids. Dadurch verändert sich das Wärmeübergangsverhalten in den ersten fünf Rohrreihen stark. Erst danach stellen sich konstante Bedingungen für die nachfolgenden Rohrreihen ein [VDIG13]. Wichtig hierbei ist der Abstand der Rohre zueinander, also welches Hohlraumvolumen sich zwischen den Rohren einstellt. Auch ausschlaggebend ist die Lage der Rohre zueinander und zur Strömung. Idealerweise liegen die Rohre fluchtend zueinander und verdecken sich nicht von einer Ebene zur nächsten. Zudem sollte aber der Zwischenspalt in der Flucht nicht zu groß sein, um Kurzschlussströmungen oder Toträume zu vermeiden. Diese Faktoren lassen sich allerdings schwer innerhalb einer Iterationsberechnung betrachten, wodurch es zu großen Schwankungen in den Ergebnissen kommt. Es bedarf

umfassenderer numerischer Methoden in Form eines KNN (=künstlich neuronales Netz). Der Prüfstand wird so konzipiert, dass umfassende Daten des Wärmeübertragungsvorganges gemessen werden können und diese dem KNN nicht nur als Trainingsdaten dienen, sondern dieses auch einen Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangsdaten des Prüfstandes herstellt und somit bei Eingabe neuer Eingangsdaten die daraus resultierenden Ausgangsdaten berechnet und dies im Vergleich zur iterativen Methode des VDIs mit weniger Abweichungen. Mittels der Trainingsdaten kann so ein digitaler Zwilling des Prüfstandes im künstlich neuronalen Netz erstellt werden, anhand dessen sich verlässliche Prognosen für weitere Wärmeübergangsvorgänge aufstellen lassen. Die Eingangsdaten können so beliebig variiert werden, was auch den Dimensionierungsvorgang von weiteren querumströmten Rohrbündel-Wärmeüberträgern vereinfacht.

## 2 Methodik

### 2.1 Dimensionierung und Konstruktion des Rohrbündels

Um den Prüfstand konstruieren zu können, müssen zunächst Vorberechnungen durchgeführt werden, welche die Dimensionierung des Rohrbündels und daraus resultierend auch des Strömungskanals ermöglichen. Hierzu wird mithilfe vorgegebener Randbedingungen der Wärmeübergang an einem einzelnen, querumströmten Rohr mittels numerischer Methoden in der Programmiersprache Python berechnet. Die vorgegebenen Randbedingungen sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt:

*Tabelle 1: Vorgegebene Randbedingungen*

Vorgabe	Wert	Einheit
Wassereintrittstemperatur	15	°C
Wasseraustrittstemperatur	50	°C
Elektrische Wärmeleistung	2000	W
Rohrlänge	0,05 bis 0,2	m

Die Rohrlänge ist so vorgegeben, dass der Prüfstand möglichst kompakte Maße einhält. Über die Abhängigkeitsberechnung aller für den Wärmeübergang nötigen Werte (Rohrdurchmesser, Wärmeleitfähigkeit des Materials, Strömungsgeschwindigkeit etc.) mittels der kalorimetrischen Zustandsgleichung und der Wärmeübergangsgleichung werden so aus einem großen Wertebereich die benötigten Größen ermittelt.

Mit den Maßen wird in einem 3D-Konstruktionsprogramm der Prüfstand Bauteil für Bauteil entworfen. Aus den berechneten Werten für ein einzelnes Rohr werden die Maße des Rohrbündels abgeleitet und die Rohrlänge gibt Auskunft über den nötigen Querschnitt des Strömungskanals. Des Weiteren werden anhand der berechneten Werte weitere Bauteile recherchiert wie beispielsweise ein Axialventilator. Zum Ende wird ein erstes Modell erstellt.

## 2.2 Bau des Prüfstandes

Mithilfe der nun ermittelten Dimensionen und dem ersten Modell werden benötigte Materialien wie ein Aluminium-Vierkant für den Strömungskanal bestellt und diese dann so bearbeitet, dass sie zusammengefügt werden können. Wichtig ist hierfür auch die Vorgabe, dass der Prüfstand nicht nur kompakt sein soll, sondern auch modular, um ihn besser transportieren zu können und in Zukunft auch weitere Versionen von Rohrbündeln oder Wärmeüberträgern im Allgemeinen einsetzen zu können. Ebenso wird die Wartung vereinfacht. Die Verbindungen einzelner Elemente müssen so ausgelegt werden, dass sie die Bauteile fixieren und gegebenenfalls abdichten, sie aber ebenso ohne größeren Aufwand aufzulösen sind.

### 2.2.1 Wasserverteilsystem

Zur Gewährleistung gleichmäßig verteilter Strömung im Rohrbündel und konstanter Strömungsgeschwindigkeiten wird zudem ein Wasserverteilsystem entwickelt. Hierzu wird ein Sammelbehälter entworfen, an welchen die Hauptwasserleitung des Prozesswassers angebunden ist. Ein künstlicher Strömungswiderstand wird eingebaut und sorgt für eine gleichmäßige Ausbreitung der Strömung im Sammelraum. Dies ermöglicht die Aufteilung der Strömung auf die einzelnen Ausgänge für das Rohrbündel und sorgt für gleiche Strömungsgeschwindigkeiten und konstante Bedingungen in den Einzelrohren. Zum Entwurf des Wasserverteilsystems wird ein Modell erstellt, welches in einem Fluidsimulations-Programm getestet und anschließend weiterbearbeitet wird, bis die Simulationen zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Es werden somit Abweichungen in den Strömungsgeschwindigkeiten in den Einzelrohren von unter 8% erreicht. Nachfolgend ist ein 3D-Modell des Sammelbehälters abgebildet. Das Wasserverteilsystem stellt die direkte Verbindung zwischen Hauptwasserleitung und Rohrbündel / Wärmeüberträger dar. Ohne dieses wäre die Ausführung des Prüfstandes zum Zweck der Datenerhebung nicht möglich.

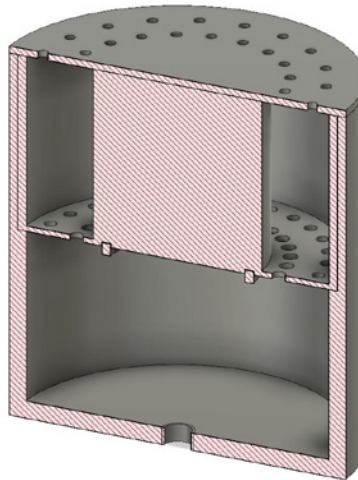


Abbildung 1: 3D-Modell des Wasserverteilsystems im Schnitt.

### 2.2.2 Zusammenbau des Prüfstandes

Die fertigen Einzelemente des Prüfstandes werden nach Abbildung 2 zusammengesetzt. Der Strömungskanal und das Wasserverteilsystem werden als fertige Baugruppen angesehen und durch Pneumatikschläuche miteinander verbunden. Der Strömungskanal ist so entworfen, dass er in drei Einzelteile zerlegt werden kann, welche per Stecksystem aufeinander sitzen und die Bauteile automatisch passend aufeinander ausrichten. Mittels verschiedener Fittings können die Elemente der Hauptwasserleitung mit den Messsystemen sowie dem Wasserverteilsystem verbunden werden. Wie dem Verfahrensfließbild zu entnehmen ist, werden an vier Stellen Temperaturen gemessen. Dies sind die Eintritts- und Austrittstemperaturen der Prozessluft und des Prozesswassers, zwischen welchen die Wärmeübertragung stattfindet. Für die Temperaturen des Prozesswassers lässt sich die Stelle der Messung variieren, sodass an verschiedenen Rohren des Rohr-bündels gemessen wird. Dies ist auch an mehreren Rohren gleichzeitig möglich, um bessere Vergleichsdaten zu erhalten. Des Weiteren wird die Strömungsgeschwindigkeit in der Hauptwasserleitung sowohl analog als auch digital gemessen und die Steuerung des Axiallüfters verläuft direkt über ein Computerprogramm, wodurch die Strömungsgeschwindigkeit der Luft zu ermitteln ist.

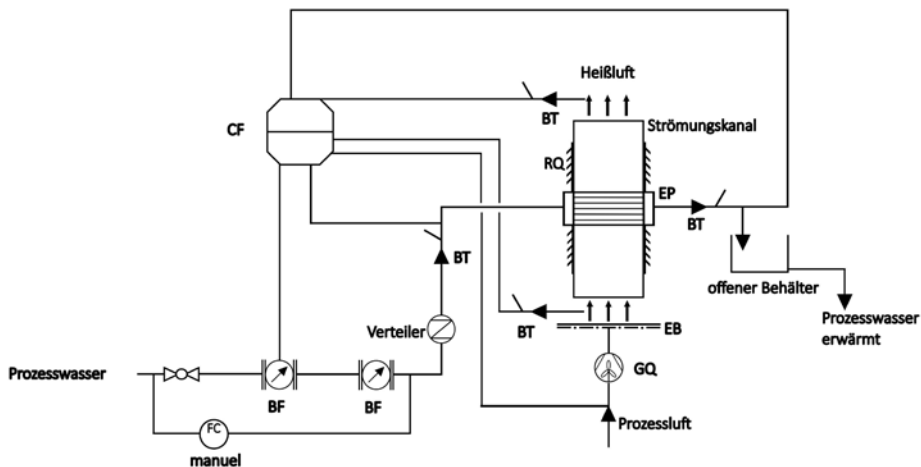


Abbildung 2: Verfahrensfließbild des Prüfstandes.

Alle erhobenen Daten werden über einen längeren Zeitraum und unter unterschiedlichen Einstellungen entnommen. Somit kann eine große Referenzmenge an Trainingsdaten in das künstlich neuronale Netz eingespeist werden und es können umfangreiche Analysen durchgeführt werden. Dies bietet ebenso eine große Datengrundlage für weitere Prognosen.

### Danksagung

Unterstützt wurde ich bei dieser Arbeit durch Prof. Dr.-Ing Christian Gierend und Sebastian Georg. Beide standen mir mit ihrer Expertise zur Seite und halfen bei der Umsetzung der Konstruktion sowie dem Weiterentwickeln erster Entwürfe.

## **Literatur/Quellen**

[VDIG13] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas, 11. bearbeitete und erweiterte Auflage Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013

## **Kontakt**

*Leon Schneider, HiWi-Angestellter zur Bachelorthesis (z.B. wissenschaftliche/r MitarbeiterIn)*

Universität / Institution: Hochschule für Technik und Wirtschaft Saarbrücken

Tel.-Nr.: +491739594157

E-Mail: lschneider2909@gmail.com





## Re-Use im Bausektor: Abfallvermeidung oder Vorbereitung zur Wiederverwendung?

**Abstract:** *Aus der gebauten Umwelt resultieren große Anteile des globalen Abfallaufkommens sowie der globalen Treibhausgasemissionen. Zur Reduzierung dieser Umweltwirkungen wird die Wiederverwendung von Bauprodukten und Gebäuden als Teil eines Lösungsansatzes diskutiert. Anhand der Untersuchung von vier Fallbeispielen wird ein Charakterisierungsmodell zur abfallwirtschaftlichen Einordnung der Wiederverwendung von Bauprodukten entwickelt. Zudem werden materialbezogene Umweltwirkungen des Inputs berücksichtigt. Dafür erfolgt die Systematisierung der Wiederverwendung in Input, Wiederverwendungsprozess und Output. Teil der Charakterisierung ist die Zuordnung zu Abfallhierarchieebenen sowie die vereinfachte Darstellung von materialbezogenen Umweltwirkungen.*

### 1 Einleitung

Die gebaute Umwelt stellt, bezogen auf die Masse, das größte anthropogene Lager dar, welches zudem stetig wächst. Gleichzeitig stellen, mit einem Massenanteil von 55%, Bau- und Abbruchabfälle den größten Anteil anfallender Abfälle in Deutschland dar (Statistisches Bundesamt 2022). Die Emissionen aus dem Gebäude- und Bausektor machen 38 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus (Global Alliance for Buildings and Construction 2020).

Die Abfallvermeidung (V) in Form der Wiederverwendung (Wv) von Erzeugnissen und Nebenprodukten ohne Abfalleigenschaft und die Vorbereitung zur Wiederverwendung (VzWv) von Abfällen können als hochwertige Maßnahmen der europäischen Abfallhierarchie zur Reduzierung dieser Umweltwirkungen der Baubranche beitragen. Auf diese Weise können Bauprodukte, deren Herstellung in der Vergangenheit Emissionen verursacht hat, wiederverwendet werden, wodurch Primärrohstoffe substituiert und für die Herstellung notwendige Emissionen vermieden werden. Beispiele hierfür sind die Wv von Gebäudekomplexen (Abbey et al. 2022), (Charlotte et al. 2022) und die Wv von einzelnen Bauelementen (Küpfer et al. 2022).

Informationen über die Wv erlauben die Einordnung auf der Abfallhierarchie als V oder VzWv. Die korrekte Einordnung auf der Abfallhierarchie ist relevant, um stattfindende Prozesse messbar zu machen und die Wv als relevanten Lösungsansatz auch in Konkurrenz zum Recycling zu positionieren. Die Relevanz der Wv wird zudem dann deutlich, wenn sichtbar wird, welche Emissionen mit der Herstellung von Neuware verbunden sind, welche durch die Wv substituiert werden könnten.

Aus dieser Forschungslücke wird der Bedarf nach Konzepten zur abfallwirtschaftlichen und umweltbezogenen Charakterisierung der Wv im Bausektor abgeleitet. Ziel der Studie ist die Entwicklung eines entsprechenden

Charakterisierungsmodells für Maßnahmen der Wv im Bausektor mit einer vereinfachten Darstellung von materialbezogenen Umweltwirkungen.

Die Durchführung der Studie erfolgt im Rahmen des Projektes „Epizentrum Bauwende – Experimental-architektur für Potsdam“, welches unter anderem die Wv als Element des nachhaltigen Bauens im Rahmen der Errichtung eines Forschungspavillons in Potsdam untersucht.

## 2 Material und Methoden

Für die zielgerichtete Charakterisierung wird der Prozess der Wv in die separaten Bestandteile Input, Wiederverwendungsprozess und Output unterteilt. Da sich durch die Wv relevante Eigenschaften eines Bauproduktes wie z.B. die Funktion oder die Zusammensetzung ändern können, erlaubt die separate Betrachtung diese Veränderungen zwischen Input und Output darzustellen. Beispielsweise kann ein Brett (Altholz) als Bodenbelag wiederverwendet werden.

### 2.1 Struktur des Charakterisierungsmodell und Datenmodell

Das Charakterisierungsmodell wurde in Microsoft Excel entwickelt. Abbildung 1 stellt die verwendete Datenstruktur in Form eines Entity-Relationship-Diagramms (ERD) dar. Die Datenstruktur verfügt über drei Hierarchieebenen. Abgebildet wird die separate Betrachtung von 1) Input 2) Wiederverwendungsprozess und 3) Output. Hauptkategorien sind relevante Aspekte wie z.B. 1.2) „Herkunft und Qualität“. Die Hauptkategorien enthalten spezifische Informationen in Subkategorien, z.B. 1.2.1) „Typ Herkunft“. Es werden Codelisten mit harmonisierten Antwortoptionen genutzt.

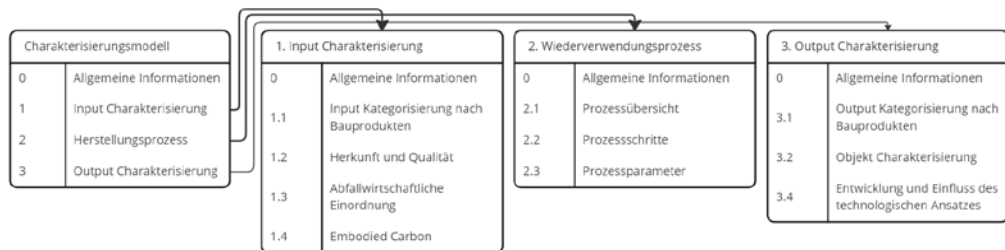


Abbildung 1: ERD des Charakterisierungsmodells zur Darstellung der ermittelten Faktoren.  
Die Darstellung ist in Input, Output und Wiederverwendungsprozess unterteilt.

### 2.2 Input Charakterisierung

Die Charakterisierung des Inputs in die Wv erfolgt entsprechend des Datenmodells in Abb. 1 und nutzt die abgebildete Nummerierung: 1.1) Der Input wird nach den Produktkategorien der ÖKOBAUDAT kategorisiert, wodurch die Anschlussfähigkeit and das Bauwesen hergestellt wird (Figl 2019). Dafür steht ein Kategorisierungssystem mit 432 Einzelkategorien in der ÖKOBAUDAT zur Verfügung. Die ÖKOBAUDAT ist eine Datenbank von Umweltproduktdeklarationen (EPD) von Baustoffen und Bauprodukten. 1.2) Die Beschreibung der Herkunft und Qualität des Inputs basiert auf Informationen aus Fragebögen und

Interviews. Es werden zudem Informationen über die Homogenität und eine potenzielle Kontamination des Inputs erfasst und bewertet.

In der ÖKOBAUDAT gelisteten EPDs enthalten u.a. Ökobilanzdaten, welche den Bauprodukten entlang von Lebenswegmodulen nach EN 15804 zugeordnet werden. Diese Lebenswegmodule bilden die relevanten Lebensphasen eines Bauproduktes von der Herstellung (Module: A1 - A5), über die Nutzung (Module: B1 - B5) bis hin zur Entsorgung (Module: C1 – C4) ab. Anhand der Lebensphasen wird es möglich die Emissionen eines Bauproduktes einer konkreten Phase (z.B. der Herstellung in A3) zuzuordnen. Diese Lebenswegmodule werden im entwickelten Charakterisierungsmodell zur abfallwirtschaftlichen Einordnung der Wv in 1.3) genutzt. Die Einordnung basiert auf den in 1.2) gesammelten Informationen über die Herkunft und die Qualität des Inputs. Mit diesen lässt sich bewerten, ob es sich bei dem Input um ein handelbares Produkt, ein Nebenprodukt oder um einen Abfall nach KrWG handelt. Die Wv eines Produktes oder Nebenproduktes begründet die Zuordnung zur V. Liegt die Abfalleigenschaft vor, muss durch die VzWv das Ende der Abfalleigenschaft herbeigeführt werden. Anhand der beschriebenen Lebenswegmodule nach EN 15804 wird der reguläre Eintritt der Abfalleigenschaft eines Produktes lokalisiert und visualisiert. Z.B. entsteht entlang des Lebensweges einer Holztür im Modul A3 „Herstellung“ Holzverschnitt als Abfall. Dieser Verschnitt kann als Nebenprodukt den Input für eine Wv darstellen, wodurch es sich um die V handelt.

Zur vereinfachten Darstellung von Umweltwirkungen der Wv wird der Indikator *Embodied Carbon* (EC) in 1.4) genutzt. Der Indikator wird häufig im Kontext der Bewertung von Bauprodukten verwendet und stellt die freigesetzten Emissionen eines Bauproduktes entlang der Herstellung in kg CO<sub>2</sub> Äquivalentemissionen pro kg Material dar (cradel-to-gate). Mit der „Inventory of Carbon and Energy Database“ (ICE Database) (<https://circularecology.com/>) steht eine umfangreiche Datenbank für EC von Bauprodukten zur Verfügung. Die ICE Database fasst Daten aus europäischen EPD-Datenblättern zusammen und bildet diese als EC von Bauprodukten ab (Circular Ecology 2019). Zudem wird die Speicherung von Kohlenstoff im Material berücksichtigt. Die im Input verwendeten Materialien werden aus der ICE Database extrahiert und abgebildet. Im Fall von Verbundprodukten werden die Massenanteile der Hauptmaterialien berücksichtigt.

### 2.3 Wiederverwendungsprozess

Die Betrachtung des praktischen Wiederverwendungsprozesses ermöglicht das Verständnis der einzelnen Prozessschritte. In 2.1) werden Hilfsstoffe, entstandene Reststoffe und verwendete Maschinen dargestellt. In 2.2) werden Prozessschritte aufgelistet und mit Fließbildern ergänzt. Informationen über die Arbeitszeit und Prozessemissionen haben einen Einfluss auf die Umweltbewertung, die Wirtschaftlichkeit und die Skalierbarkeit der Wv und werden in 2.3) Prozessparameter ergänzt.

### 2.4 Output

Output der Wv ist ein Bauprodukt. In 3.1) erfolgt erneut die Kategorisierung als Bauprodukt um Veränderungen im Nutzungszweck festzustellen. In 3.2) wird der Output präzise beschrieben, indem u.a. die Funktion, die Zusammensetzung und das Gewicht angegeben werden. Zusätzlich wird der Output bzgl. Entwicklungsstatus und Einflusspotenzial des technologischen Ansatzes in 3.3) bewertet. Die vereinfachte Bewertung der Umweltwirkung basiert auf der Berechnung des EC im Input, welcher in dem Output wiederverwendet wird. Hierfür ist die Masse des Inputmaterials notwendig, welches für den Wiederverwendungsprozess genutzt wird. Hilfsstoffe und Energieverbrauch werden nicht berücksichtigt.

## 2.5 Exemplarische Wiederverwendungsprozesse

Charakterisiert werden vier Wiederverwendungsprozesse von Bauprodukten. Input und Output der Wv werden in Tabelle 1 dargestellt. Informationen über die Wv werden mittels Fragebögen und Interviews von den Produzenten erfasst und im Anschluss in das Charakterisierungsmodell eingearbeitet.

*Tabelle 1: Auflistung von Input Materialien und Output für die exemplarischen Wiederverwendungsprozesse*

Nr.	Input Material	Output
1	Verschnitt von Furnierschichtholzplatten	Innenraumtrennwände mit Regalfunktion
2	Ausgebaute Flügelfenster	Statische Fenstermodule/ Glaswände
3	Verschnitt von Aluminium-Verbundplatten	Al- PE Boxen
4	Bauschutt/ Beton Abbruch	Künstlerische Geopolymer Beton Elemente

### 3 Ergebnisse & Diskussion

Die Ergebnisse der Charakterisierung werden in Tabelle 2 zusammenfassend dargestellt. Die untersuchten Fallbeispiele unterscheiden sich in Herkunft, Materialzusammensetzung, Abfallentstehungsgrund und in der Funktion. Der Verschnitt der Aluminium-Verbundplatten und der Furnierschichtholzplatten liegt als Nebenprodukt aus einem Produktionsprozess vor. Durch die Wv der Nebenprodukte wird somit Abfall vermieden. Die Holzfenster werden sowohl mit ohne Abfalleigenschaft bezogen und sind deshalb der V und der VzWv zugeordnet. Bei dem Betonabbruch liegt die Abfalleigenschaft vor. Da die Wv als Geopolymer

*Tabelle 2: Zusammenfassung von Untersuchungsergebnissen. Dargestellt werden die folgenden Informationen:*

1. Input in die Wv; 2. EC im Input in die Wv; 3. Lokalisierung der Abfallentstehung mittels Lebenswegmodulen nach EN 15804; 4. Output aus der Wv; 5. Abfallwirtschaftliche Einordnung der Wv.

1. Input		2. Embodied Carbon - im Input		3. Lokalisierung der Abfallentstehung des Inputs																4. Output (Wiederverwendung)		5. Abfallwirtschaftliche Einordnung		
Legende:				Herstellungsphase				Bauphase				Nutzungsphase				Entsorgungsphase						Abfallhierarchie-Ebenen		
Code:	Bedeutung:	(kg CO2e/ kg)		A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4			1	2	3		
	Lebensphase*	Ohne Berücksichtigung von Kohlenstoff-speicherung	Mit Berücksichtigung von Kohlenstoff-speicherung	Rohstoffbereitstellung Transport Herstellung				Transport Bau/Einbau				Nutzung Instandhaltung Reparatur Ersatz				Umbau/Erneuerung Abbruch Transport Abfallbewirtschaftung Deponierung						Vermeidung	Vorbereitung zur Wiederverwendung	Recycling
	Abfalleigenschaft**																							
Verschnitt von Furnierschichtholzplatten		0,39	-1,64	*	**													Innenraumtrennwände mit Regalfunktion		X				
Ausgebaute Holz-Flügel Fenster		0,95	-0,62															Statische Fenstermodule/ Glaswände		X	X			
Verschnitt von Aluminium-Verbundplatten		3,78	0,00															Boxen aus Aluminium-verbundplatten		X				
Bauschutt/ Beton Abbruch		0,17	0,00															Künstliche Geopolymer Beton Elemente			X			

Beton denselben Zweck erfüllt, handelt es sich um die VzWv. Die Objekte wurden noch nicht hergestellt. Deswegen liegen keine Angaben über konkrete Massen vor. Der mit dem Input verbundene EC wird deshalb in kg CO<sub>2</sub>e/ kg Input dargestellt.

Die durchgeführte Charakterisierung der Wv von Reststoffen macht die abfallwirtschaftliche Einordnung möglich. Die Darstellungsform macht deutlich, in welcher Lebensphase die Materialien als Abfälle anfallen und wie die Wv auf der Abfallhierarchie anzuordnen ist. Es wird zudem deutlich, welche Umweltwirkungen mit der Herstellung des Input Materials verbunden sind, welche Materialien Kohlenstoff speichern und welche Umweltwirkung daraus resultiert, diese in der Nutzung zu halten.

Das entwickelte Modell ist stark auf den Input fokussiert und damit limitiert. Aus den Wiederverwendungsprozessen resultierende Umweltwirkungen werden nicht berücksichtigt, da keine detaillierte LCA der Wv angefertigt wird. Trotzdem ermöglicht das Modell eine vereinfachte Darstellung der durch die Weiternutzung der Materialien resultierenden Umweltwirkungen. Die Methode nutzt dafür öffentlich zugängliche und umfangreiche Datenbanken und ermöglicht dadurch die einfache Nutzung für weitere Anwendungsfälle. Indem Indikatoren und Kategorisierungsmodelle aus dem Bauwesen genutzt werden, wird die Anschlussfähigkeit gewährleistet. Damit wird ein Konzept zur abfallwirtschaftlichen und umweltbezogenen Charakterisierung der Wv im Bausektor geliefert.

## 4 Ausblick

Einerseits werden die betrachteten Objekte in den nächsten Monaten praktisch hergestellt. Mit den dadurch generierten Daten über Massen kann der Betrag an EC, welcher durch die Wv in der Nutzung gehalten wird, berechnet werden. Das Modell wird zudem mit weiteren Fallbeispielen gefüllt und anhand dieser weiterentwickelt. Der Ansatz bleibt dabei jedoch nicht auf Bauprodukte beschränkt, sondern stellt die Grundlage zur weiteren Charakterisierung der Wv und anderer RE-Strategien dar.

## Literatur/Quellen

- Abbey, D.; Arbabi, H.; Gillott, C.; Ward, W.; Tingley, D. D. (2022): Demolish or reuse? – The balance between operational and embodied emissions in the retrofit of commercial buildings. In: IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.* 1078 (1), S. 12016. DOI: 10.1088/1755-1315/1078/1/012016.
- Charlotte, L.; Eberhardt, M.; Birgisdottir, H. (2022): Building the future using the existing building stock: the environmental potential of reuse. In: IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.* 1078 (1), S. 12020. DOI: 10.1088/1755-1315/1078/1/012020.
- Circular Ecology (Hg.) (2019): Embodied Carbon – The ICE Database. Inventory of Carbon and Energy. Online verfügbar unter <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>, zuletzt geprüft am 09.01.2023.
- Figl, Hildegund (2019): ÖKOBAUDAT. Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung. 2., überarbeitete Auflage, September 2019. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Zukunft Bauen, Band 09).

- 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. Hg. v. United Nations Environment Programme. Online verfügbar unter [https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR\\_FULL%20REPORT.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf), zuletzt geprüft am 06.01.2023.
- Küpfer, C.; Bastien-Masse, M.; Devènes, J.; Fivet, C. (2022): Environmental and economic analysis of new construction techniques reusing existing concrete elements: two case studies. In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1078 (1), S. 12013. DOI: 10.1088/1755-1315/1078/1/012013.
- Statistisches Bundesamt (2022): Abfallbilanz 2020. (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen). Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/\\_inhalt.html#\\_rh2y1hrxi](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html#_rh2y1hrxi).

## **Kontakt**

*M.Sc. Johannes Scholz, wissenschaftlicher Mitarbeiter*

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie

E-Mail: [J.Scholz@tu-berlin.de](mailto:J.Scholz@tu-berlin.de)

Homepage: <https://www.tu.berlin/circulareconomy>

# Voltammetrische pH-Messung mit Sensoren auf Basis von Metalloxiden

**Abstract:** Die potentiometrische pH-Messung mit der Glaselektrode nach dem Stand der Technik wirft Fehlerquellen in aggressiven Medien auf und ist schwierig miniaturisierbar. Es wird eine neuartige Methode vorgestellt, um pH-Werte in realen Medien mittels voltammetrischer Redoxpotentiale an Metalloxid-Elektroden auf IrO<sub>2</sub>-Basis zu messen.

## 1 Einleitung

In Wasser, Abwasser, Lebensmitteln, in biologischen und chemischen Prozessmedien in Labor und Technik, wo Farbindikatoren versagen, kommt die pH-Glaselektrode zum Einsatz. Die potentiometrische Einstabmesskette zählt wegen der leichten Handhabbarkeit, hohen Genauigkeit und schnellen Ansprechzeit zur Standardmesstechnik im Laboralltag. Nachteilig ist die Drift des Messsignals durch zeitliche Änderungen an der Membranquellschicht oder den Diaphragmen. Die Kalibration in pH-Pufferlösungen und der Einsatz in Alkalien, Ölen und Proteinen birgt Fehlerpotentiale. Wegwerf-Elektroden aus protonenleitenden Metalloxiden könnten Abhilfe schaffen. Die Oxide der Platingruppenmetalle, voran IrO<sub>2</sub> und RuO<sub>2</sub>, zeichnen sich durch hohe Empfindlichkeit gegenüber Hydronium- und Hydroxidionen aus und widerstehen aggressiven Medien, hohen Temperaturen und Drücken. Gegenüber der Glaselektrode sind Metalloxide miniaturisierbar und erlauben eine einfache Bauweise von flachen Sensoren und Interdigitalstrukturen.

## 2 Methodik

### 2.1 Elektrodenherstellung

Die Art der Elektrodenherstellung hat großen Einfluss auf die elektrochemische Aktivität des Metalloxids. Eine Suspension von IrCl<sub>3</sub> · x H<sub>2</sub>O in Aceton (16 mmol L<sup>-1</sup>) wurde auf einem Titansubstrat (4 x 4 cm<sup>2</sup>) eingetrocknet und bei 500 °C (Aufheizrate 4 °C min<sup>-1</sup>, 10 min Haltezeit) zu unterstöchiometrischem IrO<sub>2</sub> umgesetzt. Eine auf 1 cm<sup>2</sup> zugeschnittene Elektrode war nach Konditionierung in entionisiertem Wasser messbereit. Die Belegung beträgt 0,11 mg cm<sup>-2</sup>.



### 2.2 Redoxchemie von IrO<sub>2</sub> und elektrochemisch aktive Oberfläche

Das Cyclovoltogramm (CV) in Abbildung 1a zeigt die überlagerten Oxidations- und Reduktionsprozesse der IrO<sub>2</sub>-Elektrode in schwefelsaurer Lösung. Die reversiblen Signale im Bereich der Wasserstoffsorption spiegeln die elektrische Ladung der Elektrodenoberfläche durch H<sup>+</sup>-Reduktion und H<sub>2</sub>-Oxidation an den aktiven Zentren wider. Bezieht man die voltammetrische Ladung Q (Fläche unter der Kurve) auf die theo-

retische Ladung eines idealen  $\text{IrO}_2$  (110)-Einkristalls [1-3], ergibt sich als elektrochemisch aktive Oberfläche  $A = 0,55 \text{ cm}^2$ . Der Referenzwert wurde für die  $\text{IrO}_2$ -Elementarzelle in Abbildung 1b ( $a = 638 \text{ pm}$ ,  $b = 318 \text{ pm}$ ) nach Gleichung 2 berechnet.

$$A = \frac{Q_{\text{H}^+_{\text{ad}}}}{Q_{\text{H}^+_{\text{ad,ref}}}} \quad \text{und} \quad Q_{\text{H}^+_{\text{ad,ref}}} = \frac{z e}{A} = 111,7 \mu\text{C cm}^{-2} \quad (2)$$

Im Doppelschichtbereich finden kaum faraday'sche Redoxreaktionen statt und der fließende Strom entspricht weitgehend dem Doppelschichtladestrom,  $I = C \text{ d}E/\text{d}t$ . Die  $\text{Ir(III/IV)}$ -Reaktion (vereinfacht in Gleichung 3) ist ausschlaggebend für die pH-Sensitivität.



Die roten Markierungen der Strommaxima in Abbildung 1 werden durch numerische Suche mittels einer Wavelet-Transformation automatisch bestimmt (Mittelwert aus 5 Zyklen) [5]. Im Sauerstoffbereich finden die Redoxreaktionen höherer Iridium-Oxidationsstufen und die Sauerstoffabscheidung durch Elektrolyse statt [4].

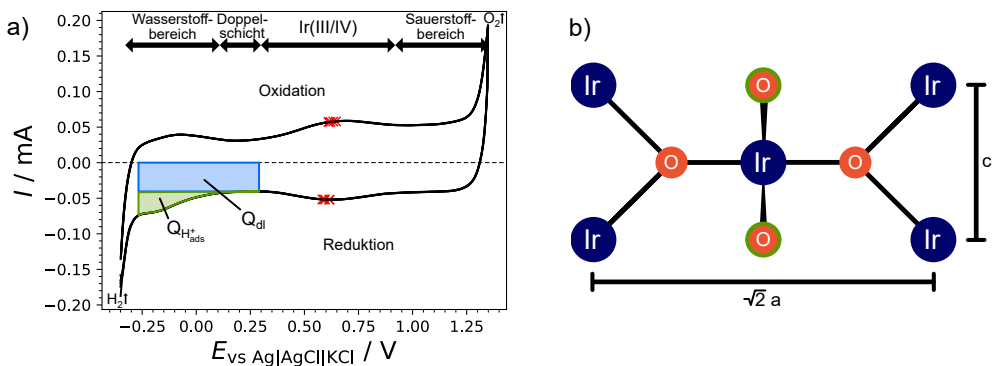


Abbildung 1: a) Cyclovoltogramm einer  $\text{IrO}_2$ /Titan-Elektrode gegen  $\text{Ag|AgCl|KCl}$ -Referenz und ein Platinblech als Gegenelektrode. Elektrolyt:  $0,5 \text{ mol L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ . Spannungsvorschub  $v = 100 \text{ mV s}^{-1}$ . Markierte Bereiche: Ladung der Wasserstoffsorption und Doppelschichtladung. Markierungen: Potential der  $\text{Ir(III/IV)}$ -Peaks. b)  $\text{IrO}_2$  (110)-Elementarzelle:  $\text{H}^+$ -bindende Oberflächen-Sauerstoffatome umrandet.

## 2.3 Konzept der voltammetrischen pH-Messung

Um die Eignung der  $\text{Ir(III/IV)}$ -Reaktion für die automatisierte, voltammetrische pH-Messung zu testen, wurde die Elektrode in einem Teststand [6] durch Titration eines Universalpuffers [7] mit  $1 \text{ mol L}^{-1}$  Natronlauge untersucht. Ruhepotentiale (OCP) dienen zum Vergleich. In Abbildung 2a sind 100 Messschritte der Versuchsreihe und die automatisch gefundenen  $\text{Ir(III/IV)}$ -Redoxpeaks, gemittelt über 5 Zyklen, dargestellt.



Die Potentiale, aufgetragen über den bekannten pH-Werten (ermittelt durch Referenzmessung mit einer Glaselektrode), ergeben einen linearen Zusammenhang, welchen die Nernst-Gleichung (Gl. 4) nahelegt.

$$E = E^0 - \frac{RT}{F} \ln \left( \frac{a(\text{Ir}^{\text{III}})}{a(\text{Ir}^{\text{IV}}) \cdot a(\text{H}^+)} \right) = \text{const} - \frac{RT}{F} \text{pH} \quad (4)$$

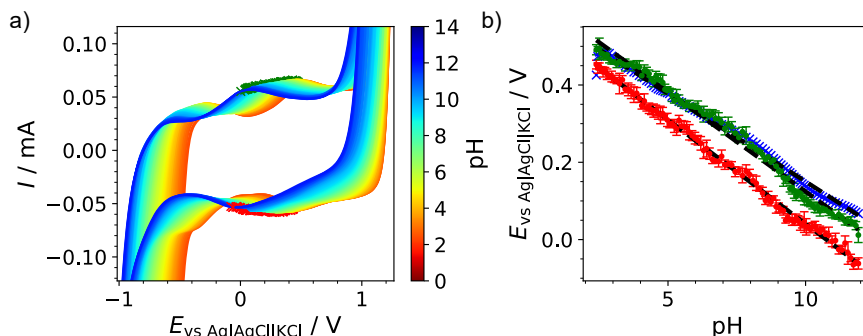


Abbildung 2: a) Cyclovoltammogramme einer  $\text{IrO}_2$ /Titan-Elektrode gegen  $\text{Ag}|\text{AgCl}|\text{KCl}$ -Referenz und Pt-Blech-Gegenelektrode während der Titration von 50 mL Universalpuffer (Rezept nach [7]) mit 1 mol L<sup>-1</sup> NaOH. Spannungsvorschub  $v = 100 \text{ mV s}^{-1}$ . b) Ruhepotential (blau), Potentiale der Ir(III/IV)-Oxidations- (grün) und Reduktionspeaks (rot) in Abhängigkeit des pH-Wertes mit Regressionsgeraden.

Tabelle 1: Lineare Regression der Peakpotentiale der  $\text{IrO}_2$ /Ti-Elektrode in Abhängigkeit des pH-Werts.

	Ruhepotential	Ir(III/IV)-Oxidation	Ir(IV/III)-Reduktion
Sensitivität / mV pH <sup>-1</sup>	-45,5 ± 0,4	-51,5 ± 0,6	-53,8 ± 0,3
Achsenabschnitt / mV	605,4 ± 2,8	639,0 ± 4,4	578,8 ± 2,6
Regression R <sup>2</sup>	99,35 %	98,78 %	99,59 %

## 2.4 Test unter realen Bedingungen

Mit den Regressionsdaten aus Tabelle 1 wurden die pH-Werte realer Flüssigkeiten, durch Cyclovoltammetrie im jeweiligen Medium und Auswertung der Ir(III/IV)-Redoxpeaks (gemittelt über 5 Zyklen) bestimmt und mit Messungen der Glaselektrode verglichen. In der Endanwendung wäre eine Zweipunktkalibrierung in Pufferlösungen ausreichend, da ein nahezu linearer Zusammenhang vorliegt. Die mit der Glaselektrode am besten übereinstimmenden Ergebnisse liefern die Peakpotentiale der Ir(III/IV)-Oxidationsströme. Interessanterweise deutet der mit dem BROMLEY-Modell [8] berechnete pH 0,48 für 0,5 mol L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (und die überschlägige Formel  $\text{pH} = -\lg 0,5 = 0,3$ ) auf einen Fehler der verwendeten Glaselektrode hin. Der IrO<sub>2</sub>-Sensor liefert im supersauren Medium plausible Werte. Das Ruhepotential erweist sich als weniger tauglich für die pH-Messung.

Tabelle 2: Übereinstimmung (grün) und Abweichung um mehr als eine pH-Stufe (rot) der kalibrierten Ruhepotentiale und CV-Peaks mit gemessenen pH-Werten einer kommerziellen Glaselektrode

Probe	pH (Glas.)	pH (Ruhepot.)	pH (Ir(III/IV) Ox.)	pH (Ir(III/IV) Red.)
Cola	2,40	3,27 ± 0,09	1,82 ± 0,17	2,98 ± 0,07
Algenmedium AF6	6,42	4,48 ± 0,10	6,03 ± 0,15	8,49 ± 0,42
Dunkles Weißbier	4,34	5,94 ± 0,11	3,71 ± 0,11	5,77 ± 0,18
Leitungswasser	7,36	5,34 ± 0,11	7,90 ± 0,33	11,55 ± 0,16
Orangenlimonade	2,61	8,36 ± 0,14	2,58 ± 0,37	3,94 ± 0,02
0,5 mol L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (pH 0,48)	1,35	0,48 ± 0,06	0,28 ± 0,21	0,39 ± 0,24
Gärrest Mikrofiltrat	8,55	9,73 ± 0,14	10,28 ± 0,05	10,05 ± 0,07

## 2.5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Messungen mit der IrO<sub>2</sub>-Elektrode zeigen, dass die voltammetrische pH-Messung prinzipiell möglich ist und sogar Vorteile gegenüber dem herkömmlichen, potentiometrischen Messprinzip bietet.

- Beim Ruhepotential dauert es oft sehr lange, bis sich ein stabiler Wert einstellt. Durch Anlegen einer Spannung bei der Cyclovoltammetrie, wird ein Stoffaustausch erzwungen, was zu schnelleren Ansprechzeiten führt.
- Die aktive Oberfläche und Genauigkeit der Elektrode lässt sich durch leistungsfähigere Beschichtungs-techniken und Sinterverfahren verbessern. Vielversprechend sind Siebdruck und Tintenstrahldruck. Durch einen höheren Anteil an Aktivmaterial werden die Redoxpeaks größer und die Identifikation der Peakpotentiale gelingt genauer und leichter.
- Das Zusammenwirken verschiedener Elektrodenmaterialien in einem Sensorarray bietet eine weitere Möglichkeit, um Störeffekte zu minimieren. Auch könnte die fertigungstechnisch aufwändige Ag|AgCl|KCl-Referenzelektrode ersetzt werden. In Zukunft könnten derartige Arrays zudem durch multilineare Kalibrationsmodelle weitere Parameter wie Kationen- und Anionenkonzentrationen in Wasserproben erfassen und eine umfassende Schnellanalytik ermöglichen [9].

## Literatur/Quellen

- [1] Bard A., Faulkner L., White H., Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, 3<sup>rd</sup> ed., John Wiley & Sons, Oxford, (2022).
- [2] Elgrishi N., et al., A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry. J. Chem. Educ. 95, 197–206 (2018).
- [3] Weber T., et al., Extraordinary Stability of IrO<sub>2</sub> (110) Ultrathin Films Supported on TiO<sub>2</sub> (110) under Cathodic Polarization. J. Phys. Chem. Lett. 11, 9057–9062 (2020).
- [4] Steegstra P., Ahlberg E. Influence of oxidation state on the pH dependence of hydrous iridium oxide films. Electrochimica Acta 76, 26–33 (2012).
- [5] Schottenbauer J., Zell N., Kurzweil P., Computerchemie: Intelligente Absorptionsspektroskopie mit numerischen Methoden. OTH Forschungsbericht, Amberg (2022), S. 172–177.

- [6] Schottenbauer J., Gradl Ch., Kurzweil P., Labor 4.0 - Automatischer Teststand zur Erprobung elektrochemischer Sensoren. OTH-Forschungsbericht, Amberg (2021), S. 14–17.
- [7] Schottenbauer J., Kurzweil P., Dinkelbach Ch., Ein "drogenfreier" Universalpuffer für elektrochemische Hochdurchsatzexperimente. OTH-Forschungsbericht, Amberg (2023).
- [8] Lucas M., Krissmann J., Thermodynamik der Elektrolytlösungen, 1. Auflage. Wiley-VCH, Weinheim, (2002).
- [9] Schottenbauer J., Kurzweil P., Schell Ch., Dinkelbach Ch., Molekülspektroskopie an Gärrest- und Wasserproben: Computergestützte Schnellanalytik, DGAW-Tagungsband, (2021).

### **Kontakt**

*Josef Schottenbauer, M. Eng., wissenschaftlicher Mitarbeiter, Doktorand*

Technische Hochschule Amberg-Weiden (OTH), Fakultät MBUT, Kaiser-Wilhelm-Ring 23, 92224 Amberg

Tel.-Nr.: +49 9621 482-3553

E-Mail: jo.schottenbauer@oth-aw.de



## Recovery of nutrients from animal slurry

**Abstract:** *The direct application of organic fertilisers such as animal slurry, animal manure, sewage sludge and digestate to agricultural land is nowadays increasingly limited by stricter fertiliser regulations due to numerous environmental concerns. The treatment of slurry by solid-liquid separation followed by ammonia stripping, precipitation and flocculation could be a way to relieve the environment and close the nutrient cycle again. Therefore, the aim of this work is to evaluate the possibilities of solid-liquid separation, stripping and fixation of ammonia, precipitation of phosphorus and flocculation with separated cattle slurry to determine practical parameters regarding time requirements, energy requirements for agitation, aeration and heat supply, material requirements for pH-increase and flocculation induction as well as the efficiency of the processes.*

### 1 Introduction

In pre-industrial times, agriculture was strongly characterised by coupled crop and animal use. Organic fertilisers, such as human and animal excreta, which contained all the important plant nutrients and were produced in the immediate vicinity, were applied to the fields. Thus, a largely closed nutrient cycle could be ensured on good soil, but at a low yield level. During industrialisation, significant breakthroughs were made in fertiliser technology, such as the development and use of potassium salt and the discovery of ammonia synthesis, because of which agricultural yields could be greatly increased. Over time, this led not only to massive population growth, but also to an intensification of agriculture with the accompanying partial decoupling of crop and animal use and thus to the partial opening of the nutrient cycle. As a result, natural processes can generally no longer fully meet the plants' needs for nitrogen, phosphorus and potassium compounds. To ensure high yields, it is currently necessary to provide the plants with these missing nutrients in the form of mono- or complex fertilisers. (Billen et al., 2021)

The rising world population, growing prosperity and the increased consumption of meat that goes hand in hand with it are leading to an ever-increasing demand for crops and correspondingly for fertilisers, which means that more ammonia, phosphate and potash salt are needed. Even today, there are problems in obtaining the required fertilisers cheaply and at the same time in an environmentally friendly way. For example, the Haber-Bosch process for ammonia synthesis today requires the use of fossil fuels. Not only is the required hydrogen rarely produced green, but it is mainly obtained from natural gas, crude oil or coal. The process itself also requires high temperatures and pressures and thus a large amount of energy, mostly derived from fossil fuels. In the extraction and processing of phosphates, an increase in the contamination of the extracted phosphates with heavy metals such as uranium and cadmium can be observed today, which means that more effort must be expended on processing to ensure consistent fertiliser quality. It is a great

challenge to obtain the potassium-based fertilisers cheaply and at the same time in an environmentally friendly way, since the process produces large quantities of residual liquors containing magnesium salts and sodium chloride, which must be disposed of at great expense. In addition to the conventional use of rock phosphates, potassium salts or the production of ammonia and its processing into fertilisers, there is also the possibility of directly using or recovering nutrients from animal by-products, wastewater and fermentation residues.

The direct application of organic fertilisers on agricultural land is opposed by increasingly strict fertiliser legislation due to numerous environmental concerns. The emissions of ammonia and nitrous oxide into the atmosphere and of nitrate into groundwater are of particular concern. For this reason, fertiliser legislation provides for limits on nitrogen inputs to agricultural land. When such organic fertilisers are used, the phosphorus content is not considered, so that overfertilisation with phosphorus can occur. Fertilisers that are not available to plants, i.e. compounds that are too abundant or cannot be absorbed by plants, tend to be carried away or washed out and can eutrophicate or otherwise pollute surrounding areas, ground and surface waters. To counteract this, the legislator demands not only nitrogen application limits but also increasingly shorter application periods and stipulates that, for example, slurry or manure must only be applied close to the surface or into the soil. (Umweltbundesamt, 2021)

As an alternative to direct application, there are methods of extracting nutrients from organic fertilisers to produce more environmentally friendly fertilisers. In this work, the focus is on liquid manure processing. In principle, manure can be utilised energetically in a biogas plant, whereby methane ( $\text{CH}_3$ ) is obtained for energy production. However, the disposal problem of the residual material, the fermentation residues, is only shifted and still exists. Therefore, the processing of liquid manure by solid-liquid separation, ammonia stripping and flocculation is an attractive option for nutrient recovery. First, the solid phase is separated from the liquid phase. The solid phase can be processed into compost. The liquid phase is subjected to ammonia stripping with sulphuric acid, on the one hand to prevent further emissions, but also to obtain the raw material for nitrogen fertiliser, ammonium sulphate ( $\text{NH}_4\text{SO}_4$ ). Flocculation can be used to remove further nutrients such as phosphorus from the liquid phase. The nutrients collect in the flocs and can then be separated. The potassium salts remain in the liquid phase, which is low in nitrogen and phosphorus.

## **2 Material and methodology**

### **2.1 Materials used in the trials**

The raw cattle manure used in the trials comes from "VS Dairy KG" in Süplingen. The cows there serve the purpose of milk production.

Numerous common household oils were used as defoamers, including rapeseed, sunflower, olive, linseed and maize germ oil. The oils differ in their sensory parameters, such as taste or odour, and chemical or physical parameters, such as fatty acid composition, density or surface tension.

As flocculants biodegradable starch from potato and pea from "Emsland Group" and a chitosan product named Heppix from "BioLog Heppie GmbH" was used.

## 2.2 Methods

The project aims to separate all important nutrients from a slurry and generate valuable nutrient products from it. First, a screw separator is used to separate the slurry into the solid and liquid phases. The liquid phase is then subjected to ammonia stripping to separate most of the reactive nitrogen from the slurry. A wash with sulphuric acid produces the marketable product ammonium sulphate. Coagulation and flocculation with biologically compatible flocculants are used to separate the phosphates and other nutrients from the nitrogen-poor residual liquid phase into another solid phase. The solid phases from flocculation and separation are then to be fed into an aerobic treatment to generate compost, while the flocculated residual liquid phase is low in nitrogen and phosphorus but rich in potassium and can be used, for example, as irrigation water in the field.

## 3 Processes used

### 3.1 Solid-Liquid separation

A raw cattle slurry was successfully separated into a solid and a liquid phase using a screw separator. Three 1m<sup>3</sup> IBCs, various hoses, an eccentric screw pump and a dry bed separator were used for this. Up to 60% of the dry matter could be separated using the dry bed separator. Furthermore, nitrogen could be separated with a degree of 28% and phosphorus with a degree of 55%.

### 3.2 Composting

Composting is the treatment of organic waste for the purpose of obtaining a humus- and nutrient-rich fertiliser. The addition of oxygen and the organic decomposition by microorganisms not only releases heat, which brings hygienisation, but also causes material transformation processes that improve, for example, the water storage capacity, the nutrient composition and availability of the source material.

In trials the properties of separated pig manure solids were investigated, mixtures with wheat straw of different grain sizes were produced as structural material and composting experiments were carried out in different experimental set-ups (Dewar vessels and thermal cells). Different conditions such as aeration, humidification and heating were simulated. In the experiments, the parameters water content, organic dry matter and the carbon-nitrogen ratio (C:N ratio) served as reference values for assessing the composting success.

It was shown that the separated manure solid investigated is basically compostable, but it has deficits in oxygen supply due to its high water content and dense basic structure. The addition of wheat straw as a structural material improves the oxygen supply and thus the overall composting quality. In particular, the use of wheat straw in the particle size range below 40mm, aeration with moist air and a greater layer height were able to maintain the optimum water content in the respective test period, ensure sufficiently high temperatures for the longest time and best reduce the organic dry matter content. The greatest narrowing of the C:N ratio, on the other hand, was achieved in the trials without moist aeration, as this probably resulted in a discharge of nitrogen compounds.

### 3.3 Ammonia stripping

Ammonia stripping was done by deliberately manipulating the balance of  $\text{NH}_3$  and  $\text{NH}_4$  in the slurry. By raising the parameters of temperature and pH, this balance can be shifted in favour of ammonia, which can be expelled by aeration and bound again with an acid in the form of ammonium salts.

The experimental set-up consisted essentially of a rotameter to set the desired air volume, the aerated and temperature-controlled reactor where the stripping took place, an overflow bottle and a sulphuric acid scrubber cascade to fix the ammonia to ammonium sulphate.

The first part of the trials served to determine the foaming behaviour using different vegetable defoamers and dosages to find the best oil at optimal dosage. While the second part of the experiment dealt with the determination of a favourable aeration quantity. Once both the best oil and a suitable aeration quantity had been identified, the actual experiments could start by raising the temperature and/or the pH value.

Due to the massive problems associated with foam formation, various vegetable oils were tested for their foam-inhibiting effect and it was found that vegetable oils with low surface tensions achieved the best results, as low surface tension weakens existing air bubbles or even prevents their formation. In addition, different dosages of sunflower oil were tested with the result that even low oil proportions of 0.6% were just as effective in inhibiting foaming as higher proportions of up to 2.5%.

The experiments on varying the aeration quantity showed that an increase has a great influence on all parameters considered. The ammonium content achieved in the acid scrubbers increased quite linearly with the aeration quantity, which can be explained by the larger interface due to the air bubbles blown in. The foam formation and the pH value also increased when the aeration quantity was increased, since on the one hand the  $\text{CO}_2$  discharge is accelerated and on the other hand the turbulence increases.

Increasing the temperature to 35°C or 50°C primarily led to a massive reduction in the maximum possible test time due to earlier foaming. However, effects on the ammonium course, the ammonium concentration in the acid scrubbers and the decrease in conductivity were observed. Despite the short test time, three to four times as much ammonium was detected in the scrubbers as without temperature increase, which can probably be attributed to the  $\text{NH}_3$ - $\text{NH}_4$  equilibrium shifted in favour of ammonia.

When quicklime was added, a negative effect on foam inhibition was observed with larger quantities and the associated pH increase. Since not all quicklime reacted with the slurry due to sedimentation of the quicklime, a greater increase in pH would have been expected under better conditions than was ultimately observed. Nevertheless, strong pH increases up to 10.5 (50g CaO) and 12 (100g CaO) were observed. A higher input of alkalising agent led to significantly better  $\text{NH}_3$  removal rates.

As expected, the combination trials of adding quicklime and raising the temperature showed the greatest ammonium sulphate yields of up to 32% in 6 hours at 50°C and the addition of 100g quicklime. Another positive synergy can be found in the fact that the temperature increase in combination with the quicklime addition was able to maintain the foam-inhibiting effect over the entire test period.



### 3.4 Flocculation

The flocculation tests were carried with separated cattle slurry by using alternative, biodegradable flocculants based on natural raw materials. On the one hand, separated slurry and on the other hand separated and alkalised slurry were flocculated. Biodegradable flocculants (FHM) based on chitin and starch were used, as well as bentonite as a natural additive. The flocculation tests were carried out using a flocculator with 6 stirring places following the Jar test. For alkalisation, 100g of quicklime was added to four litres of separated liquid manure and stirred in.

Preliminary tests showed that the chitin-based flocculation aids did not successfully flocculate the separated slurry, whereas the starch-based flocculation aids led to successful flocculation. Based on a subsequent main test series, a first assessment of the starch-based flocculation aids could be made about the necessary dosing quantity as well as the stirring speed and time of the mixing-in and maturing phase for flocculation. It was found that the flocculation of the alkalised slurry was worse than the flocculation of the original slurry, with smaller flocs, reduced sedimentation speed and a higher settling volume, as well as generally lower dewaterability. The addition of bentonite as an additive generally led to more stable flocs and slightly improved separation efficiencies in terms of TR content and turbidity.

In the flocculation of the separated slurry, TR separation efficiencies of up to 76% and a reduction in turbidity of up to 80% could be documented. Similar separation efficiencies were also determined about the flocculation of the alkalised slurry, whereby the flocs exhibited significantly poorer dewaterability.

### Acknowledgement

This Paper is a result of the project “Alkalization as Efficient Slurry Treatment Reduces Ammonia and Methane Emissions and Enables P Recycling”, which was financially supported by the German Federal Ministry of Food and Agriculture.

### Bibliography

Billen et al., G. (2021). *Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle: The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity*. Paris: CellPress.

Umweltbundesamt. (2021). *Maßnahmenvorschläge für ein Aktionsprogramm zur integrierten Stickstoffminderung*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

### Kontakt

Ing. Sebastian Seyffert, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter

Department of Water, Environment, Construction and Safety, Magdeburg-Stendal University of Applied Sciences

Tel.-Nr.: +49 (0)391 886 4762

E-Mail: sebastian.seyffert@h2.de

Homepage: www.h2.de



## Störstoffentfrachtung von Bioabfall zur Weiterverarbeitung in einer Bioraffinerie

**Abstract:** Im Projekt Biowaste to Products (BW2Pro) wird die Bioabfallbehandlung zu einer nachhaltigen Bioraffinerie weiterentwickelt. Dabei sollen aus kommunalem Bioabfall sowohl Produkte (bioabbaubare Pflanztöpfe und Mehrnährstoffdünger) als auch Sekundärrohstoffe (Fasern, Cellulasen, PHA und Biogas) mit einem ökologischen und ökonomischen Mehrwert gewonnen werden. Dazu ist es erforderlich, den Bioabfall möglichst stör- und fremdstofffrei aufzubereiten. In einer Demonstrationsanlage unter Praxisbedingungen sollen technische und ökonomische Machbarkeit sowie Rahmenbedingungen des Verfahrens analysiert und validiert werden. Der Aufbau der Anlage ist für März 2023 geplant. Projektbegleitend werden seit August 2022 Bioabfallproben aus dem laufenden Betrieb einer Biovergärungsanlage entnommen und analysiert. Die ersten Ergebnisse zeigen einen mittleren Feststoffgehalt von 35 % und einen mittleren Störstoffanteil von 2,2 % und weisen eine Schwankungsbreite von 20 % bzw. 1,3 % auf.

### 1 Einleitung

Um die Kriterien und Ziele der Landestrategie 'Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg' (MLR 2019) und deren bioökonomischen Kreislaufansatz zu erfüllen, ist ein effizientes Wertstoff- und Kreislaufwirtschaftskonzept erforderlich. Auch die Bioabfallwirtschaft kann dazu beitragen durch eine verbesserte Kaskadierung bei der Nutzung des Bioabfalls als Sekundärrohstoff und durch die Herstellung von neuen Produkten aus kommunalem Bioabfall. Dies bietet ein hohes Substitutionspotenzial für Produkte, welche bisher aus fossilen Rohstoffen produziert wurden. Da Bio- und Grünabfälle (im Folgenden vereinfacht als Bioabfälle bezeichnet) sowohl stofflich als auch energetisch genutzt werden können, leisten sie somit einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung, zur Versorgung mit erneuerbarer Energie und zum Klimaschutz (Destatis 2022). Im Projekt BW2Pro soll die Bioabfallbehandlung zu einer nachhaltigen Bioraffinerie weiterentwickelt werden. Ein Überblick über das Gesamtprojekt BW2Pro, das in Zusammenarbeit mit weiteren Kooperationspartnern durchgeführt wird, mit seinen wesentlichen Komponenten liefert *Abbildung 1*. Der Aufbau der Bioraffinerie ist für April 2023 am Standort der bestehenden Biovergärungsanlage in Backnang-Neuschöntal geplant. Nach Inbetriebnahme sollen täglich ca. 1.000 kg Bioabfall und Grüngut aus kommunaler Sammlung in der Demonstrationsanlage verarbeitet werden.

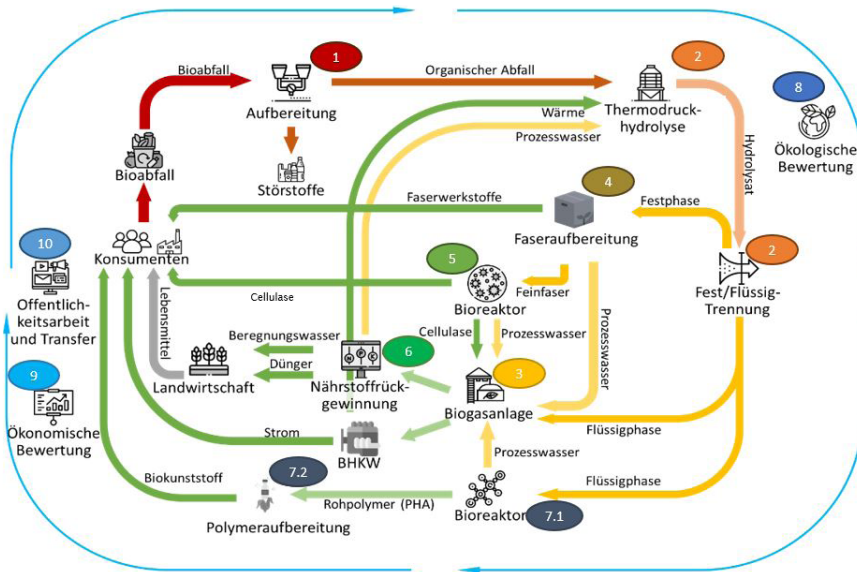


Abbildung 1: Kreislaufschema des Vorhabens BW2Pro

Eine wesentliche Projektaufgabe seitens des Instituts für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA) der Universität Stuttgart besteht im Aufbau und Betrieb von Aufbereitungsaggregaten zur Störstoffentfrachtung (Nr. 1 in *Abb. 1*). Zum Einsatz kommen soll dabei ein Hydrozyklon, der die Schwerfraktion des Bioabfalls (z. B. Glas, Steine, Metalle) mittels Dichtentrennung abscheidet. Bei Versuchen zur Abscheidung von Störstoffen aus Bioabfall haben beispielsweise Jank et al. (2017) einen mittleren Abscheidegrad von 80 % erreicht. Hydrozyklone werden zur Fest-Flüssig-Trennung eingesetzt und nutzen die Sedimentationsgeschwindigkeit zur Abtrennung von Partikeln aus flüssigen Medien (siehe *Abbildung 2*). Um dies zu erreichen muss die Viskosität des Substrats reduziert werden, wodurch die Sedimentationsgeschwindigkeit erhöht wird (Senfter 2019). Der Abscheidegrad des Hydrozyklons hängt einerseits von der Partikelgröße und der Homogenität des Gemischs ab, andererseits vom Wassergehalt. Daher sind in der geplanten Demonstrationsanlage dem Hydrozyklon Zerkleinerer und Rührbehälter mit Wasserzugabe vorgeschaltet.

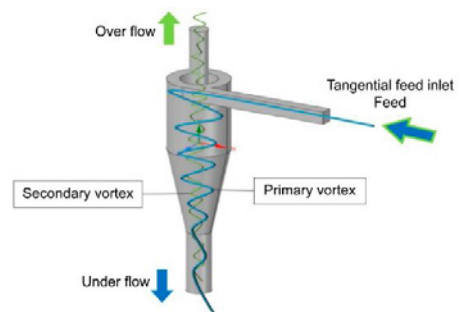


Abbildung 2: Strömungsrichtung des Hydrozyklonabscheiders aus (Yi et al. 2021)

Ziel dieser Arbeit ist die Charakterisierung des Inputmaterials von der Biovergärungsanlage in Backnang-Neuschöntal, welches für die geplante Demonstrationsanlage verwendet werden soll.

## 2 Methodik

Die angelieferten Bio- und Grüngutabfälle an die Biovergärungsanlage in Backnang-Neuschöntal werden vor Ort mittels Schredder zerkleinert und über ein Sternsieb mit einer Korngröße von ca. 80 mm abgesiebt. Dieser Siebdurchgang wird als Inputmaterial für die geplante Bioraffinerie verwendet und wird deshalb schon vor Aufbau und Inbetriebnahme der geplanten Anlage untersucht und analysiert. Da für die Störstoffentfrachtung im Hydrozyklon ein pumpfähiges Material benötigt wird, sind neben den Störstoffanteilen auch die Feststoffgehalte (TS-Gehalt) von Bedeutung. Im Hinblick auf die Prozessstabilität ist es dabei ferner erforderlich, jahreszeitliche Schwankungen des Inputmaterials mit zu berücksichtigen, damit das Verfahren dementsprechend angepasst werden kann.

Zur Charakterisierung des Inputmaterials der geplanten Bioraffinerie werden die Proben der Biovergärungsanlage in Backnang-Neuschöntal nach dem in der Bioabfallverordnung (DIN EN 12579:2013, 2014) beschriebenen Verfahren entnommen. Zur Abbildung von betrieblichen und (jahres-)zeitlichen Schwankungen werden einmal monatlich jeweils eine Arbeitswoche von Montag bis Freitag täglich beprobt, die jahreszeitlich dem Sommer (Juni-August), Herbst (September – November), Winter (Dezember – Februar) und Frühling (März – Mai) zugeordnet werden. Die Entnahme erfolgt an 15 Probenahmestellen eines Bioabfallhaufens. Es werden jeweils ca. 2 l entnommen, so dass etwa 30 l bzw. etwa 12 kg Bioabfall pro Probenahme anfallen.

Gemäß Methodenhandbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate (Bidlingmaier 2006) wird der TS-Gehalt im abteilungseigenen Labor dreifach bestimmt, der sich aus dem Verhältnis der trockenen (bei 105°C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz) zur feuchten Masse des Materials errechnet. Für die Analyse des Störstoffanteils werden ca. 350 g der getrockneten Proben mittels Siebung mit Maschenweiten von 20 mm, 10 mm und 2 mm gesiebt und die Störstoffe der jeweiligen Fraktion manuell aussortiert. Der Störstoffanteil wird prozentual in Konzentrationsangaben bezogen auf die Trockenmasse angegeben.

## 3 Ergebnisse

Die bisherigen begleitenden Voruntersuchungen zur Charakterisierung des Bioabfalls ergaben TS-Gehalte im Bereich zwischen 26,67 und 46,60 %, welcher gemittelt im Sommer etwas höher ist als im Herbst und Winter (vgl. *Abbildung 3*). Dies kann mit den jahreszeitlichen Unterschieden in der Abfallzusammensetzung und -menge zusammenhängen (Vgl. z. B. Bilitewski et al. 2000 und Kranert 2017). Fortgeschrittene Verdunstung während der Zwischenlagerung der gelagerten Bioabfälle könnte ebenfalls eine mögliche Erklärung für die erhöhten TS-Gehalte im Sommer sein. Im Mittel über alle entnommenen Proben ergab sich ein TS-Gehalt von 34,65 %.

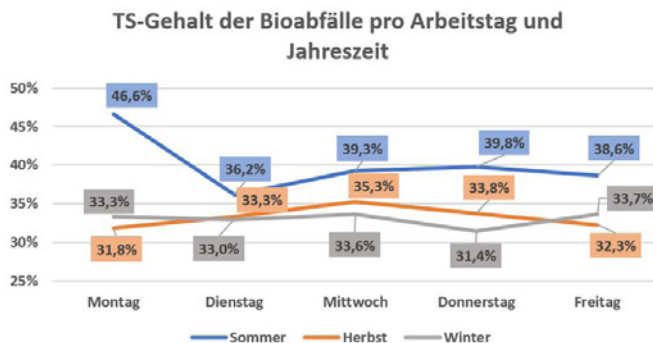


Abbildung 3: Ergebnisse der gemittelten TS-Gehalte des Bioabfalls

Der Störstoffanteil bei den untersuchten Proben liegt im Mittel bei 2,24 % bezogen auf die Trockenmasse und befindet sich im Bereich zwischen 0,36 % (im Herbst) und 6,90 % (ebenfalls im Herbst). Gemittelt über die Jahreszeit reichen die Fremdstoffanteile von 1,91 % im Herbst bis 3,15 % im Winter (siehe *Abbildung 4*). Die größten Anteile der Störstoffe machen in den bisherigen Untersuchungen die Metalle und 'Sonstiges' (Textilien und Glas) aus. Steine und Kunststoffe haben massetechnisch einen geringeren Anteil.

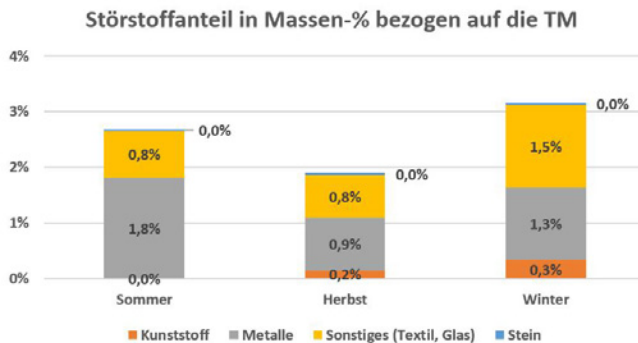


Abbildung 4: Ergebnisse der gemittelten Störstoffanteile im Bioabfall

## 4 Ausblick und Fazit

Für eine weitere Detailanalyse des Inputmaterials ist zukünftig eine Erweiterung des Analytikumfangs vorgesehen. Zur Bilanzierung des Anlagenbetriebs müssen verschiedene Probenahmestellen definiert werden, der Anlagenprozess begleitet und optimiert werden. Dabei ist insbesondere die Frage nach dem optimalen Wassergehalt der Betriebsmatrix zu untersuchen und der maximal erreichbare Abscheidegrad des Hydrozyklons zu bestimmen. Ferner ist zu klären, inwiefern eine automatisierte Beimischung von Prozesswasser möglich ist oder, ob eine manuelle Beimischung, basierend auf tages- oder wochenscharfen Analysen, zu geschehen hat.

Die begleitenden Untersuchungen geben einen Hinweis auf die zu erwartenden TS-Gehalte des Inputmaterials. Es ist mit einem TS-Gehalt von ca. 35 % [26 %, 46 %] zu rechnen, so dass in der geplanten Anlage für eine Reduktion der täglichen Inputmenge von 1.000 kg auf 10 % TS-Gehalt etwa 2.500 l [1.600 l, 3.600 l] (Prozess-)Wasser benötigt werden. Dies kann je nach Wochentag und Jahreszeit, analog des TS-Gehalts, zum Teil erheblich schwanken, wie schon die ersten Messergebnisse zeigen. Des Weiteren ist mit einem Störstoffanteil im Bereich von 0,36 % – 6,90 % bezogen auf die Trockenmasse zu rechnen, welcher aus dem Bioabfall entfrachtet werden sollte.

## Förderung

Das Projekt BW2Pro wird im Rahmen des EFRE-Förderprogramms „Bioökonomie Bio-Ab-Cycling“ vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert.

## Literatur/Quellen

- Bidlingmaier, Werner (Hg.) (2006): Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate. Unter Mitarbeit von Bertram Kehres. Bundesgütegemeinschaft Kompost. 5. Aufl. Köln: Bundesgütegemeinschaft Kompost.
- Bilitewski, Bernd; Marek, Klaus; Härdtle, Georg (2000): Abfallwirtschaft. Handbuch für Praxis und Lehre. Dritte, neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Destatis (2022): Abfallbilanz 2021 – Ressourcen aus unserer kommunalen Kreislaufwirtschaft. Hg. v. Statistisches Bundesamt (Destatis). Online verfügbar unter [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2\\_Presse\\_und\\_Service/Publikationen/Umwelt/Abfallbilanz-2021-barrierefrei.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Abfallbilanz-2021-barrierefrei.pdf), zuletzt geprüft am 15.01.2023.
- Jank, Anna; Müller, Wolfgang; Waldhuber, Sebastian; Gerke, Frédéric; Ebner, Christian; Bockreis, Anke (2017): Hydrocyclones for the separation of impurities in pretreated biowaste. In: Waste management (New York, N.Y.) 64, S. 12–19. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.03.001.
- Kranert (2017): Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- MLR (2019): Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg und Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg. Online verfügbar unter [https://mlr.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mlr/intern/dateien/PDFs/Bio%C3%B6konomie/Landesstrategie\\_Nachhaltige\\_Bio%C3%B6konomie.pdf](https://mlr.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mlr/intern/dateien/PDFs/Bio%C3%B6konomie/Landesstrategie_Nachhaltige_Bio%C3%B6konomie.pdf), zuletzt geprüft am 13.01.2023.
- Senfter, T. (2019): Kontinuierliche Störstoffabscheidung in der Klärschlamm-Co-Fermentation mittels Zentrifugalabscheider.

## Kontakt

*M.Sc. Axel Steffens (Wissenschaftliche Mitarbeiter)*

Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft

Tel.-Nr. 0711 68565436

E-Mail: [axel.steffens@iswa.uni-stuttgart.de](mailto:axel.steffens@iswa.uni-stuttgart.de)

Homepage: <https://www.iswa.uni-stuttgart.de/>





## Ressourcenplan kommunaler Tiefbau (RekoTi)

**Abstract:** Der Bausektor weist einen hohen Ressourcenbedarf auf, mit dem nachteilige Umweltwirkungen einhergehen. Gleichzeitig besteht hier aber auch ein großes Innovationspotenzial. Zum Beispiel haben Städte und Gemeinden im Tiefbau im Zuge ihrer Baumaßnahmen einen maßgeblichen Einfluss auf die Ressourceneffizienz. Im Rahmen des durch das BMBF geförderten Projektes RekoTi wird in Zusammenarbeit von Hochschulen, Kommunen und Bauunternehmen ein Ressourcenplan für den kommunalen Tiefbau entwickelt. Dieser soll Kommunen die Möglichkeit geben, Potenziale zu erkennen bzw. die Ressourceneffizienz ihrer Verkehrsflächen, Kanalisation und Brücken mittels einer digitalen Toolbox und einem zugehörigen Leitfaden zu steigern.

### 1 Einleitung & Zielsetzung

Mit mehr als zwei Millionen Beschäftigten und 489 Milliarden Euro nominalem Bauvolumen ist das Baugewerbe einer der bedeutendsten Wirtschaftszweige der deutschen Volkswirtschaft (Rein, 2022). Gleichzeitig hat dieser Sektor eine sehr große Ressourcenrelevanz, da jährlich ca. 594 Millionen Mg mineralische Rohstoffe abgebaut und zur Herstellung von Baustoffen verwendet werden (Statistisches Bundesamt, 2021b). Die Bauwirtschaft ist so für 63% des natürlichen Ressourcenverbrauchs (Statistisches Bundesamt, 2021b), einer Flächenversiegelung von 54 ha/d (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2022) sowie 40 % der Treibhausgas-Emissionen in Deutschland (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung [BBR], 2022) verantwortlich. Im Tiefbau (17% des Umsatzes im Baugewerbe (Rein, 2022)) wird ca. die Hälfte der o. g. mineralischen Baurohstoffe verwendet (Schiller et al., 2015). Parallel zu diesem hohen Ressourcenverbrauch haben Bauabfälle mit rd. 230 Mio. Mg/a einen Anteil von 55 % an der Gesamtabfallmenge in Deutschland (Statistisches Bundesamt, 2021a).

Anders als beim Hochbau ist beim Tiefbau vor allem die öffentliche Hand auf den verschiedenen Ebenen (Planung, Bau, Betrieb, Erhaltung und Finanzierung) maßgebliche Hauptakteurin. Hier übernehmen Kommunen eine wichtige Funktion, da z. B. 75 % des Straßen- und Wegenetzes in D Gemeindestraßen und Wirtschaftswege sind sowie große Teile des Abwassernetzes ebenfalls dem kommunalen Tiefbau zugeordnet werden können (Knappe et al., 2015). In vielen Kommunen dominieren die Ausgaben für die Sanierung und Instandhaltung des Straßen- und Abwasserkanalnetzes sowie der Ingenieurbauwerke, wie Brücken den Finanzhaushalt (z. B. ca. 40 % in der Stadt Münster). Vor dem Hintergrund dieser finanziellen und ressourcentechnischen Ausgangslage ist eine Steigerung der Ressourceneffizienz im kommunalen Tiefbau zwingend notwendig.

Ziel des Projektes RekoTi ist die Entwicklung eines digitalen kommunalen Ressourcenplans, der von Forschenden der FH Münster, der Ruhr-Universität Bochum und der Hochschule Karlsruhe zusammen mit der Stadt Münster, der Hermann Dallmann Straßen- und Tiefbau GmbH & Co. KG (Bramsche-Engter) und der Thomas & Bökamp Ingenieurgesellschaft mbH (Münster) über den Projektzeitraum von drei Jahren anhand der Beispielkommune Münster erarbeitet wird. Der Ressourcenplan

- stellt als Grundlage für ein effizientes Stoffstrommanagement Informationen zu Art, Lage, Menge und ggf. Qualität verbauter Ressourcen bereit,
- zeigt Ansätze auf, wie Stoffströme im Kreislauf geführt werden können und somit das Stoffstrommanagement verbessert werden kann,
- bietet Vorschläge zu alternativen, ressourceneffizienten Bauverfahren und Bauweisen für bestehende Infrastrukturanlagen,
- bietet Anknüpfungspunkte für Asset-Management-Systeme,
- ermöglicht die Einbindung von Ökobilanzdaten in kommunale Entscheidungsprozesse,
- beinhaltet eine digitale Lösung (Toolbox) auf Basis von Building Information Modeling (BIM) und Geoinformationssystemen (GIS),
- umfasst einen Leitfaden, der Rahmenbedingungen und Anforderungen am Beispiel der Stadt Münster aufzeigt und eine Übertragbarkeit auf andere Kommunen gewährleistet.

## 2 Vorgehensweise & bisherige Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes RekoTi werden die Verkehrsflächen, die Kanalisation und die Brücken in der Beispielkommune Münster als wichtigste Infrastrukturanlagen des Tiefbaus betrachtet.

Grundlage ist zunächst eine Ermittlung der verbauten Massen und Materialien und damit des anthropogenen Materiallagers. Die Qualität und Vollständigkeit der Daten jeder Infrastrukturanlage bestimmt, mit welcher Herangehensweise seine Massen berechnet werden. Auch für Objekte mit unvollständigen Daten können so Massen abgeschätzt werden, die jedoch starken Unsicherheiten unterliegen. Bei Vorliegen eines vollständigen, hochwertigen Datensatzes zu einem Objekt wird hingegen dieser verwendet, um ein möglichst genaues Ergebnis zu erhalten. Mit dieser Vorgehensweise wird die häufig anzutreffende heterogene Datenlage innerhalb der Kommunen berücksichtigt. Durch gesetzliche Vorgaben besteht bspw. im Bereich der Kanalisation bereits ein hohes Maß an Informationen, welche für die Abschätzung des anthropogenen Materiallagers verwertbar sind. Dagegen liegen im Bereich der Verkehrsflächen aufgrund der im Regelfall historisch gewachsenen, sich vielfältig veränderten Straßenaufbauten weit weniger Detaildaten vor.

Des Weiteren werden im Projekt alternative, ressourceneffiziente Bauverfahren und Bauweisen für die einzelnen Infrastrukturanlagen hinsichtlich Einsatzmöglichkeit und Einsparpotenzial untersucht. Hierzu wurde z. B. über eine Länge von 600 m eine Versuchstrecke in Münster gebaut, bei der unterschiedliche Anteile Asphaltgranulat in der Splittmastixasphalt-Deckschicht sowie Temperaturabsenkungen beim Asphaltmischgut umgesetzt wurden. Den Aufbau der sechs Versuchsfelder sowie ein Bild der Baumaßnahme zeigt Abbildung 1.



Abbildung 1: Bau der Versuchsstrecke mit sechs Versuchsfelder

Um künftig die Nutzung des anthropogenen Materiallagers als Rohstoffquelle für Sekundärmaterialien und die Auswirkungen alternativer Verfahren bewerten zu können, wird die Methodik der Ökobilanzierung (ISO 14040) angewendet. Bestehende Defizite vorhandener Ökobilanzdatensätze werden untersucht und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt. Außerdem werden bestehende Pavement-Management-Ansätze (PMS) um eine ökologische Komponente erweitert. Künftig sollen dadurch Entscheidungsfindungen im Straßenerhaltungsmanagement auf ökonomischen und ökologischen Kennzahlen basieren.

Die erarbeiteten Inhalte werden den Kommunen in Form verschiedener digitaler Tools zur Verfügung gestellt. Plug-Ins in das GIS-Programm QGIS sollen z. B. eine schnelle und einfache Massenberechnung für bestimmte Gemeindegebiete oder die gesamte Kommune ermöglichen. Außerdem soll die Koordination gleichzeitig stattfindender Baumaßnahmen an unterschiedlichen Infrastrukturanlagen erleichtert werden, so dass durch den Überblick über bevorstehende Maßnahmen und die dort anfallenden Sekundärmaterialien eine Optimierung des Stoffstrommanagements ermöglicht wird. Erste Funktionen hierfür wurden bereits umgesetzt. Die Gesamtstruktur des RekoTi GIS Plug-Ins zeigt Abbildung 2.

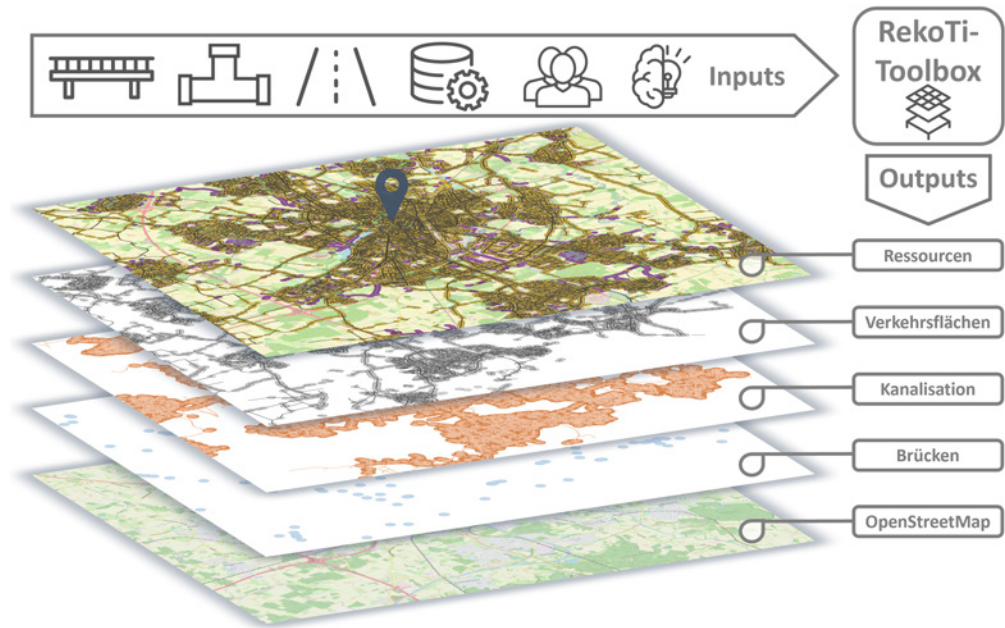


Abbildung 2: Struktur des RekoTi GIS Plug-Ins

### 3 Fazit

Das Projekt RekoTi leistet einen langfristigen Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz im kommunalen Tiefbau. Dazu werden unterschiedliche ressourcenrelevante Fragestellungen, wie die Abbildung des anthropogenen Materiallagers, alternative Bauverfahren und Bauweisen sowie die ökobilanzielle Bewertung bearbeitet und mit Hilfe einer generisch digitalen Toolbox in Kombination mit einem Leitfaden für die kommunale Anwendung bereitgestellt.

### Danksagung

Das Projekt RekoTi wird unter dem Förderkennzeichen 033R264 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) der Bundesrepublik Deutschland gefördert.

## Literaturverzeichnis

- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Ed.). (2022). Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland: Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt. <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020.html>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Ed.). (2022). Flächenverbrauch – Worum geht es? <https://www.bmuv.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/nachhaltigkeit/strategie-und-umsetzung/flaechenverbrauch-worum-geht-es>
- Knappe, F., Reinhardt, J., Bergmann, T., & Mottschall, M. (2015). Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub; Stoffströme und Potenziale unter Berücksichtigung von Neu-, Aus- und Rückbau sowie der Instandsetzung. <https://www.bmuv.de/download/substitution-von-primarrohstoffen-im-strassen-und-wegebau-durch-mineralische-abfaelle-und-bodenaushub-stoffstroeme-und-potenziale-unter-beruecksichtigung-von-neu-aus-und-rueckbau-sowie-der-instandsetzung>
- Rein, S. (Ed.). (2022). BBSR-Analysen kompakt: 2022, 01. Bericht zur Lage und Perspektive der Bauwirtschaft 2022. Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR).
- Schiller, G., Ortlepp, R., Krauß, N., Stegner, S., Schütz, H., Acosta Fernandez, J., Reichenbach, J., & Wagner, Jörg, Baumann, Janett. (2015). Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft (Texte No. 83). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kartierung-des-anthropogenen-lagers-in-deutschland>
- Statistisches Bundesamt (Ed.). (2021a). Abfallwirtschaft: Kurzübersicht Abfallbilanz - Zeitreihe. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/liste-abfallbilanz-kurzuebersicht.html>
- Statistisches Bundesamt (Ed.). (2021b, November 26). Umweltökonomische Gesamtrechnungen: Materialflüsse in Millionen Tonnen. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Tabellen/material-energiefluesse.html>

## Kontakt

*Franziska Struck M. Sc. (wissenschaftliche Mitarbeiterin)*

FH Münster, Institut für Infrastruktur, Wasser, Ressourcen und Umwelt (IWARU)

Tel.-Nr.: 0251 83 65 278

E-Mail: [f.struck@fh-muenster.de](mailto:f.struck@fh-muenster.de)

Homepage: <https://www.fh-muenster.de/rekoti/>



# Untersuchung der Auswirkungen des Dispergierens auf die Erzeugung biobasierter Produkte aus biogenen Sekundärabfällen

**Abstract:** Die Erzeugung biobasierter Produkte in Form von Carbonsäuren aus Sekundärabfall wird in Bioreaktoren ohne Durchmischung sowie mit Rührwerk zum Dispergieren untersucht. Ohne Durchmischung ist der Übergang der Carbonsäuren in das Extraktionsmittel durch die Fläche der Trennschicht begrenzt. Durch das Dispergieren sollen die Extraktion von Carbonsäuren erhöht sowie mehr Carbonsäuren erzeugt werden.

## 1 Einleitung

Der Bedarf an fossilen Primärrohstoffen steigt stetig, obwohl deren Ressourcen endlich sind (BMBF & BMEL, 2020) und der Einsatz von Primärrohstoffen wird sich bis 2060 verdoppeln (Europäische Union, 2020; OECD, 2019), so dass ein Wandel von einer linearen Wirtschaft zu einer kreislaforientierten Bioökonomie (circular bioeconomy) notwendig ist. Kreislaforientierte Bioökonomie bezeichnet die Kombination von Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie und fokussiert auf eine nachhaltige, ressourceneffiziente Verwertung von Biomasse in integrierten mehrstufigen Produktionsketten (z.B. Bioraffinerien) unter Berücksichtigung der Nutzung von Rest- und Abfallstoffen und der nachhaltigen Nutzung von Biomasse durch Kaskadierung (Stegmann et al., 2020, p. 5). Die Erzeugung biobasierter Produkte durch die Verlängerung kurzkettiger Carbonsäuren, die bereits in biogenen Sekundärabfällen enthalten sein können, hin zu mittelkettigen Carbonsäuren kann dabei einen Beitrag leisten. Carbonsäuren sind organische Verbindungen mit einer oder mehreren Carboxygruppen ( $-\text{COOH}$ ) (Federle et al., 2017), die je nach Anzahl der enthaltenen Kohlenstoffatome in kurzkettige (1-3 Kohlenstoffatome), mittelkettige (4-10 Kohlenstoffatome) und langkettige ( $>10$  Kohlenstoffatome) Carbonsäuren unterteilt werden können (Hopp, 2018). Carbonsäuren werden üblicherweise durch die chemische Synthese erdölbasierter Rohstoffe oder die Synthese natürlicher Öle, bspw. Kokosnuss- oder Palmkernöl, produziert (Anneken et al., 2000).

## 2 Zielstellung

Es sollen biogene Sekundärabfälle identifiziert und hinsichtlich ihres Potenzials zur Erzeugung biobasierter Produkte mittels Kettenverlängerung kurzkettiger Carbonsäuren, die bereits in den biogenen Sekundärabfällen enthalten sind, hin zu mittelkettigen Carbonsäuren untersucht und bewertet werden. Dazu wird ein biotechnologischer Behandlungsprozess mit Hilfe von spezialisierten Mikroorganismen und Ethanol als Nährstoff angewendet. Um eine Hemmung der Kettenverlängerung im Sekundärabfall zu verhindern (Martin C. Klose, 2000), erfolgt die Abtrennung der gebildeten mittelkettigen Carbonsäuren während des Behandlungsprozesses als in-situ Extraktion (Flüssig-Flüssig-Extraktion) durch ein unpolares Lösemittel.

Bisherige Untersuchungen zur Erzeugung mittelkettiger Carbonsäuren als biobasierte Produkte wurden in Bioreaktoren ohne Durchmischung im Labormaßstab durchgeführt. Dabei bildet das Extraktionsmittel eine Schwimmschicht oberhalb des verwendeten Sekundärabfalls und der Übergang der mittelkettigen Carbonsäuren in das Extraktionsmittel ist durch die Fläche der Trennschicht begrenzt. Zur Optimierung des Behandlungsprozesses soll untersucht werden, ob das Dispergieren von Extraktionsmittel im behandelten Sekundärabfall zu einer Erhöhung der Extraktion mittelkettiger Carbonsäuren sowie zu einer Steigerung der Erzeugung mittelkettiger Carbonsäuren beiträgt. Dafür wurde ein geeignetes Rührwerk konstruiert, welches das Extraktionsmittel in dem Sekundärabfall verteilt, ohne eine Emulsion zu bilden (siehe Kapitel 3.2). Zur Untersuchung der Auswirkungen des Dispergierens auf die Erzeugung biobasierter Produkte aus biogenen Sekundärabfällen wurde ein direkter Vergleich der Bioreaktoren mit und ohne Rührwerk durchgeführt.

### **3 Methodik**

#### **3.1 Substrat**

Als Sekundärabfall wird überschüssiges Sickerwasser einer Kompostierungsanlage verwendet, das bereits kurzkettige Carbonsäuren sowie die notwendigen Mikroorganismen, die für den biologischen Behandlungsprozess benötigt werden, enthält. Als Extraktionsmittel wird Rapsmethylester (System Chemie GmbH, fatty acid methyl ester C16-C18) verwendet, dessen Eignung für die in-situ Extraktion während des Behandlungsprozesses bereits nachgewiesen wurde. Es werden 10 Vol-% des Sekundärabfalls an Extraktionsmittel hinzugegeben. Als Nährstoff benötigen die Mikroorganismen Ethanol (Carl Roth, Ethanol 96% vergällt). Es wird eine Konzentration von  $9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  dem Sekundärabfall hinzugegeben, da bei dieser Konzentration die höchste Bildungsrate von Capronsäure (C6) während der Kettenverlängerung zu erwarten ist (Sarkar et al., 2021).

#### **3.2 Versuchsaufbau**

Der Versuchsaufbau besteht aus Batch-Bioreaktoren mit einem maximalen Fassungsvermögen von 16 Litern und einem maximalen Betriebsvolumen von 14 Litern. Um anaerobe Betriebsbedingungen zu gewährleisten, sind die Bioreaktoren luftdicht verschließbar und das Kopfraumvolumen wird zu Beginn der Untersuchungen mit Inertgas gespült. Über eine Temperierkammer wird der Inhalt der Bioreaktoren erwärmt. Die in-situ Extraktion ist als Flüssig-Flüssig-Extraktion realisiert. Über verschiedene Probenahmestellen werden Proben des Sekundärabfalls sowie des Extraktionsmittels genommen. Es sind zwei Probenahmestellen für Sekundärabfall vorgesehen; eine im unteren Bereich und eine im oberen Bereich des Bioreaktors. Aus diesen beiden Proben wird eine Mischprobe erzeugt. Die Probenahme für das Extraktionsmittel muss bei unterschiedlichen Füllständen möglich sein, da das Extraktionsmittel auf der Oberfläche des Sekundärabfalls aufschwimmt. Dafür ist das Ventil zur Probenahme des Extraktionsmittels mit einem flexiblen Schlauch an einem Schwimmer befestigt und ermöglicht so jederzeit die Probenahme des Extraktionsmittels. Über ein Ventil im Deckel des Bioreaktors kann entstehendes Biogas in einem Folienbeutel aufgefangen werden.

Die Bioreaktoren mit und ohne Rührfunktion sind bis auf das Rührwerk identisch aufgebaut. Das Rührwerk besteht aus einem Motor (Brushless DC Motor, BPC Instruments AB) und einem Rührer. Es wird ein Balkenrührer verwendet, der eine Kombination aus Schrägblattrührer und Ankerrührer bildet (Hemming & Wagner, 2017; Leonie Wenzel, 2022). Die Drehgeschwindigkeit des Rührers beträgt etwa 70 RPM. Die Bioreaktoren ohne Rührfunktion sind anstelle des Rührwerks mit einem Blinddeckel ausgestattet. Die nachfolgende



Abbildung 1 veranschaulicht die technische Umsetzung des beschriebenen Bioreaktors mit Rührfunktion (links) und die schematische Zeichnung (rechts).

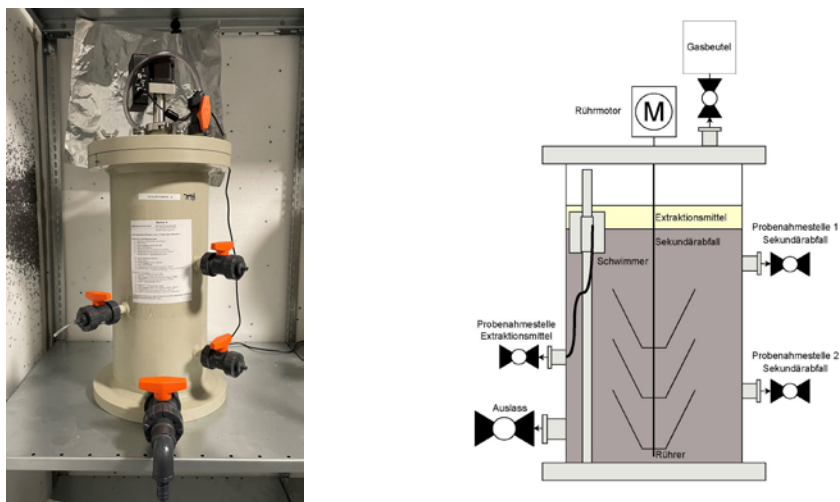


Abbildung 1: Schematische Zeichnung des Versuchsaufbaus (rechts, nach Leonie Wenzel, 2022)

Tabelle 1 zeigt einen Überblick der Zusammensetzung innerhalb der Bioreaktoren. Es werden jeweils vier Bioreaktoren mit Rührfunktion und ohne Rührfunktion verwendet. Jeweils zwei der Bioreaktoren dienen als Doppelbestimmung des biologischen Behandlungsprozesses inkl. in-situ Extraktion, je ein Bioreaktor wird ohne biologischen Behandlungsprozess inkl. in-situ Extraktion betrieben und jeweils ein Bioreaktor dient als Referenzreaktor. Die Untersuchungsdauer beträgt 28 Tage bei einer Betriebstemperatur von  $37^{\circ}\text{C} \pm 1$ . Der optimale pH-Wert im Sekundärabfall sollte im Bereich zwischen 6,0 und 6,5 liegen, um eine ungewünschte Methanproduktion zu unterdrücken. Dazu wird der pH-Wert zu Beginn der Untersuchung mit Salzsäure ( $c = 2,87 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) auf 6,0 eingestellt.

Tabelle 1: Überblick der Zusammensetzung in den Bioreaktoren (CE = Kettenverlängerung, LLE = Flüssig-Flüssig-Extraktion)

Bioreaktor	Rührfunktion	Sekundärabfall	Extraktionsmittel	Ethanol
CE + LLE 1.1	Ja	12 L	1,2°L	$9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
CE + LLE 1.2	Ja	12 L	1,2°L	$9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
CE + LLE 2.1	Nein	12 L	1,2°L	$9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
CE + LLE 2.2	Nein	12 L	1,2°L	$9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
LLE 1	Ja	12 L	1,2°L	-
LLE 2	Nein	12 L	1,2°L	-
Blind 1	Ja	12 L	-	-
Blind 2	Nein	12 L	-	-

## Ausblick

Derzeit liegen noch keine abschließenden Ergebnisse der Untersuchungen vor. Diese sollen im Rahmen des Wissenschaftskongresses vorgestellt werden.

## Danksagung

Die Untersuchungen wurden durch das Forschungszentrum Nachhaltige Prozesse und Verfahren der Hochschule Darmstadt, einem Mitglied der European University of Technology (EUT+), sowie durch das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Forschungsprojekt „Kombination und Erweiterung von Behandlungsverfahren für biologische Abfälle und Reststoffe um Bioraffinationseinheiten zur Erzeugung hochwertiger biobasierter Produkte“ (BMBF, FZK 031B0661B) unterstützt.

## Literatur

- Anneken, D. J., Both, S., Christoph, R., Fieg, G., Steinberger, U., & Westfechtel, A. (2000). Fatty Acids. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. [https://doi.org/10.1002/14356007.a10\\_245.pub2](https://doi.org/10.1002/14356007.a10_245.pub2)
- BMBF, & BMEL. (März 2020). Nationale Bioökonomiestrategie. Berlin. Referat Nachhaltiges Wirtschaften, Bioökonomie (BMBF); Referat Bioökonomie, Stoffliche Biomassenutzung (BMEL). [https://biooekonomie.de/sites/default/files/2022-04/bmbf\\_nationale\\_biooekonomiestrategie\\_langfassung\\_DE\\_22.pdf](https://biooekonomie.de/sites/default/files/2022-04/bmbf_nationale_biooekonomiestrategie_langfassung_DE_22.pdf)
- Europäische Union. (2020). Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft - Factsheet: Der europäische Grüne Deal. Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union. <https://doi.org/10.2775/681268>
- Federle, S., Hergesell, S., & Schubert, S. (2017). Die Stoffklassen der organischen Chemie: Praktisch und kompakt von Studenten erklärt (1. Aufl. 2017). Springer Berlin Heidelberg. <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflucht-1563114>
- Hemming, W., & Wagner, W. (2017). Verfahrenstechnik (12., korrigierte Auflage). Kamprath-Reihe. Vogel Media Business; Preselect.media GmbH. <https://content-select.com/de/portal/media/view/58a58b74-ebec-413d-8599-33ddb0dd2d03>
- Hopp, V. (2018). Chemische Kreisläufe in der Natur: Chemie - Biologie - Energetik (2. Aufl. 2018). Springer Berlin Heidelberg. <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflucht-1558490>
- Leonie Wenzel. (2022). Auswirkung des Dispergierens auf die fermentative Extraktion - am Beispiel des Prozesswassers einer Behandlungsanlage für Kunststoffabfälle [unveröffentlichte Masterarbeit]. University of Applied Sciences, Darmstadt.
- Martin C. Klose. (2000). Fermentation mit In-situ-Extraktion und In-situ-Elektroextraktion [Dissertation]. Technische Universität München, München. <https://d-nb.info/962119555/34>
- OECD. (2019). Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences. OECD. [https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-material-resources-outlook-to-2060\\_9789264307452-en](https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-material-resources-outlook-to-2060_9789264307452-en) <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>
- Sarkar, O., Rova, U., Christakopoulos, P., & Matsakas, L. (2021). Ethanol addition promotes elongation of short-chain fatty acids to medium-chain fatty acids using brewery spent grains as substrate. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(5), 105990. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105990>

Stegmann, P., Londo, M., & Junginger, M. (2020). The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resources, Conservation & Recycling*: X, 6, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100029>

### **Kontakt**

*Kyra Atessa Vogt, M.Eng., wissenschaftliche Mitarbeiterin*

Hochschule Darmstadt

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen

Tel.-Nr.: +49(0)6151 533-68169

E-Mail: [kyra-atessa.vogt@h-da.de](mailto:kyra-atessa.vogt@h-da.de)

Homepage: [www.fbbu.h-da.de](http://www.fbbu.h-da.de)



## Anaerobe Co-Vergärung von Papierschlämmen in mechanisch-biologischen Abfallanlagen (MBAs)

**Abstract:** Im Rahmen einer Studie wurde die anaerobe Vergärung von Papierschlamm als Co-Substrat in MBAs untersucht. Es wurden 20 Papierschlämme hinsichtlich ihres Methanbildungspotenzials, verschiedener Schadstoffgehalte und weiterer biochemischen Eigenschaften charakterisiert. Das Methanbildungspotenzial der untersuchten Papierschlämme liegt zwischen 90 – 355 NL CH<sub>4</sub>/kg oTS. In anschließenden semikontinuierlichen Co-Vergärungsversuchen zeigen die Papierschlämme gute Methanbildungsraten, während ein Schlamm Hemmungen verursacht und einen Anstieg der Viskosität anzeigt. Die durchschnittliche Schwermetallbelastung in allen Papierschlämmen lag im Vergleich zu anderen Industrieschlämmen relativ niedrig. Generell kann die Co-Vergärung von Papierschlamm in MBA-Anlagen eine praktikable Option für die Energieerzeugung sein.

### 1 Einleitung

Bei der Herstellung von Papier fallen große Mengen Papierschlamm an, welche große Umweltprobleme verursachen können. Im Jahr 2021 wurden in Europa 91 Millionen Tonnen Papier und Karton produziert (CEPI, 2021), davon wurden rund 23 Mio. Tonnen in Deutschland hergestellt (Die Papierindustrie e.V., 2022). Es fallen dabei rund 3,8 Millionen Tonnen an Reststoffen an, die größtenteils aus Papierschlämmen bestehen. Diese bestehen wiederum hauptsächlich aus Cellulose, Hemicellulose, Lignin, Bindemittel, Holzharz, Kalziumkarbonat und Asche (Matúš et al., 2018). Weltweit werden die meisten Papierschlämme auf Deponien entsorgt oder zunächst verbrannt und dann deponiert (Bajpai, 2015a). Dies kann zu starken Boden- und Grundwasserkontaminationen sowie zu Treibhausgasemissionen führen (Guerrini et al., 2017). Eine weitere Entsorgungsmöglichkeit stellt die Verbrennung dar, welche aufgrund des hohen Wassergehalts energetisch und ökonomisch nicht sinnvoll ist (Kinnunen et al. 2015). Der Entsorgungspfad, welcher in dieser Studie untersucht wurde, ist die anaerobe Vergärung von Papierschlamm. Vorteile dieser Behandlung sind die Energieerzeugung und die Vermeidung von Treibhausgasen bei gleichzeitigem Abbau der Organik in den Papierschlämmen (Gievers et al, 2022). In dieser Studie lag der Schwerpunkt auf der Behandlung von Papierschlämmen als Co-Substrat für die Vergärung auf MBAs als ökonomisch und ökologisch sinnvollem Entsorgungspfad.

### 2 Methodik

In dieser Studie wurden 20 Papierschlämme aus 14 Papierfabriken in Deutschland untersucht. Die Papierschlämme entstehen in den Kläranlagen der Papierfabriken nach der Erstbehandlung als Primärschlamm (PS) und der Zweitbehandlung als biologischer Schlamm (BS) der Abwasserströme, die bei der Papierher-

stellung entstehen. Deinkingschlämme (DS) entstehen nach der Druckfarbenentfernung bei der Altpapier-aufbereitung. Die resultierenden Schlämme sind je nach Herstellung und Abwasserbehandlung in der Regel sehr vielfältig (Gottumukkala et al., 2016). Aufgrund einer besseren Entwässerbarkeit werden PS und BS oft gemischt und in Papierfabriken als ein Abfallstrom behandelt. Daher wurde dieser gemischte Schlamm unter der Bezeichnung Faserschlamm (FS) kategorisiert (Gievers et al., 2022).

## **2.1 Bestimmung des Methanbildungspotenzials**

Zur Beurteilung des anaeroben Abbaus von Papierschlamm wurde das Biogas- und Methanbildungspotenzial (MBP) an 20 verschiedenen Proben nach dem VDI 4630 Batch-Verfahren mit drei Wiederholungen pro Probe untersucht. Es wurden vier Deinkingschlämme, acht Primär- und acht Bioschlämme untersucht. Für die Untersuchungen wurden 30-L-PET-Fässer als Reaktoren verwendet, welche in einer Klimakammer unter mesophilen Bedingungen (38 °C) temperiert wurden. Das entstehende Biogas wurde in Gassäcken aufgefangen. Zur Charakterisierung der eingesetzten Substrate und ihrer Vergleichbarkeit wurde an jedem Papierschlamm und an jedem Impfschlamm der Trockensubstanzgehalt (TS) sowie die organische Trockensubstanz (oTS) bestimmt. Als Impfsubstrat wurde Klärschlamm aus einer kommunalen Kläranlage verwendet. Die Qualität und Quantität des gebildeten Biogases wurde arbeitstäglich mit Hilfe eines Infrarot-Messgeräts und einen Trommelgaszähler bestimmt.

## **2.2 Semikontinuierliche Versuche**

Ziel der Untersuchungen war es, herauszufinden, ob hemmende Effekte durch die semikontinuierliche Co-Vergärung von ausgewählten Papierschlämme auftreten. Im Vergleich zu den Batch-Versuchen bieten kontinuierliche Versuche ein besseres Verständnis der Auswirkungen von Verweilzeit, der org. Raumbelastung und der Anpassung der Mikroorganismen an hemmende Substanzen (Chen et al., 2008; Shen et al., 2017). Im Gegensatz zu den Batchversuchen wurde der BS und der PS als gemischter Faserschlamm (FS) verwendet, so wie er in der Papierfabrik anfiel. Es wurden drei DS und drei FS für die Vergärung in volldurchmischten Fermentern auf der Grundlage des MBP ausgewählt. Die aerobe Stabilisierung und die Rezykulation des Prozesswassers wurde entsprechend einer anaeroben Vergärung in MBAs simuliert. Die Versuche wurden unter mesophilen Bedingungen in 12 Reaktoren mit 30 Liter Versuchsvolumen in 3-fach Wiederholung durchgeführt. Die zugeführte Organik wurde zu 90% aus einer Substratmischung und zu 10% aus Papierschlamm gedeckt. Die Verweilzeit betrug 14 Tage mit einer Raumbelastung von 4,3 kg oTS /m<sup>3</sup>\*d. Der Gärrest der Fermenter wurde separiert und die flüssige Fraktion wurde belüftet. Die flüssige Fraktion wurde dann als Prozesswasser wieder in den entsprechenden Fermenter zurückgeführt.

## **2.3 Begleitanalytik**

Um eine Aussage darüber treffen zu können, welche Schlämme sich besonders als Co-Substrate für die Vergärung in anaeroben Vergärungsanlagen von MBAs eignen, wurden verschiedene Analysen durchgeführt. Es wurden Parameter wie die Trockensubstanz (TS), org. Trockensubstanz (oTS) und die Nährstoffgehalte bestimmt. Darüber hinaus wurden Untersuchungen zu potenziell hemmenden und toxischen Schadstoffen wie Schwermetalle (HM), Mineralölkohlenwasserstoffe (MOHs) und AOX durchgeführt. Die TS- und oTS Bestimmung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12880:2001-02 und DIN EN 15935:2012-11. Die Schwermetallanalysen wurden nach DIN EN ISO 11885:2009-09 mittels ICP-OES nach einem Königswasser-Extrakt der Feststoffe (ISO 11466:1995-03) durchgeführt. Die Analyse der Kohlenwasserstoffe aus

Mineralöl (MOSH und MOAH) in den Schlammproben erfolgte mittels Festphasenextraktion und GC-FID nach dem vom Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) (2012) empfohlenen Verfahren.

## 2.4 Charakterisierung der Papierschlämme

Der TS-Gehalt der untersuchten Deinkingschlämme lag mit 60 bis 66 % am höchsten, während der oTS-Gehalt mit 23% FM sehr niedrig war. Dies ist auf den hohen Anteil an anorganischen Stoffen zurückzuführen, die zu einer Sinkschicht in den Fermentern führen und Abrieb verursachen können. Außerdem erhöht sich durch den geringen Wassergehalt von DS die Viskosität des Gärrestes und damit auch der Energieaufwand beim Rühren. Bei den Primärschlamm lag der TS-Gehalt mit 36 % viel niedriger und der oTS-Gehalt liegt im Durchschnitt bei 22 % FM. Der niedrigste TS- (23 % FM) und oTS-Gehalt (15 % FM) wurde für die Bioschlämme festgestellt. Zusätzlich zu den Feststoffen wurden alle Papierschlämme auf Schwermetalle, AOX und MOHs untersucht, um die Umwelttoxizität und mögliche Auswirkungen auf die Prozessbiologie und die Behandlung der Gärreste zu bewerten (Tabelle 1).

Tabelle 1: Gehalte an Schwermetalle, Nährstoffe, AOX und MOH in mg/kg in Deinking-, Primär und Bioschlamm

Element	Einheit	DS				PS				BS			
		Mittelwert	Min	Max	RSD (%)	Mittelwert	Min	Max	RSD (%)	Mittelwert	Min	Max	RSD (%)
Al	(mg/kg)	1966.7	1500.0	2400.0	22.9	6457.1	1000.0	28000.0	151.2	9414.3	1500.0	25000.0	100.6
As	(mg/kg)	45089.0	45144.0	16.0	40.1	45086.0	< 5	26.0	81.9	45143.0	< 5	10.0	32.1
Pb	(mg/kg)	45122.0	< 5	22.0	59.3	45052.0	< 5	45025.0	31.6	45024.0	< 5	19.0	65.4
Cd	(mg/kg)	< 0.4	< 0.4	< 0.4	-	0.5	< 0.4	0.8	45137.0	1.0	< 0.4	10.0	64.6
Ca	(mg/kg)	216666.7	180000.0	270000.0	21.8	66571.4	33000.0	130000.0	50.2	97857.1	40000.0	150000.0	40.6
Cr	(mg/kg)	45117.0	44929.0	18.0	69.7	9.0	45110.0	16.0	48.4	45056.0	44931.0	15.0	42.7
Fe	(mg/kg)	800.0	680.0	970.0	18.9	644.3	210.0	1200.0	66.7	3112.9	450.0	14000.0	156.6
K	(mg/kg)	148.7	56.0	200.0	54.1	169.4	53.0	300.0	50.9	1764.3	300.0	3900.0	84.6
Cu	(mg/kg)	144.0	42.0	200.0	61.4	32.0	< 3	69.0	85.3	40.6	11.0	67.0	53.1
Mg	(mg/kg)	2900.0	2700.0	3100.0	6.9	2714.3	1400.0	4100.0	32.8	2357.1	1200.0	3700.0	32.4
Ni	(mg/kg)	45080.0	< 3	45142.0	28.9	45049.0	< 3	45112.0	44955.0	44931.0	< 3	45085.0	43.3
P	(mg/kg)	200.0	160.0	230.0	18.0	452.9	170.0	900.0	58.9	4328.6	1000.0	9300.0	71.6
Si	(mg/kg)	403.3	380.0	420.0	5.2	472.9	320.0	780.0	34.7	508.6	390.0	650.0	45035.0
Zn	(mg/kg)	43.0	17.0	57.0	52.4	43.3	44963.0	120.0	94.5	73.1	33.0	120.0	43.8
AOX	(mg/kg)	155.3	61.0	230.0	45.1	140.6	56.0	260.0	53.7	146.1	60.0	280.0	45.0
MOH	(mg/kg)	6601.8	3390.0	11470.0	52.1	2042.3	140.0	5450.0	101.8	1084.3	235.0	2196.1	65.3

Die Gehalte einiger Elemente schwanken in den einzelnen Schlammproben stark. Dies könnte mit den unterschiedlichen Substraten und Behandlungsverfahren in den untersuchten Papierfabriken zusammenhängen. Der hohe Gehalt an Calcium in DS kann sich positiv auf die Prozessstabilität auswirken, da die Pufferkapazität in Form von Karbonaten erhöht werden kann. Im Allgemeinen waren die meisten Schwermetallkonzentrationen in den Papierschlamm unter den Grenzwerten der Bioabfallverordnung. Im Rahmen des Projektes wurden jedoch keine Gärrestanalysen durchgeführt, da MBA-Gärreste in der Regel nicht für die landwirtschaftliche Verwertung bestimmt sind.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Methanbildungspotenzial

Im Allgemeinen wiesen die Methanbildungspotenziale der untersuchten PS und BS eine große Schwankungsbreite von 90 bis 355 NL CH<sub>4</sub>/kg oTS auf, was hauptsächlich auf die unterschiedlichen Substrate des Papierherstellungsprozesses zurückzuführen ist. Die Methanausbeuten nach 20 Tagen betrugen im

Durchschnitt 84 — 89 % der Gesamtausbeuten, was auf eine gute Abbaubarkeit durch die Mikroorganismen hinweist. Die durchschnittlichen Methanerträge von PS (228 NL CH<sub>4</sub>/kg oTS) und BS (232 NL CH<sub>4</sub>/kg oTS) waren recht ähnlich.

### 3.2 Semikontinuierliche anaerobe Vergärung

In den semikontinuierlichen Versuchsreihen zeigten die drei Varianten mit Deinkingschlamm unter stabilen Prozessbedingungen durchschnittliche Methanerträge von 230-290 NL CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> oTS. Die zugeführte Organik von 10 % aus Deinkingschlamm, die über einen Zeitraum von 49 Tagen ausgewertet wurde, führte zu zusätzlichen Methanerträgen von durchschnittlich 4,9 % bis 6,5 %. Bei zwei von drei untersuchten FS traten keine Hemmungen auf, während bei einem FS Hemmungen beobachtet wurden und der Versuch am Tag 54 abgebrochen wurde. Die Hemmung trat vermutlich aufgrund der Schimmelbildung während der Lagerung und der langen Transportphase auf. Die Ergebnisse der Viskositätsmessung zeigten, dass die Zugabe von Papierschlamm zu einem deutlichen Anstieg der Viskosität des Prozesswassers um den Faktor zwei führte. Offensichtlich ist die Viskosität des Prozesswassers sehr stark von der Wahl des Substrats abhängig.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass fünf von sechs Schlämmen mit guter Methanbildung anaerob vergoren werden konnten und der Prozess auch bei Rückführung des Prozesswassers nicht gehemmt wurde, obwohl ein leichter Anstieg der Viskosität zu beobachten war. Schließlich zeigen die kontinuierlichen Versuche zur Co-Vergärung der Papierschlämme, dass insbesondere bei der Vergärung von FS gute Methanerträge zu erwarten sind, die in den durchgeführten Versuchen in der Größenordnung des Standardsubstrats liegen. Im Hinblick auf die Lagerfähigkeit sollten Schlämme gewählt werden, die nicht zur Schimmelbildung neigen oder eine Viskositätserhöhung verursachen.

## 4 Fazit

Die generelle Machbarkeit einer anaeroben Co-Vergärung verschiedener Papierschlämme konnte sowohl in BMP-Tests als auch in halbkontinuierlichen Versuchen in CSTRs nachgewiesen werden. Allerdings waren einige Papierschlämme für die AD-Behandlung besser geeignet als andere. Mögliche Erklärungen für die teilweise reduzierten Methanproduktionsraten in BMP-Versuchen für einige Papierschlämme und damit für die große Bandbreite der erzielten Methanausbeuten könnten die Konzentrationen bestimmter Schwermetalle und anderer hemmender Substanzen sowie die generell unterschiedliche Zusammensetzung der Papierschlämme sein.

## Danksagung

Das Projekt Vergärung von Papierschlämmen in MBAs wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert.



## Literatur/Quellen

- Bajpai, P., 2015a. Green Chemistry and Sustainability in Pulp and Paper Industry. Springer International Publishing, Cham.
- Bajpai, P., 2015b. Management of Pulp and Paper Mill Waste. Springer International Publishing, Cham.
- CEPI Confederation of European Paper Industries (2021): Key statistics 2021. European pulp and paper industry. Brüssel.
- Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S., 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. *Bioresour. Technol.* 99, 4044–4064. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- Die Papierindustrie e.V. (2022): Kennzahlen Zellstoff- und Papierindustrie in Deutschland. Papier, Karton und Pappe insgesamt 2021. [https://www.papierindustrie.de/fileadmin/0002-PAPIERINDUSTRIE/07\\_Dateien/1\\_Statistik/2021/PresseZahlen\\_2021\\_01.pdf](https://www.papierindustrie.de/fileadmin/0002-PAPIERINDUSTRIE/07_Dateien/1_Statistik/2021/PresseZahlen_2021_01.pdf), abgerufen am 09.01.2023
- Faubert, P., Belisle, C.L., Bertrand, N., Bouchard, S., Chantigny, M.H., Paré, M.C., Rochette, P., Ziadi, N., Villeneuve, C., 2019. Land application of pulp and paper mill sludge may reduce greenhouse gas emissions compared to landfilling. *Resour. Conserv. Recycl.* 150, 104415. <https://doi.org/10.1016/j.res-conrec.2019.104415>
- Gievers, F., Walz, M., Loewe, K., Loewen, A., Bienert, C., 2022. Anaerobic co-digestion of paper sludge: Feasibility of additional methane generation in mechanical-biological treatment plants. *Waste management*. 11.04.2022. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.016>
- Gottumukkala, L.D., Haigh, K., Collard, F.-X., van Rensburg, E., Gorgens, J., 2016. Opportunities and prospects of biorefinery-based valorisation of pulp and paper sludge. *Bioresour. Technol.* 215, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.015>
- Guerrini, A., Carvalho, P., Romano, G., Cunha Marques, R., Leardini, C., 2017. Assessing efficiency drivers in municipal solid waste collection services through a non-parametric method. *Journal of Cleaner Production* 147, 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.079>
- Hu, Y., Kumar, M., Wang, Z., Zhan, X., Stengel, D.B., 2021. Filamentous microalgae as an advantageous co-substrate for enhanced methane production and digestate dewaterability in anaerobic co-digestion of pig manure. *Waste Manage. (New York, N.Y.)* 119, 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.041>
- Mainardis, M., Buttazzoni, M., Gievers, F., Vance, C., Magnolo, F., Murphy, F., Goi, D., 2021. Life cycle assessment of sewage sludge pretreatment for biogas production: From laboratory tests to full-scale applicability. *J. Cleaner Prod.* 322, 129056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129056>
- Matúš, M., Križan, P., Šooš, L., Beniák, J., 2018. The effect of papermaking sludge as an additive to biomass pellets on the final quality of the fuel. *Fuel* 219, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.089>
- Shen, Y., Forrester, S., Koval, J., Urgun-Demirtas, M., 2017. Yearlong semi-continuous operation of thermophilic two-stage anaerobic digesters amended with biochar for enhanced biomethane production. *J. Cleaner Prod.* 167, 863–874. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.135>

## Kontakt

*M.Eng. Meike Walz, wissenschaftliche Mitarbeiterin*

Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst HAWK Göttingen, Fachgebiet NEUTec

Tel.-Nr.: +49 551 5032-270

E-Mail: [meike.walz@hawk.de](mailto:meike.walz@hawk.de)

Homepage: [www.hawk.de](http://www.hawk.de)



## Energetische und stoffliche Verwertung von Bioabfällen an Kläranlagen

**Abstract:** Die Co-Vergärung von Bioabfällen und Klärschlämmen in den Faultürmen auf Tiroler Kläranlagen ist ein etablierter Prozess. Der Gärrest aus der Co-Vergärung darf aufgrund gesetzlicher Regelungen allerdings nicht auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht werden und wird häufig einer Verbrennung zugeführt. Dies verhindert eine stoffliche Nutzung der in den Bioabfällen enthaltenen Nährstoffe. Im Rahmen eines Projekts wird untersucht, ob es unter technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekten sinnvoll ist, die Klärschlämme und Co-Substrate an der Kläranlage des Abwasserverbandes Großache-Nord getrennt zu vergären und aus dem Gärrest der Bioabfallvergärung einen regional verwertbaren Dünger zu produzieren. Die ermittelten Betriebskennzahlen der Faultürme bei einer getrennten Vergärung von Klärschlämmen und Co-Substraten haben die grundsätzliche Machbarkeit dieses Ansatzes gezeigt. Mit Hilfe einer bereits laufenden Störstoffanalytik soll evaluiert werden, inwieweit die Gärreste aus der separaten Vergärung der Co-Substrate für eine landwirtschaftliche Verwertung geeignet sind. In den weiteren Untersuchungen muss zudem geklärt werden, ob die getrennte Vergärung wirtschaftlich darstellbar ist.

### 1 Einleitung

Um die nationalen und internationalen Klimaziele zu erreichen, müssen alle erneuerbaren Energiequellen genutzt werden. Aus biogenen Reststoffen der Landwirtschaft, kommunaler Bioabfallsammlung, Kläranlagen und Industrie kann Biomethan produziert und so fossiles Erdgas ersetzt werden. Biogene Abfälle sind eine wertvolle Ressource für eine nachhaltige Energieversorgung und ein Schritt zur Unabhängigkeit von Energieimporten. In Tirol hat sich die sogenannte Co-Vergärung von Bioabfällen mit Klärschlämmen an Kläranlagen besonders intensiv entwickelt. Dabei werden die biogenen Abfälle gemeinsam mit den Klärschlämmen vergoren. Der anfallende Gärrest bzw. der entwässerte Klärschlamm aus der gemeinsamen Vergärung darf aufgrund gesetzlicher Regelungen nicht auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht werden. In der Regel erfolgt daher die Verbrennung des Klärschlammes, die eine stoffliche Nutzung als Düngemittel verhindert. Zudem sind in den letzten Jahren die Entsorgungskosten für den Klärschlamm rapide angestiegen und machen mittlerweile einen bedeutenden Anteil der Betriebskosten einer Kläranlage aus.

Die zentrale Fragestellung der Studie ist es zu untersuchen, ob es unter technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekten sinnvoll ist, die Substrate getrennt zu vergären und aus dem Gärrest der Bioabfallvergärung einen regional verwertbaren Dünger zu produzieren. Somit könnte einerseits die zu

entsorgende Menge an Klärschlamm reduziert und andererseits der Gärrest der Bioabfallvergärung stofflich und regional genutzt werden.

## 2 Methodik

Die Kläranlage des Abwasserverbandes (AWV) Großache-Nord (Tirol, Österreich, Ausbaupazität 70.000 EW<sub>CSB120</sub>) verfügt über 2 Faultürme mit einem Volumen von jeweils 1.700 m<sup>3</sup>. Die Faultürme werden derzeit seriell betrieben und Klärschlämme sowie Co-Substrate (Bioabfälle und Fettabscheiderinhalte) werden gemeinsam vergoren. Es ist prinzipiell möglich, dass die Substrate getrennt vergärt werden, wobei in einem Faulturm die bisher eingesetzten Co-Substrate und im anderen Faulturm die Klärschlämme verarbeitet werden. Die Machbarkeitsstudie soll ein Konzept liefern, ob und wie an einer Kläranlage eine getrennte Behandlung von Bioabfällen und Klärschlämmen realisiert werden kann.

Im Rahmen der Studie wird erhoben, inwieweit die bestehende Infrastruktur geeignet ist, um die gesammelten Bioabfälle getrennt zu vergären und welche zusätzlichen Investitionen notwendig sind, um eine getrennte Behandlung zu ermöglichen. Des Weiteren sollen Kenntnisse über die in den Bioabfällen enthaltenen Störstoffe (Kunststoff, Glas etc.), inwieweit die Störstoffe ein Problem für die landwirtschaftliche Verwertung des Gärrests darstellen und welche weiteren Optionen für die Weiterverarbeitung des Gärrestes der „Biolinie“ bestehen, gewonnen werden. Zusätzlich werden der Bedarf bzw. die Nachfrage nach organischen Düngern in der Region erhoben und mögliche durch die getrennte Vergärung bedingte Veränderungen in den Gärrestmengen für die Entsorgung untersucht.

## 3 Ergebnisse

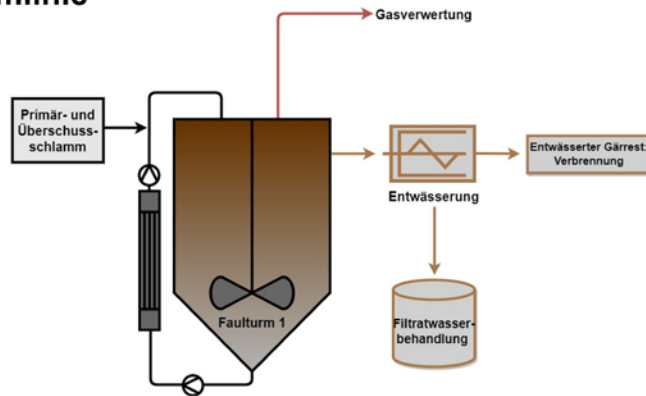
Tabelle 1 zeigt die Betriebskennzahlen der beiden Faultürme nach der Umstellung auf eine getrennte Vergärung von Co-Substraten und Klärschlämmen. In beiden Faultürmen liegt eine ausreichend lange hydraulische Verweilzeit und eine dadurch bedingte geringe organische Belastung vor. Aufgrund dieser Kennzahlen sind die grundsätzlichen Voraussetzungen erfüllt, um einen stabilen Vergärungsprozess zu gewährleisten.

*Tabelle 1: Betriebskennzahlen der Faultürme nach der Umstellung auf eine getrennte Vergärung von Klärschlämmen und Co-Substraten*

	<b>Faulturm 1: Klärschlammlinie</b>	<b>Faulturm 2: Biolinie</b>
Arbeitsvolumen Faulturm (m <sup>3</sup> )	1.450	1.450
Hydraulische Verweilzeit (Tage)	39	216
Organische Raumbelastung (kg oTR/(m <sup>3</sup> *d))	1,1	0,6

Die beiden Vergärungslinien sind detailliert in Abbildung 1 dargestellt. Weitestgehend soll die bereits vorhandene Infrastruktur genutzt werden, um eine getrennte Vergärung umzusetzen. Die Vergärung der Bioabfälle und Fettabseiderinhalte erfordert jedoch auf Grundlage der Tierischen Nebenprodukte Verordnung (Nr. 1069/2009) der Europäischen Union eine Hygienisierungsstufe (EU 2009). Weitere Adaptierungen können die Behandlung und Verwertung des Gärrests aus der Biolinie betreffen, wobei diese von der Qualität des Gärrests, insbesondere der enthaltenen Störstoffe, abhängig sind. Geplant ist eine landwirtschaftliche Verwertung der Gärreste, um die enthaltenen Nährstoffe in den lokalen Stoffkreislauf zurückzuführen. Inwiefern die landwirtschaftliche Verwertung erfolgen kann, muss eine bereits laufende Störstoffanalytik zeigen. Die Gärreste aus der Vergärung der Klärschlämme werden weiterhin einer Verbrennung zugeführt.

## Klärschlammlinie



## Biolinie

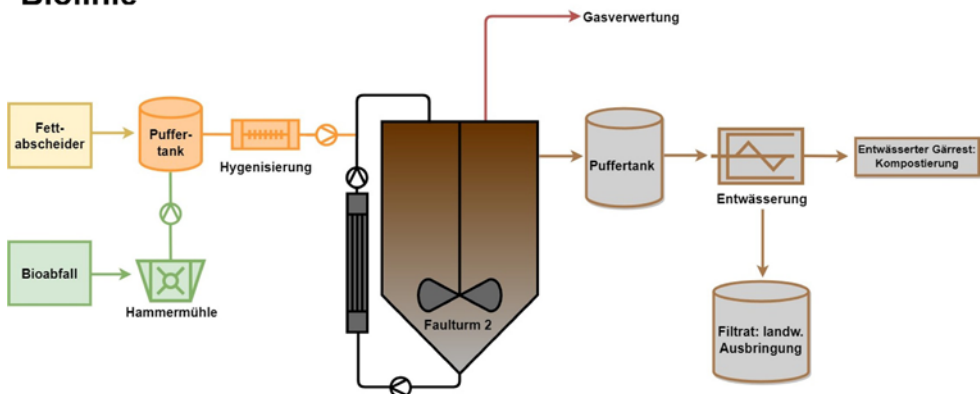


Abbildung 1: Fließschemata der Klärschlamm- und Biolinie nach der Umstellung auf eine getrennte Vergärung.

## 4 Schlussfolgerungen

Das Konzept einer getrennten Vergärung von Klärschlämmen und Bioabfällen wurde bisher an Kläranlagen noch nicht erprobt und soll erstmalig anhand des Beispiels der Kläranlage des AWV Großsache Nord vertieft untersucht werden. Die ersten Projektergebnisse haben gezeigt, dass eine getrennte Vergärung aufgrund der ermittelten Betriebskennzahlen der Faultürme grundsätzlich machbar ist. Die weiteren Untersuchungen müssen nun zeigen, ob die getrennte Vergärung wirtschaftlich darstellbar ist. Der Ansatz einer getrennten Vergärung von Klärschlämmen und Co-Substraten könnte auch auf andere Regionen übertragbar sein, in denen bisher die Co-Vergärung praktiziert wird. Durch das Behandlungskonzept könnten Entsorgungskosten reduziert sowie die stoffliche und energetische Nutzung der Bioabfälle ermöglicht werden.

## Danksagung

Wir bedanken uns beim Projektträger Regio-Tech GmbH und für die Förderung im Programm „Investition in Wachstum und Beschäftigung (IWB)“ aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE).

## Literatur/Quellen

EU (2009): Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 (Verordnung über tierische Nebenprodukte)

## Kontakt

*Dr. Marco Wehner, wissenschaftlicher Mitarbeiter*

Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Umwelttechnik

Tel.-Nr. +43 512 507 62125

E-Mail: [marco.wehner@uibk.ac.at](mailto:marco.wehner@uibk.ac.at)

Homepage: <https://www.uibk.ac.at/umwelttechnik/index.html>

## Nachhaltige Verwendung von Lebensmittelabfällen am Beispiel der Schwarzen Soldatenfliege

**Abstract:** *Die Schwarze Soldatenfliege eignet sich als Proteinquelle für die Futtermittelindustrie und bietet somit eine Alternative zum Import von eiweißreichen Futtermitteln wie bspw. Soja. Die Verwendung von Lebensmittelabfällen zur Mast der Soldatenfliegen-Larven ermöglicht in diesem Zusammenhang die nachhaltige Futtermittelproduktion. Im Rahmen des Projektes wurde das Mastverhalten der Soldatenfliegen-Larven in Abhängigkeit qualitativ unterschiedlicher Lebensmittelabfälle analysiert. Zielsetzung war es, die Auswirkungen unterschiedlicher Lebensmittelabfälle auf das Wachstumsverhalten der Soldatenfliegen-Larven zu charakterisieren. Hierbei stand auch die Optimierung der äußeren Rahmenbedingungen im Untersuchungsfokus.*

*Die Ergebnisse zeigen, dass sich ein Substrat aus Obst- und Gemüseabfällen positiv auf die spezifische Wachstumsrate der Soldatenfliegen-Larven auswirkt. Im Gegenzug sind Rübenschnitzel (Abfall/Nebenprodukt der Zuckerherstellung) weniger zur Aufzucht geeignet, was sich in einer deutlich reduzierten Zuwachsrate der Soldatenfliegen-Larven äußert.*

*Insgesamt können die Larven der Schwarzen Soldatenfliege ein breites Spektrum an Futtersubstraten aus Lebensmittelabfällen verwerten. Der jeweils realisierbare Zuwachs der Soldatenfliegen-Larven ist dabei stark vom eingesetzten Lebensmittelabfall und den äußeren Randbedingungen (Wassergehalt und Temperatur) abhängig.*

*Für die industrielle Futtermittelproduktion mittels Schwarzer Soldatenfliege müssen hohe Zuwachsraten in kurzer Zeit realisiert werden. Die nutzeneffiziente Larvenzucht und -mast hängt dabei neben dem Substrat auch von den äußeren Einflussfaktoren ab. Diese gilt es daher ebenso optimal einzustellen.*

### 1 Einleitung

Die stetig steigende Weltbevölkerung, die voranschreitende Urbanisierung und insgesamt steigender Wohlstand führen u.a. zu einer zunehmenden Nachfrage nach tierischen Produkten bzw. Lebensmitteln.

Um diese Nachfrage zu decken, müssen Nutztiere effizient gefüttert werden. Hierbei setzt die Futtermittelindustrie auf qualitativ hochwertige Futtermittel, die einen hohen Proteinanteil aufweisen.

Aktuell werden in Deutschland rund 70 % dieser proteinreichen Futtermittel bzw. der notwendigen Futtermittelkomponenten importiert (1). Aus ökologischer, sozialer und ökonomischer Sicht ist diese Tatsache eher kritisch zu hinterfragen.

Auf der anderen Seite ist – vorzugsweise in Industrieländern – die Lebensmittelverschwendung ein deutlich wahrnehmbares Problem. Rund ein Drittel aller produzierten Lebensmittel werden nach aktuellem Kenntnisstand ungenutzt entsorgt (2). Dieser verschwenderische Umgang mit kostbaren Lebensmitteln steht im Konflikt zu großen Anteilen an hungernden Menschen weltweit.

Auf Basis der Tatsache, dass organische Abfälle eine natürliche Nahrungsquelle für Insekten darstellen und Insekten proteinreich sowie ernährungsphysiologisch wertvoll sind, entstand die Idee, Insekten gezielt zur Futterproteinengewinnung zu züchten. Ein mögliches Insekt ist in diesem Kontext die Larve der Schwarzen Soldatenfliege (*Hermetia Illucens*). Das Nahrungsspektrum dieser Larve ist dabei sehr breit aufgestellt und umfasst u.a. typische Lebensmittelabfälle. Aufgrund rechtlicher Bestimmungen kommt in industriellen Larven-Zuchtanlagen bislang überwiegend eine Hühnerfuttermischung zur Fütterung der Insekten zum Einsatz. Nachhaltig und nutzeneffizient wäre die Umstellung der Insektenfütterung auf organische Lebensmittelabfälle und Abfallprodukte der Nahrungsmittelproduktion.

## **2 Zielsetzung**

Anhand von Fütterungsversuchen sollte analysiert werden, welche Art von organischen Abfällen sich am besten zur Mast der Larven der Schwarzen Soldatenfliege eignet. Hierzu wurde vorab die qualitative und quantitative Lebensmittelabfallsituation in Deutschland beleuchtet und das resultierende Nahrungspotenzial zur Zucht von Soldatenfliegen-Larven charakterisiert. Entscheidende Faktoren des Larvenwachstums sind in diesem Zusammenhang die Feuchte, die Größe und Struktur sowie die Konsistenz der Lebensmittelabfälle bzw. Substrate.

## **3 Methodik der Untersuchungen**

Für die Untersuchungen wurden Obst- und Gemüsereste, Brotabfälle sowie Rübenschnitzel als Grundsubstrate der Larvenfütterung ausgewählt. Insgesamt wurden aus den genannten Grundsubstraten 7 verschiedene Futtersubstrate unterschiedlicher Zusammensetzung und Konsistenz hergestellt. Hierzu wurden die Lebensmittelabfälle bzw. Grundsubstrate zum Teil mechanisch vorzerkleinert. Der Startwassergehalt der einzelnen Substrate betrug zwischen 70 und 87 Gew.-%. In insgesamt 9 Mastkisten wurde die Versuchsdurchführung parallel vollzogen – davon 7 Futtersubstrate und 2 Kontrollgruppen. Jeweils 8 Kilogramm eines Futtersubstrates wurden in eine Mastkiste gefüllt und mit 12.000 Larven versetzt. Anschließend wurden die Mastkisten in einen klimatisierten Raum überführt, in dem sich die Larven über die Mastperiode (12 Tage) hinweg befanden. In regelmäßigen Abständen wurde der Mastzustand der Soldatenfliegen-Larven optisch bewertet sowie die Feuchtigkeit und die Temperatur des Futtersubstrates gemessen. Abschließend verdeutlicht Abbildung 1 den industriellen Prozessablauf der Larvenmast.



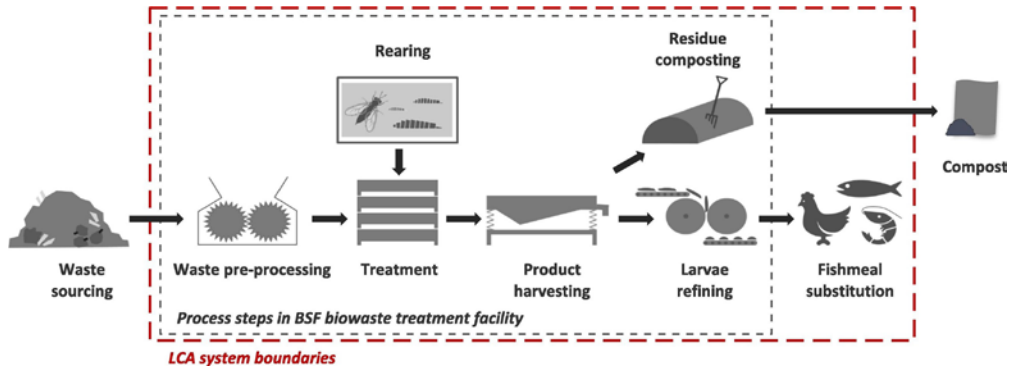


Abbildung 1: Schematischer Prozessablauf der Larvenmast in industriellen Anlagen (3)

## 4 Ergebnisse

Die Soldatenfliegen-Larven wurden während des gesamten Versuchszeitraums beobachtet. Bereits zu Untersuchungsbeginn zeigte sich, inwiefern die Larven ein Substrat annehmen oder verweigern. In geeigneten Substraten starten die Larven unmittelbar mit der Substratumsetzung. Dieser Prozess konnte besonders gut bei Obst- und Gemüseresten beobachtet werden. Hingegen war die Akzeptanz von Brotresten als Nahrungsgrundlage deutlich reduziert. Ursächlich hierfür kann auch der erhöhte Wassergehalt dieser Systeme gewesen sein. Die Feuchtigkeit bzw. der Wassergehalt dient indirekt als Indikator für den Grad der Substratumsetzung und somit auch für das Wachstumsverhalten der Larven. Zudem beeinflusst der Wassergehalt die Lebensbedingungen und die Aktivität der Larven maßgeblich.

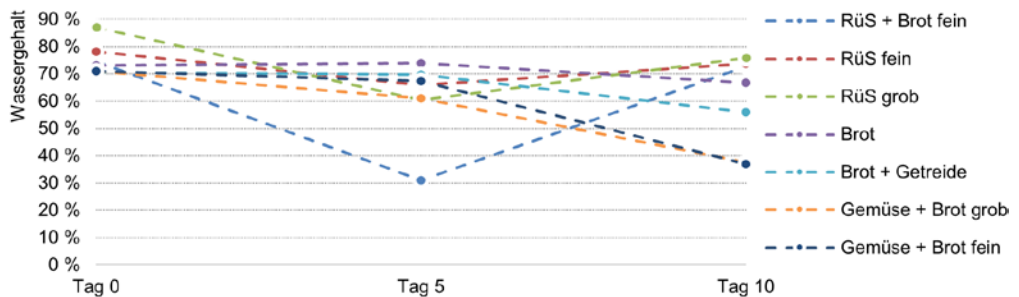


Abbildung 2: Wassergehalt in Gew.-% der Futtersubstrate in den Versuchsreihen

Abbildung 2 zeigt die jeweils gemessenen Wassergehalte zu Versuchsbeginn, an Versuchstag 5 und an Versuchstag 10. Der Wassergehalt der Futtersubstrate zu Versuchsbeginn (Tag 0) lag in den meisten Fällen im angestrebten Bereich zwischen 70 und 80 Gew.-%. Nur grobe Rübenschnitzel (Rüs) lagen mit rund 87 Gew.-% darüber. Innerhalb der ersten 5 Tage kam es im Allgemeinen zu einem geringen Abfall der Wassergehalte. In der Zeit von Versuchstag 5 bis 10 nahmen die Wassergehalte hingegen deutlich stärker

ab. Anhand der an Versuchstag 10 gemessenen Wassergehalte in Höhe von ca. 37 Gew.-% lässt sich die gute Umsetzung der Gemüse-Brot-Mischungen (grob und fein) erkennen.

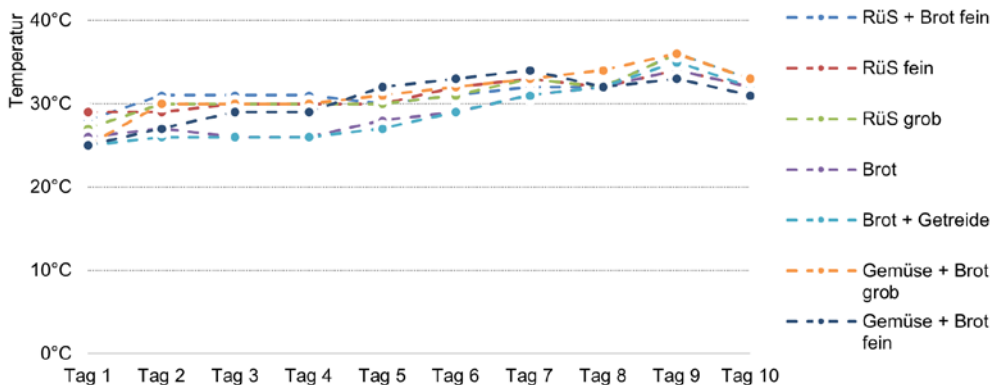


Abbildung 3: Temperaturen in °C der Futtersubstrate in den Versuchsreihen

Wie gezeigt, wird bei guter Substratumsetzung Wasser verbraucht. Gleichmaßen entsteht bei der Umsetzung der Substrate durch die Soldatenfliegen-Larve Wärme. Folglich ist eine steigende Temperatur innerhalb der Systeme ein Indikator für eine gute Futteraufnahme bzw. -umsetzung. Zudem kann die Temperatur Aufschlüsse über den Mastzustand und den optimalen Endpunkt der Larvenmast liefern. Kurz vor Ende der Mastperiode kommt es in diesem Zusammenhang zu einem starken Temperaturanstieg, der von einem anschließenden schwachen Temperaturabfall gefolgt wird. Diese Entwicklungsphase der Larve wird als sogenannte Hitzephase bezeichnet. Sie zeigt an, dass das Larvenstadium kurz vorm Ende steht und die Ernte der Larven – aus qualitativen Gründen – vollzogen werden muss. Aus Abbildung 3 wird indirekt anhand der Temperaturentwicklung die Geschwindigkeit der Substratumsetzung ersichtlich. Auffällig ist hierbei, dass die mit Brotresten versehenen Substratmischungen mehrere Tage benötigten, um einen Temperaturanstieg zu verzeichnen. Die Substratumsetzung kann dementsprechend als gering eingestuft werden. Für Substrate mit Gemüseresten zeigt sich hingegen bereits innerhalb der ersten zwei Tage ein signifikanter Anstieg der Temperaturen. Die Substratumsetzung kann in diesem Fall als hoch eingestuft werden. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Beobachtung, dass bei groben Resten bzw. Substraten ein vergleichsweise starker Temperaturanstieg innerhalb der ersten Tage erfolgt. Anschließend stagnieren diese Systeme bzw. groben Substrate auf dem jeweils erreichten Temperaturniveau. Feine Reste bzw. Substrate beschreiben hingegen einen etwas geringeren aber dafür stetigen und konstanten Temperaturanstieg.

## 5 Schlussbetrachtung

Die durchgeführten Versuchsreihen konnten das Potenzial der Larven der Schwarzen Soldatenfliege hinsichtlich der Verwendung von Lebensmittelabfällen charakterisieren. Dabei erwies sich ein Substrat aus Obst- und Gemüseabfällen als gut geeignet, um ein schnelles Wachstum der Soldatenfliegen-Larven herbeizuführen. Hingegen nahmen die mit Rübenschnitzeln und/oder Brotresten gefütterten Soldatenfliegen-Larven nur vergleichsweise gering an Gewicht zu. Das Larvenwachstum ist entsprechend gering und

verlangsamt. Insgesamt kam es bei keinem der untersuchten Substrate zu latenten Erscheinungen. Dementsprechend besitzen die Larven der Schwarzen Soldatenfliege ein breites Spektrum an möglichen und umsetzbaren Futtersubstraten. Je nach Substrateigenschaften sind jedoch deutliche Unterschiede in den Wachstumsraten der Larven zu verzeichnen. Im industriellen Produktionsprozess müssen aus wirtschaftlichen Gründen schnelle und hohe Zuwachsraten realisiert werden. Neben dem hierfür geeigneten Futtersubstrat müssen auch äußere Randbedingungen optimal gewählt werden. Hierbei haben sich der Wassergehalt und die Temperatur als maßgebliche Faktoren erwiesen. Diese beeinflussen den Umsetzungsprozess signifikant. Ebenso können über die Messung dieser Kenngrößen Rückschlüsse auf den optimalen Mastablauf sowie das potenzielle Mastende gezogen werden.

Folgeuntersuchungen sollten die im Rahmen des Projektes erarbeiteten allgemeinen Zusammenhänge verifizieren und weiterführend vertiefen.

## Literatur/Quellen

- (1) Fearnside (2000). Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Climatic change*, 46(1), 115-158.
- (2) Schmidt et al. (2019). Wege zur Reduzierung von Lebensmittelabfällen-Pathways to reduce food waste (REFOWAS): Maßnahmen, Bewertungsrahmen und Analysewerkzeuge sowie zukunftsfähige Ansätze für einen nachhaltigen Umgang mit Lebensmitteln unter Einbindung sozio-ökologischer Innovationen. Volume 1 (No. 73, 1). Thünen Report.
- (3) Mertenat et al. (2019): Black soldier fly biowaste treatment-assessment of global warming potenzial. *Waste management*, 84,175.

## Kontakt

*B.Sc. Franziska Wendel, Dr. Frances Eck, Dr. Jörg Nispel, Prof. Dr. Stefan Gäth*

Justus-Liebig-Universität Gießen

Professur für Abfall- und Ressourcenmanagement

Heinrich-Buff-Ring 26-32

35392 Gießen

E-Mail: [franziska.wendel@nu.uni-giessen.de](mailto:franziska.wendel@nu.uni-giessen.de)

Homepage: [einfälle-für-abfälle.de](http://einfälle-für-abfälle.de)



## Einsatz von Fällmittel ( $\text{FeCl}_3$ ) zur Steigerung der Entwässerbarkeit von Faulschlamm

**Abstract:** *Mit dem Hintergrund steigender Entsorgungskosten trägt die Entwässerung des Faulschlammes auf kommunalen Kläranlagen wesentlich zur Gesamtwirtschaftlichkeit einer Kläranlage bei. Deshalb ist es wichtig, mögliche Einflüsse zu verstehen, um die Entwässerung zu verbessern und somit die zu entsorgenden Schlammengen reduzieren zu können. Es gibt Hinweise, dass die ortho-Phosphatkonzentration im Faulschlamm die Entwässerbarkeit des Faulschlammes beeinflusst. Diese ist vor allem bei Anlagen mit funktionierender Bio-P (Biologischer Phosphorelimination) stark erhöht, da es durch die anaeroben Bedingungen im Faulturm zur Rücklösung von ortho-Phosphat kommt. Wird dieses ortho-Phosphat nicht wieder entfernt, könnte sich die Wasserbindefähigkeit von Phosphat negativ auf die anschließende Entwässerung auswirken. Während dieser Studie wurde der Einsatz eines eisenbasierten Fällmittels auf den anaeroben Prozess sowie auf die Entwässerung im Labormaßstab getestet. Die Experimente zeigten, dass durch den Einsatz von  $\text{FeCl}_3$  im Faulturm der anaerobe Prozess in keiner Weise gestört wird. Des Weiteren konnte ein positiver Effekt auf die Entwässerbarkeit des Faulschlammes sowie eine Reduktion des notwendigen Polymerbedarfs beobachtet werden. In weiteren Untersuchungen soll der Einsatz von Fällmittel in großtechnischen Bio-P Anlagen getestet werden, um die Verbesserung der Entwässerbarkeit quantifizieren und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchführen zu können.*

### 1 Einleitung

Die Entwässerung bzw. das Entwässerungsergebnis hängen von vielen verschiedenen Faktoren ab. Wichtig ist vorweg festzuhalten, dass die Eigenschaften des Faulschlammes selbst die maximal mögliche Entwässerung im Zuge der mechanischen Entwässerung begrenzen. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass bei der mechanischen Entwässerung nur der Anteil des freien Wassers in der Schlammsuspension abgetrennt werden kann (Kopp, 2001; Novak et al., 2006). Das freie Wasser ist jener Wasseranteil, der physikalisch nicht an den Schlamm gebunden ist und im Zuge der mechanischen Entwässerung abgetrennt werden kann. Im Gegensatz dazu kann das gebundene Wasser nur über thermische Verfahren (Trocknung) mit hohem Energieaufwand abgetrennt werden (Kopp, 2001).

Es ist ein komplexes Zusammenspiel von verschiedenen Einflüssen, welche schlussendlich die Entwässerbarkeit des Faulschlammes beeinflussen. Hier sollen die wesentlichen erläutert werden:

## **1.1 Zusammensetzung des Abwassers**

Mineralischer Anteil: Ein erhöhter Anteil an feinmineralischen Stoffen erhöht die Abgabe des freien Wassers im Zuge der mechanischen Entwässerung (Chen et al., 2006).

Verhältnis zwischen monovalenten und divalenten Kationen: Mit zunehmendem Anteil an monovalenten Kationen (z.B. Natrium) verschlechtert sich die Flockenstabilität der Belebtschlammflocke und in weiterer Folge die Entwässerung (Higgins et al., 1997; Novak et al., 2006).

## **1.2 Prozesse während der Abwasserreinigung**

Verhältnis zwischen Primär- und Überschussschlamm: Die Entwässerungseigenschaften des Faulschlammes sinken signifikant mit zunehmendem Anteil an Überschussschlamm (Svennevik et al., 2019).

## **1.3 Flockenstruktur**

Kompakte, größere und gut sedimentierbare Flocken führen in der Regel auch zu gut entwässerbaren Faulschlämmen (Chen et al., 2002).

## **1.4 Prozesse während der Vergärung**

Phosphatkonzentration im Faulschlamm: Bei Anlagen mit funktionierender biologischer Phosphor-Elimination nutzt man die Fähigkeit Phosphat-akkumulierender Mikroorganismen (PAOs) Phosphat ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) intrazellulär anzureichern und somit aus der wässrigen Phase zu entfernen. Das anaerobe Milieu im Faulturm führt allerdings anschließend zu verstärkter Rücklösung von ortho-Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Wird das rückgelöste ortho-Phosphat nicht wieder aus dem Faulschlamm entfernt (durch MAP-Bildung oder Zugabe von Fällmitteln), so werden die Entwässerungseigenschaften negativ beeinflusst (Alm et al., 2016; Bien et al., 2017).

Im Zuge dieser Studie wird der Einfluss der ortho-Phosphatkonzentration auf die Entwässerung des Faulschlammes untersucht. Dabei wird durch Einsatz von Fällmittel der ortho-Phosphatgehalt im Faulschlamm und somit der Anteil des an Phosphat gebundenen Wassers reduziert. Dadurch soll die Effizienz der Entwässerung verbessert werden können, um die anfallenden, zu entsorgenden Schlammengen zu reduzieren.

# **2 Methodik**

## **2.1 Kontinuierliche Laborreaktoren**

Für die Studie wurden 4 Bioreaktoren mit 1,6 L Arbeitsvolumen kontinuierlich über eine Dauer von 3 hydraulischen Aufenthaltszeiten betrieben. Dafür wurden Schlämme der Kläranlage Bozen verwendet, da diese durch biologische P-Elimination eine hohe ortho-Phosphatkonzentration im Faulschlamm aufweisen. Für den Betrieb der Laborreaktoren wurden dieselben Betriebsparameter (Temperatur, Aufenthaltszeit, organische Belastung) wie in der Kläranlage Bozen verwendet. In zwei Reaktoren wurde während der

zweiten und dritten Aufenthaltszeit die Phosphatfällung durch regelmäßige Zugabe von  $\text{FeCl}_3$  durchgeführt. Um eine mögliche Auswirkung des Fällmittels auf die Vergärung zu bestimmen, wurden während des Prozesses in regelmäßigen Abständen wichtige Schlammparameter wie der Trockenrückstand sowie organische Trockenrückstand, pH, Leitfähigkeit, Chemische Sauerstoffbedarf, Gehalt an gelöstem ortho-Phosphat, Gesamtposphatgehalt und Fos-Tac gemessen. Zusätzlich wurden die Biogasproduktion sowie Methankonzentration bestimmt.

## 2.2 Entwässerungsversuche

Um die Aussagekraft der Ergebnisse zu stützen, wurden zwei zuvor etablierte Labormethoden zur Bewertung der Entwässerbarkeit verwendet. Dadurch konnten die Ergebnisse verifiziert sowie die Methoden validiert werden. Mittels Laborzentrifuge wurde wöchentlich der Trockenrückstand des zentrifugierten Faulschlammes ermittelt. Zusätzlich wurde am Ende des Experiments mittels einer Laborpresse (Mareco MMP Minipress, Afmitech, Netherlands) die Entwässerbarkeit bestimmt. Für die Bewertung mittels Laborpresse wurden folgende Analysen durchgeführt:

- Maximale Entwässerbarkeit: Trockenrückstand (%) des Filterkuchens
- Komprimierbarkeit: Höhe des entstandenen Filterkuchens (mm)
- Rückbelastung des Prozesswassers: Trübung des Filtrats (NTU)
- Materialverlust: Der Verlust an Trockenmasse (g), der während dem Pressvorgang verloren ging.

## 3 Ergebnisse

Im Zuge dieser Studie wurde die Anwendbarkeit von Fällmitteln im Faulturm sowie die Auswirkung auf die Entwässerbarkeit getestet. Die Ergebnisse zeigten keinen negativen Einfluss auf die anaerobe Vergärung durch den Einsatz von Fällmittel. Anhand neu etablierter Labormethoden konnte festgestellt werden, dass durch Zugabe von Fällmittel der Gehalt an ortho-Phosphat und damit einhergehend die Wasserbindekazapazität reduziert sowie die maximale Entwässerbarkeit gesteigert werden kann. Damit sinkt die anfallende Faulschlammmenge sowie die Kosten, welche durch den Transport des entwässerten Faulschlammes entstehen. Sowohl mit einer Laborzentrifuge (Abb. 1a) als auch mittels Laborpresse (Abb. 1b) konnte eine Steigerung der Entwässerbarkeit festgestellt werden. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass durch den Einsatz von Fällmittel der notwendige Polymerverbrauch sinkt. Direkte Rückschlüsse der im Labor erreichten maximalen Entwässerbarkeit auf großtechnische Entwässerungswerte können bisher nicht getroffen werden. Für eine quantitative Analyse sind weiterführende großtechnische Analysen in Planung. Daraufhin soll eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden, um die zusätzlichen Kosten durch erhöhten Fällmittelverbrauch den Einsparungen durch reduzierten Polymerverbrauch sowie Transportkosten gegenüberzustellen.

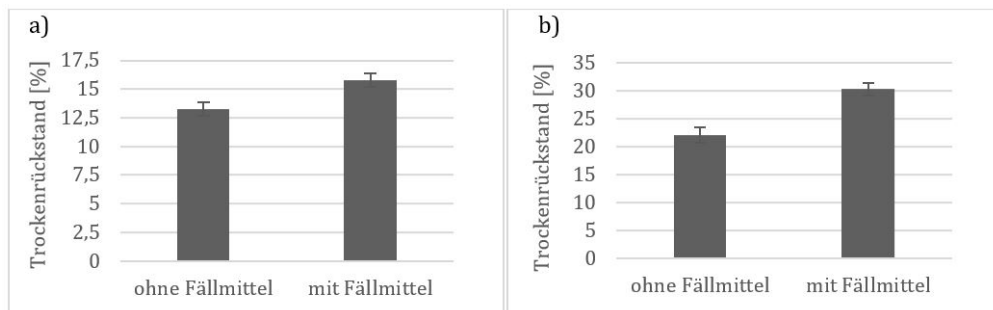


Abbildung 1: Trockenrückstand des zentrifugierten Faulschlammes (a) sowie des Filterkuchens nach Pressung mittels Laborpresse (b)

## Literatur/Quellen

- Alm, Rebecca, et al. "Investigations into improving dewaterability at a Bio – P/anaerobic digestion plant." *Water Environment Research* 88.11 (2016): 2082-2093.
- Bierl, B. "The effect of PIX 123 and polyelectrolyte Zetag 8160 on the conditioning and dewatering of sewage sludge." *Inżynieria i ochrona środowiska* 20 (2017).
- Chen, G.H., Yue, P.L., Mujumdar, A.S. 2002. Sludge dewatering and drying. *Drying Technology*, 20(4-5), 883-916.
- Higgins, Matthew J., and John T. Novak. "The effect of cations on the settling and dewatering of activated sludges: laboratory results." *Water environment research* 69.2 (1997): 215-224.
- Kopp, J. B. (2001): Wasseranteile in Klärschlammuspensionen - Messmethode und Praxisrelevanz, Dissertation, TU Braunschweig, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Heft 66, Braunschweig
- Novak, J.T., Love, N.G., Smith, M.L., Wheeler, E.R., 1998. The effect of cationic salt addition on the settling and dewatering properties of an industrial activated sludge. *Water Environment Research* 70 (5), 984e996.
- Svennevik, O.K., Beck, G., Rus, E., Westereng, B., Higgins, M., Solheim, O.E., Nilsen, P.J., Horn, S.J. 2019. CNash - A novel parameter predicting cake solids of dewatered digestates. *Water Research*, 158, 350-358.

## Kontakt

Jacqueline Winkler, M.Sc. (wissenschaftliche Mitarbeiterin)  
 Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Umwelttechnik  
 Tel.-Nr. +43 512 507 62136  
 E-Mail: [jacqueline.winkler@uibk.ac.at](mailto:jacqueline.winkler@uibk.ac.at)  
 Homepage: [www.uibk.ac.at/umwelttechnik/](http://www.uibk.ac.at/umwelttechnik/)



## **Einfluss einer In-Situ-Methanisierung von $H_2$ auf die mikrobielle Beschaffenheit und $CH_4$ -Bildung in einer Flachbett-Methanstufe**

**Abstract:** *Power-to-Gas- (PtG) Konzepte erlangen weltweit zunehmende Bedeutung als ein wesentlicher Bestandteil der Energiewende. Im Rahmen des Projekts Power2MultiStage wurde ein zweistufiger Biogasreaktor mit einer In-Situ-Methanisierung von  $H_2$  realisiert, dessen Einspeisung über eine Fuzzy-Logic geregelt wurde. Über eine Versuchslaufzeit von 610 Tagen konnten Methan- ( $CH_4$ ) Konzentrationen von bis zu 87 % erreicht werden. Eine begleitende molekularebiologische 16S rRNA-Sequenzierung soll zudem Aufschluss über die Beschaffenheit und eine Adaption des Mikrobioms geben.*

### **1 Einleitung**

Die zunehmende Knappheit fossiler Energieträger und die Anforderungen an die Minimierung schädlicher Einflüsse der Energiewirtschaft auf die Umwelt stellen die Erzeugung, Verfügbarkeit und Flexibilisierung erneuerbarer Energien vor besondere Herausforderungen. Einhergehend mit einem steigenden politischen, wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Interesse an einem Wandel der deutschen Energieproduktion bietet eben jene Gemengelage zukünftig die Möglichkeit die steigende Nachfrage nach Energieträgern durch erneuerbare und speicherbare Energieformen zu decken. Hierbei gerät Wasserstoff ( $H_2$ ) zunehmend in den Fokus wissenschaftlicher Erkenntnisfindung und bildet einen Grundbaustein vieler Power-to-Gas-Konzepte.

Das Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft (IAK) der TU Dresden befasst sich seit Januar 2020 im Rahmen des Projekts P2M mit einer In-Situ-Co-Methanisierung von  $H_2$  in einer an eine zweistufige Vergärung angeschlossenen Flachbett-Methanstufe. Das Projekt verfolgt das Ziel, auf diesem Weg die  $CH_4$ -Bildung eines Biogasprozesses zu steigern und so letztlich zur Flexibilisierung der Energiebereitstellung und -nutzung aus erneuerbaren Energien beizutragen.

Mit der breiteren Verfügbarkeit molekularbiologischer Hochdurchsatzwerkzeuge wie der 16S rRNA-Sequenzierung ist die Charakterisierung des Mikrobioms vermehrt in den Fokus gerückt und bietet große Chancen für die Erforschung von Biogasprozessen. Auf Basis des taxonomischen Profils können ablaufende Prozesse besser nachvollzogen, von ebenso entscheidender Bedeutung jedoch, Prozesse unter Anwendung ausgewählter Selektionsdrücke bedarfsorientiert gesteuert werden. Im Rahmen des Projekts P2M dient die Bestimmung der Validierung eines Wechsels des Mikrobioms in Folge der zusätzlichen  $H_2$ -Einspeisung. Zu erwarten ist hier eine weitreichende Kultivierung hydrogenotropher Archaeen wie jene der Gattungen *Methanobacterium*, *Methanospirillum* und *Methanothermobacter* (Wahid und Horn 2021; Tejerizo et al. 2017; Zhou et al. 2014).

Die In-Situ-Methanisierung von  $H_2$  gliedert sich in ein Gesamtkonzept der erneuerbaren Energieerzeugung ein, wobei sie die temporäre und saisonale Speicherefähigkeit von Überschussstrom aus der Windenergie und Photovoltaik ermöglicht (Golling et al. 2017).

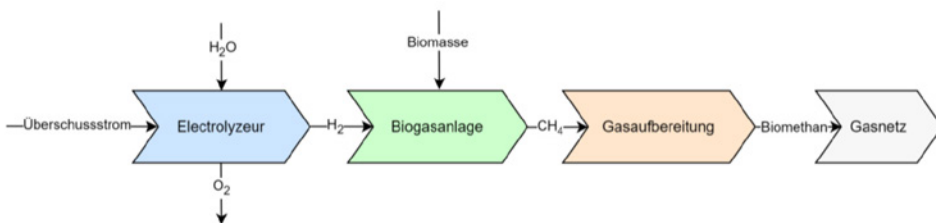


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines P2G-Konzepts über eine

Abbildung 1 verdeutlicht das Grundprinzip eines P2G-Konzepts mit einer In-Situ-Methanisierung von  $H_2$ . Dieses wird elektrolytisch durch die Aufspaltung von Wasser in Sauerstoff ( $O_2$ ) und grünen  $H_2$  produziert. Der dafür eingesetzte Strom stammt aus der erneuerbaren Energieerzeugung (Rusmanis et al. 2019). Eine anschließende Einspeisung des hergestellten  $H_2$  in einen Biogasprozess ermöglicht eine zusätzliche  $CO_2$ -Reduktion zu  $CH_4$  gemäß nachfolgender Reaktionsgleichung (1) (Thema et al. 2019).



Herkömmliche Biogasprozesse weisen Gaszusammensetzungen von ca. 40-50 %  $CO_2$ , 50-60 %  $CH_4$  und in geringen Konzentrationen  $H_2$ , Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) und Sauerstoff  $O_2$  auf (Mokrane et al. 2018). Voelklein et al. (2019) konnten 85 %, Deschamps et al. (2021) 97,9 %  $CH_4$  im Biogas in Folge einer In-Situ-Methanisierung von  $H_2$  erreichen.

## 2 Methoden

Im Rahmen des Projektes wurde ein mesophiler ( $\sim 35^\circ C$ ) Demonstrator realisiert, welcher sich in die Prozessstufen Hydrolyse und Methanisierung aufgliedert. Bedarfsorientiert wird in einem Trial & Error-Ansatz  $H_2$  in den Methanisierungsreaktor eingeblasen, wobei eine mäanderförmige Innenstruktur die Verweil- und Kontaktzeit des  $H_2$  mit den methanbildenden Archaeen erhöht. In engen Paketen angeordnete Aufwuchskörper bilden einen zusätzlichen Rückhalt des eingebrachten Hydrolysats und  $H_2$ . Als Inputsubstrat dient ein synthetisches Medium mit einer Raumbelastung von  $0,95 \text{ g CSB}^*(l_R \cdot d)^{-1}$ .

Mittels einer eigens für diese Demonstratoranlage programmierten *Fuzzy-Logic* (AWITE Bioenergie GmbH) wird  $H_2$  auf Basis der im Kopfraum gemessenen  $CO_2$ - und  $H_2$ -Konzentration entlang eines Sollwertes eingeblasen. Die Versuche werden durch eine online Gasanalytik, physikochemische Laboruntersuchungen sowie eine 16S rRNA-Sequenzierung des Mikrobioms umfassend begleitet.

## 2.1 Implementierung einer Fuzzy-Logic

Die *Fuzzy-Logic* ist eine Softwaretheorie auf Basis von graduellen Wahrheiten die, ergänzend zu der weit verbreiteten Booleschen Logik mit wahr und falsch (1; 0), die natürliche Sprache für Computer verständlich machen soll. Da sich Sachverhalte nicht immer in einem binären System aus 0 und 1 als absolute Zustände beschreiben lassen, erlaubt die *Fuzzy-Logic* eine Unschärfe (*fuzziness*) eines sprachlichen Ausdrucks oder eines Zustandes mathematisch zu modellieren (Bothe 1995).

Die *Fuzzy-Logic* wurde nach einer Betriebszeit von 430 Tagen in Betrieb genommen, nachdem eine Stabilisierung des Vergärungsprozesses, insbesondere der Biogasbildung, erkennbar wurde. Bis dato erfolgte eine  $H_2$ -Einspeisung von durchschnittlich  $0,23 \text{ l } H_2^*(l_R*d)^{-1}$ . In graduellen Schritten wurde die  $H_2$ -Kopfraumkonzentration anschließend auf die Sollwerte 1; 1,5; 2 und 2,5 % eingestellt. Analog dazu wurden Systemgrenzen für den  $CO_2$ -Gehalt der Gasphase festgelegt. Diese erlauben der *Fuzzy-Logic* eine Sollwertanpassung der  $H_2$ -Einspeisung nach den Kriterien  $CO_2$  ist „niedrig“, „medium“ und „hoch“. Entsprechend der gemessenen Zustandsgröße folgte daraufhin eine niedrige, mittlere oder hohe  $H_2$ -Antwort der *Fuzzy-Logic*.

## 3 Ergebnisse

Der Versuchszeitraum wurde gemäß der  $H_2$ -Sollwerteinstellung in fünf Abschnitte mit gradueller Erhöhung unterteilt. Von einem durchschnittlichen  $CH_4$ -Gehalt von 61 % während der stabilen Prozessphase konnte diese mit Hilfe der *Fuzzy Logic* auf durchschnittlich 83,0 % ( $H_2$ -Sollwert 2,5 %,  $0,63 \text{ l } H_2^*(l_R*d)^{-1}$ ) mit Peaks von 87,1 %  $CH_4$  gesteigert werden.

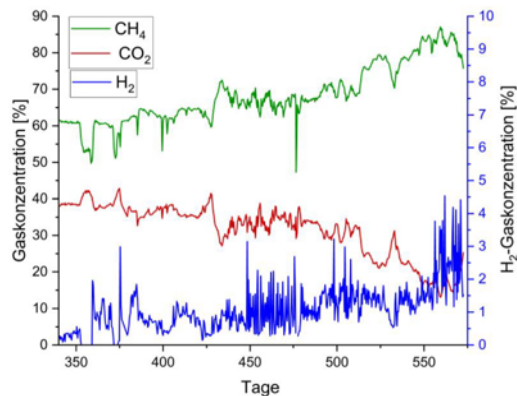


Abbildung 2: Entwicklung der  $CH_4$ -,  $CO_2$ - und  $H_2$ -Konzentration im Biogas

Das System steigerte sich auf CSB-Abbauraten von 98,6 % und wies zum Zeitpunkt der höchsten  $H_2$ -Einspeisung eine Konzentration organischer Säuren von 0,031 g/l auf. Das Maximum der spezifischen  $CH_4$ -Produktion wurde am Tag 604 mit  $0,51 \text{ l } CH_4/g \text{ CSB}$  erreicht. Abbildung 2 zeigt einen plötzlichen Abfall des  $CH_4$ -Gehalts zum Ende der Versuchslaufzeit, der auf eine stark variierende  $H_2$ -Einspeisung zurückzuführen ist. Eine Messung der Gaszusammensetzung erfolgte in einem 8 Stunden Takt bei ausreichendem Gas-

volumen, was dazu führte, dass das System abhängig von eben jener Gaszusammensetzung  $H_2$  einspeiste. Aufgrund der hohen Abstände zwischen den Messungen kam es daraufhin zu starken Über- oder Unterschreitungen des Sollwertes.

Ausstehend sind bis dato noch die Ergebnisse der molekularbiologischen Untersuchungen, sie werden Aufschluss darüber geben, welche Akteure sich in Folge der Selektionsdrücke durchsetzen konnten und maßgeblich an der gesteigerten  $CH_4$ -Produktion beteiligt waren.

## Literatur/Quellen

- Bothe, Hans-Heinrich (1995): Fuzzy Logic. Einführung in Theorie und Anwendungen. Zweite, erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).
- Deschamps, Laure; Imatoukene, Nabila; Lemaire, Julien; Mounkaila, Mahamadou; Filali, Rayen; Lopez, Michel; Theoleyre, Marc-André (2021): In-situ biogas upgrading by bio-methanation with an innovative membrane bioreactor combining sludge filtration and  $H_2$  injection. In: *Bioresource technology* 337, S. 125444. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125444.
- Golling, C.; Heuke, R.; Seidl, H.; Uhlig, J. (2017): Baustein einer integrierten Energiewende - Roadmap Power to Gas. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin. Online verfügbar unter [chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclclefindmkaj/https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9215\\_Broschuere\\_Baustein\\_einer\\_Integrierten\\_Energiewende\\_Roadmap\\_Power\\_to\\_Gas.pdf](chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclclefindmkaj/https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9215_Broschuere_Baustein_einer_Integrierten_Energiewende_Roadmap_Power_to_Gas.pdf), zuletzt geprüft am 06.09.2022.
- Mokrane, C.; Aduane, B.; Benzaoui, A. (2018): Composition and Stoichiometry Effects of Biogas as Fuel in Spark Ignition Engine. In: *INT. J. AUTOMOT. MECH. ENG.* 15 (1), S. 5036–5052. DOI: 10.15282/ijame.15.1.2018.11.0390.
- Rusmanis, Davis; O'Shea, Richard; Wall, David M.; Murphy, Jerry D. (2019): Biological hydrogen methanation systems - an overview of design and efficiency. In: *Bioengineered* 10 (1), S. 604–634. DOI: 10.1080/21655979.2019.1684607.
- Tejerizo, Gonzalo Torres; Kim, Yong Sung; Maus, Irena; Wibberg, Daniel; Winkler, Anika; Off, Sandra et al. (2017): Genome sequence of *Methanobacterium congolense* strain Buetzberg, a hydrogenotrophic, methanogenic archaeon, isolated from a mesophilic industrial-scale biogas plant utilizing bio-waste. In: *Journal of biotechnology* 247, S. 1–5. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2017.02.015.
- Thema, Martin; Weidlich, Tobias; Hörl, Manuel; Bellack, Annett; Mörs, Friedemann; Hackl, Florian et al. (2019): Biological  $CO_2$ -Methanation: An Approach to Standardization. In: *Energies* 12 (9), S. 1670. DOI: 10.3390/en12091670.
- Voelklein, M. A.; Rusmanis, Davis; Murphy, J. D. (2019): Biological methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upgrading in anaerobic digestion. In: *Applied Energy* 235, S. 1061–1071. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.11.006.
- Wahid, Radziah; Horn, Svein Jarle (2021): Impact of operational conditions on methane yield and microbial community composition during biological methanation in in situ and hybrid reactor systems. In: *Biotechnol Biofuels* 14 (1), S. 170. DOI: 10.1186/s13068-021-02019-4.
- Zhou, Liguang; Liu, Xiaoli; Dong, Xiuzhu (2014): *Methanospirillum psychrodurum* sp. nov., isolated from wetland soil. In: *International journal of systematic and evolutionary microbiology* 64 (Pt 2), S. 638–641. DOI: 10.1099/ijs.0.057299-0.

**Kontakt**

*M. Sc., Philipp Witkabel, wissenschaftlicher Mitarbeiter*

Technische Universität Dresden, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Tel.-Nr.: 0351 46344168

E-Mail: [philipp.witkabel@tu-dresden.de](mailto:philipp.witkabel@tu-dresden.de)

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



# Klimaschutzpotenzial durch den vermehrten Einsatz von Recyclingbeton in Hamburg

**Abstract:** Das Klimaschutzpotenzial von Beton durch die anteilige Substitution natürlicher Gesteinskörnung mit rezyklierter Gesteinskörnung aus mineralischen Bauabfällen ist abhängig von der Transportentfernung. Bei kurzen Transportwegen, wie sie in dichter besiedelten Gebieten vorkommen, ist die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung in Beton zu empfehlen. Bei der hier vorgenommenen idealisierten Betrachtung können durch den teilweisen Ersatz von natürlicher Gesteinskörnungen durch rezyklierte Gesteinskörnung bis zu 1,5 kg CO<sub>2</sub>-eq. pro Tonne Gesteinskörnung eingespart werden.

## 1 Einleitung

Beton ist ein sehr weit verbreitetes Baumaterial. Aufgrund seiner vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten, der geringen Materialkosten, der einfachen Handhabung sowie der guten Verarbeitungseigenschaften wird dieser Baustoff in vielen Bauanwendungen weltweit in großen Mengen eingesetzt.

Für die meisten Anwendungen besteht Beton aus Zuschlagstoffen, Zement und Wasser. Die Zuschlagstoffe bestehen meist aus natürlicher Gesteinskörnung, Sand und Kies (Neroth & Vollenschaar, 2011), welche lokal gefördert, ggf. je nach örtlicher Geologie, auch teilweise oder komplett importiert werden. Bei der Verwendung von Recyclingbeton können diese Zuschlagstoffe anteilig durch aufbereitete Gesteinskörnung substituiert werden (DIN 4226-101). Beton, in dem teilweise rezyklierte Gesteinskörnung verwendet wird, wird als Recycling-Beton bezeichnet. Der Ursprung des rezyklierten Materials kann mineralischer Bauschutt aus abgerissenen Bauwerken sein (Neroth & Vollenschaar, 2011).

Diese Arbeit soll aufzeigen, ob die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung als teilweises Substitut natürlicher Gesteinskörnung bei der Produktion von Beton einen geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aufweist als die konventionelle Herstellung mit natürlicher Gesteinskörnung.

## 2 Methodik

Um das Klimaschutzpotential durch die Verwendung von Recyclingbeton für eine Stadt wie Hamburg zu ermitteln, muss zunächst der jährliche Grundbedarf an Gesteinskörnung ermittelt werden, der für die Transportbetonherstellung benötigt wird.

2021 haben in Hamburg insgesamt 13 Betonwerke 926.651 m<sup>3</sup> Transportbeton hergestellt. 2018 wurden 1.019.960 m<sup>3</sup> Transportbeton produziert. (Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2020/22).

Um die Menge der für diese Betonproduktion verwendeten Gesteinskörnung abzuschätzen, wurden folgenden Annahmen getroffen:

- Beton hat ein geringes Schwindmaß (Neroth & Vollenschaar, 2011),
- die durchschnittliche Dichte von Normalbeton beträgt  $2,4 \text{ t/m}^3$ ,
- das durchschnittliche Verhältnis von Gesteinskörnung zu Zement beträgt 4:1. Die unterschiedlichen Dichten zwischen Zement und Gesteinskörnung werden bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

Basierend auf dieser Abschätzung lag der ungefähre Grundbedarf an Gesteinskörnung in Hamburg 2018 bei 1,9 Mio. Tonnen und für 2021 1,8 Mio. Tonnen.

Die meisten Bauwerke werden am Ende ihrer Nutzungsdauer abgerissen. Dabei entstehen mineralische Bauabfälle. 2018 fielen bundesweit 59,8 Millionen Tonnen mineralische Bauabfälle an. Allein in Hamburg waren dies im gleichen Zeitraum 633.792 Tonnen mineralische Bauabfälle, bestehend aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik sowie gemischten mineralischen Bauabfällen (Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein, 2022).

Das größte Recyclingpotenzial ergibt sich, wenn 100 % dieser anfallenden mineralischen Abfälle als Zuschlagstoffe für die Herstellung von Recyclingbeton wiederverwendet werden können und damit natürliche Gesteinskörnungen ersetzen. Dies entspricht dem optimalsten Szenario, bei dem auch die Fraktion kleiner als 2 mm für die Herstellung von Recyclingbeton verwendet wird. Derzeit muss für Beton nach DIN 4226 in Deutschland für Beton die Fraktion 0 – 2 mm aus Natursand bestehen (DIN 4226-101).

Aus der Annahme, dass die anfallenden mineralischen Abfälle vollständig als Ersatz für natürliche Gesteinskörnungen verwendet werden können, folgt, dass etwa 34 % des Hamburger Bedarfs an Gesteinskörnungen für die Herstellung von Transportbeton durch die Substitution von Recyclingmaterial gedeckt werden können.

Dies zeigt auf, dass auch in naher Zukunft die Förderung bzw. der Import von natürlicher Gesteinskörnung erforderlich sein wird.

## **2.1 Vergleich des Status Quo mit der anteiligen Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung**

Um das Klimaschutzpotential für Hamburg durch die anteilige Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung für die Verwendung in Recyclingbeton zu ermitteln, sollen die folgenden zwei Szenarien miteinander verglichen werden. In beiden wird die Bereitstellung von einer Tonne Gesteinskörnung unterschiedlicher Zusammensetzung in einem fiktiven Betonwerk bilanziert (siehe Abbildung 1).

Es wird nur die Bereitstellung der Gesteinskörnung bilanziert, da in diesem Vergleich davon ausgegangen wird, dass die Rezeptur und die Verarbeitung von konventionellen Beton vergleichbar zu Beton mit Recyclinganteil ist.



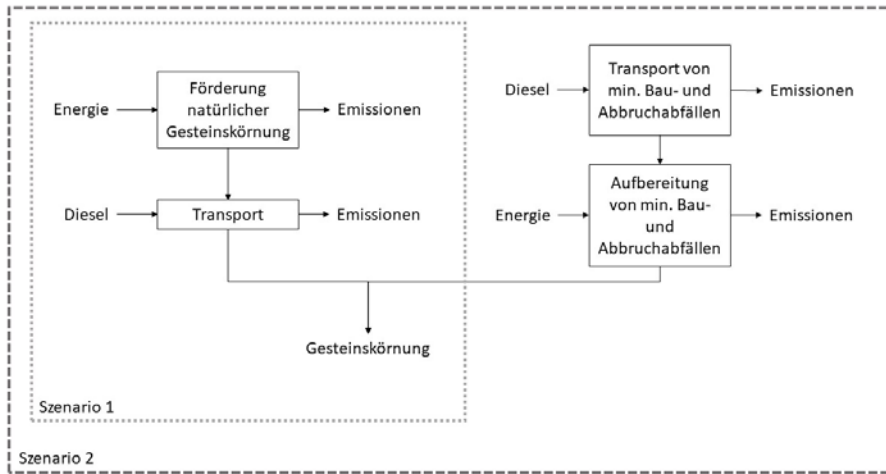


Abbildung 1: Flowcharts der beiden betrachteten Szenarien der Bereitstellung von Gesteinskörnung

#### Szenario 1:

Dieses Ausgangsszenario beschreibt den Status Quo. Bei diesem wird die natürliche Gesteinskörnung in örtlicher Nähe zum Betonwerk gefördert. Bilanziert wird in dieser Betrachtung der Transport der Gesteinskörnung von 40 km sowie die Förderung von Sand und Kies, basierend auf dem Ecoinvent Datensätzen „market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO 6 | Cutoff, U- RER“ und „gravel and sand quarry operation | gravel round | Cutoff, U -CH“

#### Szenario 2:

Beschreibt die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Transports von mineralischen Abfällen zu einer fiktiven, im Durchschnitt 5 km entfernten, ortsnahen Aufbereitungsanlage für mineralische Bauabfälle. In dieser Annahme wird davon ausgegangen, dass das Betonwerk sich auf dem gleichen Gelände befindet. Weiterhin wird angenommen, dass die Aufbereitung unter idealisierten Bedingungen stattfindet. Dies bedeutet, dass der gesamte mineralische Abfall für die Verwendung in Recyclingbeton verwendet werden kann. Diese rezyklierte Fraktion soll 35 % der Gesteinskörnung im produzierten Beton ausmachen. Die restlichen 65 % entsprechen der Förderung und Transport der Gesteinskörnung, wie sie in Szenario 1 beschrieben ist.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Die Modellierung dieser beiden Szenarien mit openLCA in Verbindung mit der Ökobilanzierungsdatenbank ecoinvent 3.8 zeigt, dass das erste Szenario, der Status Quo, 5,6 kg CO<sub>2</sub>-eq. pro Tonne Zuschlagstoffe verursacht. Aus der Bilanzierung von Szenario 2 folgt ein CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von 4,1 kg CO<sub>2</sub>-eq. pro Tonne Gesteinskörnung.

Der Vergleich zwischen den beiden Szenarien zeigt, dass CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch das Recycling von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen möglich sind. Dies ist jedoch nur durch nahe gelegene Aufberei-

tungsanlagen und kurze Transportwege möglich. Außerdem schont die Wiederverwendung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen die natürlichen Sand- und Kiesressourcen, so dass diese länger verfügbar bleiben. Eine 35 prozentige Substitution der natürlichen Gesteinskörnung durch Rezyklat ergibt im direkten Vergleich eine Einsparung von 1,5 kg CO<sub>2</sub>-eq. pro metrische Tonne Gesteinskörnung.

Ein weiterer Punkt ist die geringere Belastung von Deponiekörpern, wodurch diese ebenfalls länger zur Verfügung stehen und weniger Deponievolumen benötigt wird.

Es folgt weiterhin eine Verringerung der Verkehrsdichte durch die verringerte Anzahl von Transportvorgängen. Dies führt auch zu einer Verringerung der Umweltbelastung durch den restlichen Verkehr, da dieser flüssiger verläuft.



Abbildung 2: Gegenüberstellung des CO<sub>2</sub>-Fussabdrucks von Gesteinskörnung mit und ohne Recyclinganteil

## 4 Schlussfolgerungen

Der Klimaschutz durch die Verwendung von Recyclingbeton wird durch den geringeren Transportaufwand erreicht. Für städtische Gebiete wird daher empfohlen, mineralische Bau- und Abbruchabfälle in lokalen Aufbereitungsanlagen zu verarbeiten und die Gesteinskörnung zu recyceln, um so den Transport von natürlicher Gesteinskörnung und auch den Abtransport von mineralischen Abfällen zu reduzieren.

## Danksagung

Die Autoren möchten sich für die finanzielle Unterstützung des Projekts „CIRCuiT – Circular Construction in Regenerative Cities“ durch die Europäische Kommission bedanken. Dieses Projekt wurde durch das Forschungs- und Innovationsprogramm „Horizont 2020“ der Europäischen Union unter der Grant-Vereinbarung Nr. 821201 gefördert.

## Literatur/Quellen

- Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 4226-101:2017-08, Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN\_EN\_12620\_- Teil\_101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen (DIN 4226-101:2017-08). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Neroth, G., & Vollenschaar, D. (2011). Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz (27., vollständig überarbeitete Auflage). SpringerLink Bücher. Vieweg+Teubner. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4>
- Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein. (2020). Statistisches Jahrbuch Hamburg 2019/2020. Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein. [www.statistik-nord.de](http://www.statistik-nord.de)
- Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein. (2022). Erhebung über die Aufbereitung und Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen in Hamburg 2018. Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein. [https://www.statistik-nord.de/fileadmin/Dokumente/Statistische\\_Berichte/verkehr\\_umwelt\\_und\\_energie/Q\\_II\\_4\\_2j\\_H/Q\\_II\\_4\\_2j\\_18\\_HH\\_Korrektur.pdf](https://www.statistik-nord.de/fileadmin/Dokumente/Statistische_Berichte/verkehr_umwelt_und_energie/Q_II_4_2j_H/Q_II_4_2j_18_HH_Korrektur.pdf)
- Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein. (2022). STATISTISCHE BERICHTE - Die Produktion des Verarbeitenden Gewerbes in Hamburg 2021, [https://www.statistik-nord.de/fileadmin/Dokumente/Statistische\\_Berichte/industrie\\_\\_handel\\_und\\_dienstl/E\\_I\\_5\\_j\\_H/E\\_I\\_5\\_j21\\_HH.pdf](https://www.statistik-nord.de/fileadmin/Dokumente/Statistische_Berichte/industrie__handel_und_dienstl/E_I_5_j_H/E_I_5_j21_HH.pdf)

## Kontakt

*Janus zum Brock, wissenschaftlicher Mitarbeiter*

Technische Universität Hamburg / Institute of Circular Resource Engineering and Management (CREM)

Tel.-Nr.: +49(0)40 42878 4063

E-Mail: [janus.zum.brock@tuhh.de](mailto:janus.zum.brock@tuhh.de)

Homepage: [www.tuhh.de](http://www.tuhh.de)

ISBN 978-3-99106-095-6



9 783991 060956