

**DG
AW**

**RESSOURCEN
NEU
DENKEN.**

Deutsche Gesellschaft für
Abfallwirtschaft e.V.

13. WISSENSCHAFTSKONGRESS

Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

am 15. und 16. Februar 2024
an der Technischen Universität Wien

In Zusammenarbeit mit der
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen der
Technischen Universität Wien



innsbruck university press



Deutsche Gesellschaft für
Abfallwirtschaft e.V.

Tagungsband

13. WISSENSCHAFTSKONGRESS

Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

am 15. und 16. März 2024

an der Technischen Universität Wien

In Zusammenarbeit mit



13. WISSENSCHAFTSKONGRESS

Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

Anke Bockreis, Martin Faulstich, Sabine Flamme, Martin Kranert,
Mario Mocker, 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 Mocker (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

www.DGAW.de

© *innsbruck* university press, 2024

Universität Innsbruck

1. Auflage

Alle Rechte vorbehalten.

www.uibk.ac.at/iup

ISBN 978-3-99106-120-5

DOI 10.15203/99106-120-5

Der Kongress wird unterstützt von:

CEC4EUROPE

CIRCULAR ECONOMY COALITION FOR EUROPE

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

 **Stadt
Wien** |  **Abfallwirtschaft,
Straßenreinigung
und Fuhrpark**

 **Vereinigung
öffentlicher
Abfallwirtschaftsbetriebe**

 **VERBAND ÖSTERREICHISCHER
ENTSORGUNGSBETRIEBE**
*Gemeinsam
Ressourcen sichern*

 **IFAT**
Munich

 **VEOLIA**

 **mhkw**
ROTHENSEE

 **Fehr**

 **STADTREINIGUNG.HAMBURG**

 **HiCE**

Beirat

Prof. Dr. habil. Christian Abendroth (BTU Cottbus-Senftenberg)
Prof. Dr. rer. pol. Heinz Georg Baum (HS Fulda)
Prof. Dipl.-Ing. Frank Baur (HTW des Saarlandes)
Prof. Dr.-Ing. Burkhard Berninger (OTH Amberg-Weiden)
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Bernd Bilitewski (Intecus GmbH)
Prof. Dr.-Ing. Carla Cimatoribus (HS Esslingen)
Prof. Dr.-Ing. Joachim Dach (HS Konstanz)
Prof. Dr.-Ing. habil. Christina Dornack (TU Dresden)
Dr.-Ing. Glykeria Duelli (Univ. Stuttgart)
Prof. Dr.-Ing. Silke Eckhardt (HS Bremen)
Hon. Prof. Dr.-Ing. Matthias Franke (Fraunhofer UMSICHT)
Prof. Dr. Henning Friege (TU Dresden, Leuphana Univ. Lüneburg)
Prof. Dr. sc. agr. Stefan Gäth (Univ. Gießen)
Prof. Dr.-Ing. Gilian Gerke (HS Magdeburg-Stendal)
Prof. Dr.-Ing. Christian Gierend (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-Abbichler (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 Umweltkonsulenten 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. Miriam Sartor (TH Köln)
Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek (TU Darmstadt)
Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Scheffold (FH Bingen)
Dr.-Ing. Sebastian Schmuck (Univ. Stuttgart)
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Scholz (TU Clausthal)
Prof. Dr.-Ing. Helmut Seifert (KIT)
Prof. Dr.-Ing. Christian Springer (FH Erfurt)
Prof. Dr.-Ing. Rainer Stegmann (TU Hamburg)
Prof. Dr.-Ing. Iris Steinberg (HS Darmstadt)
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel (TH Nürnberg)
Prof. Dr. Daniel Vollprecht (Univ. Augsburg)
Prof. Dr.-Ing. Renuat Widmann (Univ. Duisburg-Essen)
Prof. Dr. Henning Wilts (HafenCity Univ. Hamburg, Wuppertal Institut)
Hon. Prof. Dr. Martin Wittmaier (HS Bremen)
Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky (HS Pforzheim)
Prof. Dr.-Ing. Christoph Wünsch (HS Merseburg)

Inhalt

KAPITEL I – VORTRÄGE

Teil 1 Kreislaufwirtschaft I

<i>Hana Stipanovic, Tanja Bäck, Alexia Tischberger-Aldrian</i> Identifizierung von Post-Consumer-Textilien mittels NIR-Spektroskopie	19
<i>Kyra Atessa Vogt, Iris Steinberg</i> Untersuchung der Auswirkung des Dispergierens auf die Erzeugung biobasierter Produkte aus biogenen Sekundärabfällen	25
<i>Volker Preyl, Carsten Meyer, Sebastian Schmuck</i> Rural Urban Nutrient Partnership – Nährstoffgemeinschaften für eine zukunftsfähige Landwirtschaft	31
<i>Somayeh Shami, Benedikt Haecker, Bernhard Prangl, Julian Aberger, Jesus Pestana, Michael Krisper</i> A Vision-Based Trash Particle Classification System for Sorting Facilities	35

Teil 2 Kreislaufwirtschaft II

<i>Josefina Ottitsch, Anika Gassner, Matthias Thin, Gerhard Wiesinger, Christoph Einspieler, Friedrich Bleicher</i> Investigation of Different Mechanical Methods for Photovoltaic Module Recycling	45
<i>Annika Pruhs, Anina Kusch, Tobias Viere, Jörg Woidasky</i> Entwicklung einer Entscheidungsmethodik für die zirkuläre Produktgestaltung	51
<i>Gavineesha Liew, Tabea Hagedorn, Liselotte Schebek, Alice do Carmo Precci Lopes</i> Exploring the Potentials for Increasing the Resource Efficiency in the Plastic Packaging Value Chain with a Digital Product Passport	57
<i>Ariana C. Morales Rapallo, Janus zum Brock, Mahsa Doostdar, Kerstin Kuchta</i> Innovative Slab Connection to Reduce Material Use and Increase Flexibility in a “Design for Disassembly” Structure	63

Teil 3 Aufbereitungs- und Sortiertechnik: Optische und mechanische Verfahren

<i>Alena Maria Spies, Tabea Scherling, Annika Ludes, Nils Kroell, Bastian Küppers, Sebastian Kaufeld, Karoline Raulf, Kathrin Greiff</i> Abtrennung von Papier aus Kunststoffgemischen: Parameterstudie mittels sensorbasiertem Prozessmonitoring zur optimierten Einstellung eines Ballistikseparators	71
<i>Tabea Scherling, Alena Maria Spies, Annika Ludes, Nils Kroell, Bastian Küppers, Karoline Raulf, Kathrin Greiff</i> Modellierung eines Ballistikseparators mittels sensorbasiertem Prozessmonitoring und Machine-Learning	77
<i>Tatjana Lasch, Renato Sarc</i> Charakterisierung eines mobilen Ballistik-Separators: Methodisches Vorgehen, großtechnische Versuchsdurchführung und statistische Auswertung	85
<i>Gerald Koinig, Nikolai Kuhn, Thomas Fink, Alexia Tischberger-Aldrian</i> Methoden zur Optimierung der Sortierung von Kunststoffverpackungsfolien	91
<i>Moritz Petzold</i> Entwicklung eines Systems zur automatischen Sortierung von Lithium-Ionen-Batterien anhand ihres Kathodenaktivmaterials	97

Teil 4 Thermische Verfahren I

<i>Roman Adam, Thomas Zeng, Lisa Röver, Philipp Schneider, Volker Lenz</i> Erfolgreiche Demonstration des einjährigen Messprogramms gemäß § 3 (5) der 1. BImSchV mit Laub-Holz-Pellets als „sonstiger nachwachsender Rohstoff“	103
<i>Viktoria Scheff, Thomas Zeng, David Laner</i> Modellierung des Ascheschmelzverhaltens als Grundlage für den Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe in Biomassefeuerungen	111
<i>Clement Owusu Prempeh, Ingo Hartmann, Steffi Formann, Manfred Eiden, Katja Neubauer, Hanan Atia, Alexander Wotzka, Sebastian Wohlrab, Michael Nelles</i> Performance and characterization of Sol-Gel-Derived Cornhusk Support for Low-Temperature Catalytic Methane Combustion	117

Teil 5 Thermische Verfahren II

Julia Mühl, Simon Hofer, Jakob Lederer

Gewinnung von Wertstoffen durch industrielle Aufbereitung von Rost- und Bettasche aus der Müllverbrennung 127

Simon Hofer, Julia Mühl, Jakob Lederer

Stoffflussanalyse der Elemente Blei und Cadmium bei der Nassaufbereitung einer Müllverbrennungsrostaesche: Eine Fallstudie aus Österreich 131

Dominik Bosch, Luca Nohel, Johann von Varnbüler, Jan Back, Angela Hofmann, Anke Bockreis

One-Step Activation of Residual Wood for Activated Carbon Production – A Contribution to the Circular Economy 137

Teil 6 Biologische Verfahren

Rzgar Bewani, Thomas Böning, Abdallah Nassour, Michael Nelles

Increasing the Efficiency of Mechanical-Biological Residual Waste Treatment through the Fermentation of the Liquid after Pressing the Organic Fractions 145

Bettina Krucker, Claudia Maurer, Jingjing Huang

Verwertung organischer Reststoffe als Futtermittel für die Larven der Schwarzen Soldatenfliege in einer Insektenbioraffinerie 151

Poroshat Haddadi, Agnes Tekle-Röttering, Thomas Brümmer, J. Meyer, Ralf Holzhauer

Investigation of the Movement of Microplastic from Biowaste in a Simulated Agricultural Environment Depending on Impacting Factors such as Soil Slope and Rain Intensity 157

Zheng Yang, Hongqing Li, Bo Fu, Bing Xue, Vera Susanne Rotter

Mapping the Biogasification Potential of Agricultural Crops Residues at the Town Scale in China 163

KAPITEL II – POSTER

<i>Julian Aberger, Lena Brensberger, Karim Khodier, Renato Sarc</i> Datenakquise für die Digitalisierung der Handsortierung: Methodik und erste Erkenntnisse	171
<i>Mozhdeh Alipoursarbani, Christian Abendroth</i> Aerobic Digestate Reactivation of Anaerobically Digested Sewage Sludge – A Micro Review	177
<i>Maximilian Auer, Kay Glaser, Jannick Schmidt, Jörg Woidasky</i> Was passiert mit den Hygiene-Schutzscheiben? PMMA-Stoffstromanalyse für Deutschland	181
<i>Ferozan Azizi, Ulrich Spitzer, Ewald Perndorfer, Thomas Nigl</i> Physikalisch mechanische Verbundauftrennung von Photovoltaik Modulen durch Wasserstrahlschneiden	187
<i>Dominik Blasenbauer, Anna-Maria Lipp, Johann Fellner, Jakob Lederer</i> Rückgewinnungspotential von Kunststoffverpackungen durch automatisierte Sortierung von gemischtem Siedlungsabfall – eine Fallstudie aus Österreich	189
<i>Bettina Cherdron, Mesut Cetin</i> Studie zur Potenzialanalyse der textilen Kreislaufwirtschaft: Ökonomische Potenziale des Textilrecyclings und der Wasserstofferzeugung aus Textilabfällen	193
<i>Nour El Houda Chaher, Abdallah Nassour, Michael Nelles</i> Digestate Valorization: Advancing Sustainable Food Waste Composting within Circular Bio-economy and SDGs Frameworks	197
<i>Joel da Silva Félix</i> Additivierung von Kalkhydrat zur Schwefelabscheidung in halogenarmen Abgasen (Ca-ADD)	203
<i>Mahsa Doostdar, Janus zum Brock, Ariana Morales Rapallo, Kerstin Kuchta</i> Comparative life cycle assessment of a concrete slab with different conventional and flexible designs	209
<i>Maximilian Julius Enengel, Renato Sarc</i> Unlocking the recycling potential: Die Gewinnung von recyclingfähigen Kunststoffen aus gemischten Abfällen	215
<i>Thomas Fink, Hana Stipanovic, Alexia Tischberger-Aldrian</i> Entwicklung einer kosten- und zeiteffizienten Methode zur Bestimmung des Polyolefin- gehaltes einer Kunststofffolienfraktion mithilfe des Schwimm-Sink-Verfahrens	221

<i>Thomas Fink, Nikolai Kuhn, Alexia Tischberger-Aldrian, Gerald Koinig</i> Ermöglichung einer Echtzeitklassifikation von Mehr-komponentenkunststofffolien mittels maschinellen Lernens und der Reduktion spektraler Komponenten	227
<i>Elias Grath, Thomas Nigl</i> Einflussparameter auf die optische Detektion von Batterien in gemischten Abfallströmen	233
<i>Christian Großhauser</i> Untersuchung und Optimierung der Methanbildungsrate an Methanisierungs- reaktoren	237
<i>Jinyang Guo, Willli Wagner, Simon Oshinowo, Ayah Alassali, Kerstin Kuchta</i> Feasibility Study of Introducing Deposit-Return System of Polyethylene Terephthalate (PET) Bottles to Non-Food Applications	245
<i>Julius Hecher, Anke Bockreis</i> FFG Innovationscamp Kreislaufmanager*in im Bauwesen	251
<i>Trang Hoang, Oliver Larsen, Joss Friederich Kurz, Vera Susanne Rotter, Leonhard Fechter</i> Fertilization Potential of Recovered Sulfur in Loaded Filter Material from Biogas Purification Process	255
<i>Isla Hodgkinson</i> Bioabbaubar gleich kompostierbar? – Wie die initial notwendige abiotische Hydrolyse den Abbau von PLA in der Kompostierung und der Natur beeinflusst	261
<i>Alexander Hofmann, Iryna Atamaniuk, Kerstin Kuchta</i> AquaHealth – Utilizing Bioactive Molecules from Microalgae Microbiomes for Sustainable Health Management in Aquaculture	269
<i>Nils Jansen, Christian Abendroth</i> Unveiling the Biochar Potential: Lowering Greenhouse Gas Emissions across the Biogas Supply Chain	279
<i>Elsa Madleen Jung, Jana Mühlenberg, Claudia Kirsten, Vera Susanne Rotter</i> Hygienisches Nährstoffrecycling durch thermophile Kompostierung von Trockentoiletteninhalten	287
<i>Lisa Kandlbauer, Renato Sarc</i> Methodenentwicklung zur digitalen Abfallanalytik für nicht gefährliche gemischte Gewerbeabfälle	293

<i>Christian Klüpfel, Ahmad Kordi, Benjamin Herklotz, Patrick Biller</i> Vergärung, HTL oder beides? Bewertung der energetischen Verwertung von Reststoffbiomasse	297
<i>Hanna Kobald, Hana Stipanovic, Alexia Tischberger-Aldrian</i> Bekleidungsaccessoires von Alttextilien in der automatisierten NIR-Sortierung	301
<i>Gerald Koinig, Nikolai Kuhn, Thomas Fink, Alexia Tischberger-Aldrian</i> Umfassende Charakterisierung von 2D Leichtverpackungs-abfällen zur Verbesserung des Recyclings	307
<i>Romana Kopecká, Marlies Hrad, Marion Huber-Humer</i> The Role of Final Sinks in Circular Economy	311
<i>Thomas Kremlicka, Boris Maier, Paul Demschar, Sarah Steiner, Klaus Philipp Sedlazeck</i> Mechanisch-thermochemische Verfahrenskombination für das Recycling von Feinfraktionen aus Abfallbehandlungsanlagen	317
<i>Nikolai Kuhn, Gerald Koinig, Leonie Wachtler, Roland Pomberger, Alexia Tischberger-Aldrian</i> Im Sinne der Kreislaufwirtschaft: Berücksichtigung von Kunststoff-Eigenschaftsprofilen bei der Charakterisierung von Leichtverpackungsabfällen	323
<i>Chaleen Lehwalder</i> Ökobilanzielle Beurteilung des Einsatzes von Einweg- und Mehrweggeschirr auf Großveranstaltungen – Am Beispiel des Bremer Open-Air-Kulturfestivals Breminale	329
<i>Thomas Lichtmanegger, Martin Hell, Carolina Kinzel, Julika Knapp, Christian Ebner, Anke Bockreis</i> Fettemissionen durch saisonalen Tourismus und effiziente Entfernungstechnologien auf Kläranlagen	335
<i>Anna-Maria Lipp, Dominik Blasenbauer, Jakob Lederer</i> Zooming into Austria – Status und Steigerungspotentiale von Recyclingquoten für Verpackungsabfälle innerhalb einer Modellregion	339
<i>Jennifer Maier, Daniel Vollprecht</i> Gipsrecycling – Entfernen von Siloxanen	343
<i>Gianna Mewes</i> innoCErt – Erweiterte Zertifizierung von Einweg- und Mehrweg-Verpackungen als Anreiz- und Steuerungs-instrument für die Schaffung von Innovationen zur Reduzierung von Kunststoffverpackungen entlang der Lebensmittelkette	349

<i>Anne Mich</i> Zwischen Einstellung und Verhalten: Attitude-Behaviour-Gap bei der Mehrwegnutzung in der Takeaway-Gastronomie	355
<i>Daniela Moloeznik Paniagua, Vera Susanne Rotter, Judy A. Libra, Oliver Larsen, Lukas Stück</i> Hydrochar from Digestate. Quality Control through Pepeatability and Legal Framework as Soil Amendment	359
<i>Selina Nieß, Sebastian Dietrich, Marco Klemm</i> Ein Kraftstoff aus ungenutzten Ressourcen: Rest- und Abfallstoffe als Kohlenstoffquelle für die Biomethanproduktion	365
<i>Michael Peer, Thomas Fehn, Alexander Hofmann, Burkhard Berninger</i> Metallrückgewinnung aus EoL-LED-Stableuchten mithilfe von chlorhaltigen Abfällen	371
<i>Sebastian Pentz, Lukas Lämmermaier, Niklas Diller, Daniel Vollprecht</i> Recycling kunstharzgebundener Schleifwerkzeuge	377
<i>Bettina Ratz, Philipp Sedlazeck, Theresa Sattler, Florian Steindl, Sara Raič, Ognjen Rudić, Cyrill Grengg</i> Waste-Based Geopolymer Construction Materials	381
<i>Susanne Roßkogler</i> Quantifiability of Sustainability and Ccircular Economy Measures in Austrian Manufacturing Companies	387
<i>Michael Siegl, Iris Unterkircher, Julian Aberger, Jesus Pestana, Michael Krisper</i> Action recognition support system for recycling and sorting facilities	391
<i>Souphaphone Soudachanh, Alessio Campitelli, Stefan Salhofer</i> Development stage of waste management system in ASEAN cities	399
<i>Axel Steffens, Cinthya Lara, Mustafa Kemal Ak, Volker Preyl, Jingjing Huang, Claudia Maurer, Glykeria Duelli</i> Störstoffentfrachtung von Bioabfall zur Weiterverarbeitung in einer Bioraffinerie	405
<i>Freya Sternkopf</i> Bewertung von Biomassen in Sachsen zur Produktion von Pflanzenkohle für die Anwendung in der Landwirtschaft	411
<i>Hana Stipanovic, Hanna Wolf, Alexia Tischberger-Aldrian</i> Überblick über die Bestimmungsmethoden für Polyolefine in Abfallproben	417

Klara Theobald

Analyse der systemischen Kosten von Mehrwegsystemen unter Berücksichtigung
der ökologischen Nachhaltigkeit und der Nutzer*innen-Akzeptanz 423

Anton Vielsack, Jörg Woidasky

Ansätze zur Materialcharakterisierung und -quantifizierung infektiöser
Krankenhausabfälle durch bildgebende Verfahren 429

Meike Walz

Charakterisierung von Strohpellets zur Biogaserzeugung 435

Marco Wehner, Anne Kaup, Christian Ebner, Anke Bockreis

Untersuchungen zur Abbaubarkeit von Vorsammelhilfen nach der Lagerung in
Küchen- und Speiseabfällen 441

Julian Wiechert, Nour Chaher, Abdallah Nassour, Micheal Nelles

Erweiterte Sektorenverantwortung für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft
im Tourismussektor 445

Janus zum Brock, Kerstin Kuchta

Klimaschutz und Nachhaltigkeitsaspekte in der Planungsphase von
Ingenieurbauwerken 451

Vorwort

Die Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft, der Beirat des Wissenschaftskongresses (Wiko) sowie der Unterzeichner freuen sich, in diesem Jahr an der TU Wien bei Prof. Dr. Dr. h.c. Helmut Rechberger und Mitarbeitern zu Gast sein zu dürfen. Wir haben an der TU Wien wieder viele engagierte Organisatoren und im Umfeld ebensolche Sponsoren gefunden. Allen sei dafür herzlichst gedankt.

Der Wissenschaftskongress hat erneut zugelegt. Die Zahl der eingereichten Abstracts und die Teilnehmerzahlen haben erneut zugenommen. Ebenso kommen jetzt deutlich mehr Teilnehmer aus dem nicht unmittelbar wissenschaftlichen Bereich. Dieser Dialog ist das, was wir uns wünschen, nicht zuletzt auch für die jungen Vortragenden und Poster Ausstellenden.

Die Abfallwirtschaft macht aktuell wieder einen imposanten Sprung. Kreislaufwirtschaft oder sogar Circular Economy stehen im Mittelpunkt. Umweltauswirkungen, Stoff- und Energieflüsse, Rohstoffschonung stehen im Mittelpunkt und haben Auswirkungen auf ökonomische Gegebenheiten und soziale Aspekte. Kein Vortrag oder kein Poster widmet sich der Deponietechnik. Insbesondere aus internationalem Blickwinkel betrachtet, gäbe es hier zwar noch eine Menge Fragen (Sonderabfalldeponien, Treibhausgasemissionen etc.), jedoch gehört der Kreislaufwirtschaft eindeutig die Zukunft. Und das wird auch bei diesem Wissenschaftskongress deutlich.

In diesem Kontext ist zu erwähnen, dass die Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft vor kurzem die Akademie der Kreislaufwirtschaft initiierte. Sie stützt sich im Wesentlichen auf die Beiräte dieses Kongresses und soll der Fachwelt wissenschaftlich abgeleitete Befunde zur Verfügung stellen. Sie tagte parallel zu diesem Kongress. Damit wird deutlich, dass auch die DGAW der wissenschaftsorientierten Kreislaufwirtschaft die Türen öffnet.

Überzeugende Ergebnisse zu liefern, auf deren Grundlage eine Gesellschaft Vertrauen entwickelt, diese zu akzeptieren, ist ein wichtiges Anliegen. Zu diesen Punkten leistet der WIKO einen wesentlichen Beitrag.

Nochmals herzlichen Dank an alle: An Herrn Professor Helmut Rechberger mit Team als Veranstalter vor Ort, an die Sponsoren, die im Tagungsband genannt werden und die DGAW als Organisatorin, an den Beirat und an die Gestalter des E-Tagungsbandes der Universität Innsbruck und natürlich an alle, die zu diesem Band einen Beitrag geleistet haben.

Der Unterzeichner ist weiterhin voller Optimismus und findet, dass der Wiko auf einem guten Wege ist. Der 14. Kongress steht bevor. Zunächst aber wünsche ich viele neue und interessante Einsichten beim Lesen des hier vorgelegten Bandes.

Für die Herausgeber
Ihr Gerhard Rettenberger

KAPITEL I – VORTRÄGE

TEIL 1 Kreislaufwirtschaft

Leitung:

Prof. Dr. Dr. h.c. Helmut Rechberger

Identifizierung von Post-Consumer-Textilien mittels NIR-Spektroskopie

Abstract: *Textilabfälle sind einer der am schnellsten wachsenden Abfallströme und werden voraussichtlich weiter zunehmen. Um die Textilwirtschaft von einer linearen zu einer Kreislaufwirtschaft zu bringen, müssen die Recyclingraten von Textilien deutlich höher sein. Ein wichtiger Teil funktionierender Recyclingsysteme sind automatisierte Textilsortierverfahren zur Bereitstellung stofflich verwertbarer Textilfraktionen. Eines der kritischen Probleme dabei ist die Identifizierung der Fasertypologien, aus denen der Abfall besteht. Derzeit wird die Sortierung von Textilabfällen manuell durchgeführt, was sehr zeitaufwendig und wirtschaftlich nicht effizient ist, eine automatisierte Sortierung (z.B. mit NIR-Technologie) zählt zu den vielversprechendsten Möglichkeiten der Zukunft. Daher werden im vorliegenden Beitrag Ergebnisse der Identifizierung von Fasertypen und der Bestimmung der Zusammensetzung von Post-Consumer-Textilien vorgestellt. Die untersuchten Textilien bestehen aus einem Fasertyp sowie aus zwei Fasertypen und wurden mit Hilfe zweier NIR-Spektroskopie-Technologien – sensorgestützte NIR-Spektroskopie und tragbare NIR-Spektroskopie – untersucht.*

1 Einleitung

Die Textil- und Bekleidungsindustrie ist einer der größten und am schnellsten wachsenden Industriesektoren weltweit, was auf die wachsende Bevölkerung, den steigenden Konsum, die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Textilien und die höhere Produktivität bei Massenproduktionsverfahren zurückzuführen ist. Es wurde geschätzt, dass die gesamten weltweiten Bekleidungsabfälle (83,5 Millionen Tonnen im Jahr 2015) mehr als 90 % der gesamten weltweiten Faserproduktion (94,5 Millionen Tonnen im Jahr 2016) ausmachen. (Ali et al., 2021) Der Gesamtverbrauch in Europa belief sich im Jahr 2020 auf 6,6 Millionen Tonnen Textilprodukte, was durchschnittlich 15 kg pro Person und Jahr entspricht (European Environment Agency, 2022). Jährlich werden 5,8 Millionen Tonnen Textilien weggeworfen, etwa 11,3 kg pro Person (European Commission, 2022). Da mit einem kontinuierlichen Anstieg der Textilabfälle zu rechnen ist, hat die Europäische Kommission Textilien als „vorrangiges Produkt für die Kreislaufwirtschaft“ eingestuft und die Mitgliedstaaten müssen bis zum 1. Januar 2025 eine separate Sammlung für Textilien einrichten. Derzeit wird der Großteil der Textilabfälle verbrannt, deponiert oder in Entwicklungsländer exportiert (Niinimäki et al., 2020). Daher ist klar, dass die Notwendigkeit besteht, den Anteil der recycelten Textilien zu erhöhen. Aus Recyclingsicht ist die Identifizierung und Sortierung von Textilfasern nach der Faserzusammensetzung von größter Bedeutung, um die Umsetzung eines funktionierenden Recyclingsystems zu ermöglichen. (Blanch-Perez-del-Notario et al., 2019) Die NIR-Spektroskopie als Teil der sensorgestützten Sortierung ist in diesem Fall, wie auch bei Kunststoffabfällen, die Technologie, die in den wenigen bereits vorhandenen Sortieranlagen

eingesetzt wird (Nellström et al., 2022). Für die Sortierung von Textilien mittels NIR bestehen jedoch zahlreiche Herausforderungen.

2 Material und Methode

Mittels sensorgestützter und tragbarer NIR-Spektroskopie wurden 466 Proben (88 kg) von Post-Consumer (PC) Textilien aus der getrennten Sammlung analysiert. Alle Proben enthielten die Originaletiketten, die als Referenz für die durchgeführten Analysen verwendet wurden. Die verwendeten PC-Textilien bestanden aus maximal fünf Fasertypen in unterschiedlichsten Kombinationen, einige bestanden nur aus einem Fasertyp (z.B. 100 % Baumwolle), andere aus zwei Fasertypen (z.B. Baumwolle/Polyester). Die Proben wiesen unterschiedliche Farben, Dicken und Strukturen auf. Von allen Proben wurden folgende Spektren aufgenommen: a. Im Wellenlängenbereich von 991-1677 nm mittels sensorgestützter NIR-Spektroskopie (Sensorstand) und b. im Wellenlängenbereich von 1596-2396 nm mittels tragbarer NIR-Spektroskopie (Handheld). Die erfassten Spektren mussten eine Signalvorbehandlung durchlaufen, bevor sie mit chemometrischen Werkzeugen weiterverarbeitet und ausgewertet wurden.

3 Ergebnisse

Die erhaltenen Ergebnisse zeigten vielversprechende Tendenzen bei der Trennung der meisten Proben. Bei der Analyse reiner Materialien können Unterschiede und mögliche Trennungen zwischen allen Materialien außer Baumwolle und Leinen untersucht werden. Bei Materialmischungen ist zu beobachten, dass die korrekte Materialerkennung vom Fasergehalt des jeweiligen Materials in der Zusammensetzung abhängt. Die Ergebnisse der Analyse sowohl von Reinmaterialien als auch von Mischmaterialien werden in den nächsten Unterkapiteln näher erläutert.

3.1 Textilien mit nur einem Fasertyp

Hier liegt der Fokus auf der Auswertung der Spektren von PC-Textilien, die laut Etikett aus nur einem Fasertyp bestehen. Die Spektren für Baumwolle, Leinen, Polyacryl, Polyester, Seide, Viskose und Wolle sind in Abbildung 1 grafisch dargestellt.

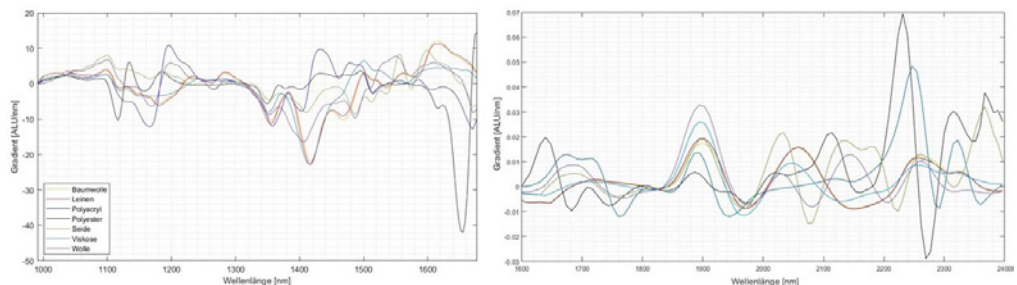


Abbildung 1 Grafische Darstellung der mittleren NIR-Spektren von Textilien mit nur einem Fasertyp mittels Sensorstand (links) und mittels Handheld (rechts)

Anhand der erhaltenen Spektren lassen sich folgende Aussagen treffen: Polyester lässt sich anhand seines Spektrums gut von anderen Materialien unterscheiden. Es hat einen charakteristischen Peak bei 1655 nm sowie zwei Banden bei 1116 und 1135 nm, die sich von den anderen Spektren abheben, wenn mittels Sensorstand gemessen. Dasselbe gilt für die Messung mit dem Handheld, bei der die charakteristischen Peaks bei 1630, 2110 und 2220 nm zu erkennen sind. Polyacryl weist ebenfalls mehrere charakteristische Banden auf, die zu einer Unterscheidung herangezogen werden können. Zu Beginn zwei stärkere Ausschläge bei 1166 und 1195 nm und ein Peak bei 1433 nm, als auch zwei Banden bei 1760 und 1940 nm und zwei Peaks bei 1900 nm und 2250 nm. Den charakteristischen Ausschlag bei 1671 nm weisen auch die Materialien Seide und Wolle auf. Baumwolle und Leinen lassen sich in den berücksichtigten Wellenlängenbereichen nicht voneinander unterscheiden, die Spektren sind weitestgehend ident. Grund dafür ist, dass die beide Materialien aus natürlichen Fasern hergestellt werden, die hauptsächlich aus Zellulose bestehen. Viskose und Baumwolle sind sich in ihrem Spektrum sehr ähnlich, aber kleine Unterschiede lassen sich innerhalb des Wellenlängenbereiches 1200-1300 nm, 1600-1700 nm und 2050-2220 nm erkennen. Das mittlere Spektrum der Wolle zeigt in vielen Bereichen Ähnlichkeiten mit anderen Materialien, hauptsächlich Seide, jedoch nie zur Gänze. Eine Abgrenzung der Wolle zu anderen Materialien ist bei 1408, 1599 und zwischen 2100-2200 nm. Wie bereits oben erwähnt ähnelt das Spektrum der Seide jenem der Wolle. Alleinstellungsmerkmale lassen sich bei 1411 nm, 1555 nm, 1599 nm, 2150 nm, 2220 nm und zwischen 2300-2400 nm erkennen. Die Ergebnisse der PCA (Principal Component Analysis) zeigen, dass die Spektren der Textilien mit nur einem Fasertyp signifikant voneinander unterschieden werden können. Polyester und Polyacryl (beides synthetische Fasern) grenzen sich klar von anderen Materialien ab. Viskose, Seide, Wolle und Baumwolle liegen nahe beieinander, lassen aber jeweils eigene Gruppen erkennen. Baumwolle und Leinen können auch anhand der PCA nicht voneinander unterschieden werden. Die Ergebnisse der Pareto-Diagramme zeigen, dass sich die Varianz der Proben mit 2 Hauptkomponenten zu 88 % und 3 Hauptkomponenten zu 92 % erklären lässt. Eine Betrachtung der Materialgruppen anhand Principal Component 1 und Principal Component 2 zeigt eine klare Abgrenzung zwischen Polyester, Polyacryl, Seide/Wolle und Baumwolle/Leinen/Viskose. Laut PCA Loadings lassen sich mehrere Wirksamkeitsbereiche erkennen, an denen ein hoher Einfluss der Variablen vorliegt, und zwei bei 1100-1200 nm, 1320-1500 nm, 1620-1660 nm, 1900-2100 nm und 2200-2400 nm. Da die Materialien Baumwolle, Leinen, Seide, Viskose und Wolle sehr nahe beieinander liegen, wurde nachfolgend eine weitere PCA mit besagten Materialien durchgeführt. Sie zeigt eine klare Abgrenzung zwischen Baumwolle, Viskose, Seide und Wolle. Die Materialien Baumwolle und Leinen befinden sich jedoch auch hier in derselben Position.

Zusätzlich wurden die Spektren hinsichtlich verschiedener Einflussfaktoren wie Farbe, Dicke und Oberflächenstruktur ausgewertet. Ein Einfluss des Farbtons auf das charakteristische Spektrum ist bei den einzelnen Farbbereichen nicht zu erkennen. Jedoch sind vereinzelt PC-Textilien vorhanden, deren Spektrum keine Informationen zeigen. Dies ist der Fall bei zwei schwarz gefärbten PC-Textilien und vier von acht Jeans. Dies lässt vermuten, dass die Methode der Färbung oder Behandlung sehr wohl einen Einfluss auf das Spektrum haben kann. Ein Einfluss der Oberflächenstruktur (z.B. gewebt oder gestrickt) ist nicht zu erkennen. Andererseits konnte in vielen Fällen beobachtet werden, dass dünnere PC-Textilien (z.B. Blusen und Schals) eine geringere Intensität der Absorption zeigen als dickere (z.B. T-Shirts und Pullover). Es ist deutlich erkennbar, dass bei PC-Textilien mit geringeren Dicken die Intensität charakteristischer Spektralbereiche aufgrund der geringeren Dicken verloren geht, was besonders bei PC-Textilien aus Kunstfasern zu Problemen bei der Erkennung führt.

3.2 Mischmaterialien

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden Mischmaterialien betrachtet, die aus maximal zwei Fasertypen bestehen. Zur Bewertung der Charakteristik von Baumwolle/Polyester (BW/PES)-Mischungen, werden die PC-Textilien, abhängig von ihrer Materialzusammensetzung, in fünf Klassen eingeteilt. Aus den Spektren der einzelnen Klassen wurde ein mittleres Spektrum berechnet, das die charakteristischen Bereiche widerspiegelt und für den Vergleich herangezogen wird. Abbildung 2 zeigt alle mittleren Spektren der Mischmaterialien sowie der Reinmaterialien Baumwolle und Polyester. Die Spektren der BW/PES-Mischungen sind eine Kombination aus den Spektren der Reinmaterialien des vorhandenen Fasertyps in der Mischung, in diesem Fall Baumwolle und Polyester. Die BW/PES-Mischung zeigt charakteristische Ausschläge des Polyesters bei 1116 und 1135 nm sowie bei 1655 nm und charakteristische Ausschläge der Baumwolle bei 1417 und 1617 nm, wenn mittels Sensorstand gemessen. Mittels Handheld gemessene Spekten zeigen charakteristische Peaks des Polyesters bei 1650 und 2100 nm sowie bei 2220 nm und charatkeristische Peaks der Baumwolle bei 1900 und 2060 nm. Bei der Spektralanalyse ist es möglich zu erkennen, dass die Spektren gemischter Materialien eher den Spektren des mehr enthaltenen Materials ähneln, aber man kann auch das charakteristische Spektrum des anderen Materials erkennen. Die Varianz der Variablen durchgeführte PCA lässt sich mit zwei Hauptkomponenten zu 95 % erklären. Die Loadings aus der PCA zeigen drei Wirksamkeitsbereiche, die an denselben charakteristischen Bereichen von Baumwolle und Polyester liegen, wenn mittels Sensorstand gemessen und auch drei Wirksamkeitsbereiche, wenn mittels Handheld gemessen. Besonders stark wirken die Variablen im Bereich 1320-1500 nm und 1600-1660 nm sowie 2100-2230 und 2300-2400 nm.

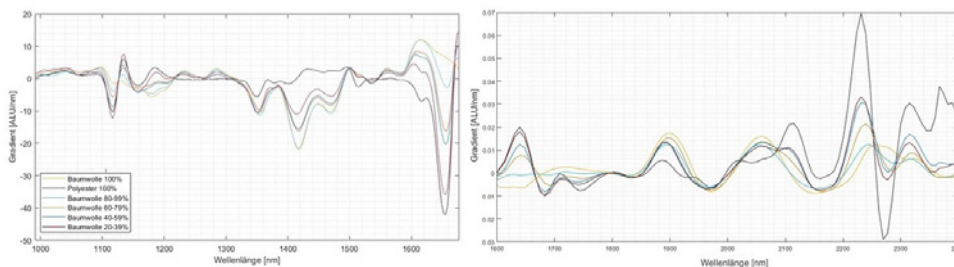


Abbildung 2 Grafische Darstellung der mittleren NIR-Spektren der Klassen von BW/PES-Mischungen und der Reinmaterialien Baumwolle und Polyester mittels Sensorstand (links) und Handheld (rechts)

Zusätzlich wurde auch die spektrale Analyse und mögliche Sortierbarkeit für folgende Materialmischungen betrachtet: Baumwolle/Viskose (BW/VI), Baumwolle/Polyacryl (BW/PC) und Polyester/Viskose (PES/VI). Die Spektren von Baumwolle und Viskose weisen in vielen Bereichen die gleichen spektralen Eigenschaften auf. Daher sind auch die Spektren der Mischungen aus diesen Materialien den Reinmaterialien sehr ähnlich. Trotz ähnlicher spektraler Eigenschaften scheint laut PCA eine Abtrennung von BW/VI-Mischungen ab einer Differenz von 30 % zum Reinmaterial Baumwolle möglich zu sein. Jedoch muss angemerkt werden, dass der Datensatz der Mischmaterialien wesentlich geringer war als jener der Reinmaterialien. Alle verwendeten Proben der BW/PC-Mischung bestanden zu 50 % aus Baumwolle und zu 50 % aus Polyacryl. Das Spektrum BW/PC 50/50 liegt im Vergleich zu den Spektren der Reinmaterialien näher an Baumwolle. Dennoch, anhand durchgeführter PCA lässt sich sagen, dass eine Mischung von Baumwolle und Polyacryl im Verhältnis 50/50 von den Reinmaterialien trennbar ist. Die Veränderung der spektralen Eigenschaften hinsichtlich

unterschiedlicher Mischungsverhältnisse kann jedoch nicht untersucht werden, da keine PC-Textilien in andere Zusammensetzung untersucht worden waren. Die Spektren von PES/VI-Mischmaterialien enthalten Charakteristiken des Polyesters sowie der Viskose. Mit zunehmendem Anteil an Viskose in der Mischung nimmt die Intensität bei charakteristischen Ausschlägen und Peaks von reiner Viskose und reinem Polyester ab. Mit zunehmendem Anteil an Polyester nimmt die Intensität an charakteristischen Ausschlägen und Peaks von reiner Viskose ab und von reinem Polyester zu. Ein ausreichender Intensitätsunterschied zwischen den Klassen mit unterschiedlichem prozentualen Anteil ist nur bei Klasse mit 20-39 % Polyester und 61-80 % Viskose ersichtlich. Allerdings, zeigt die PCA eine klare Trennung der Mischmaterialien untereinander und zu den Reinmaterialien. Hier ist auch wichtig zu bedenken, dass die Menge der verwendeten PES/VI-Mischung PC-Textilien noch zu gering ist, um verlässliche Aussagen zu treffen.

Danksagung

Wir danken dem österreichischen Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort, der Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung und der Christian-Doppler-Forschungsgesellschaft für die finanzielle Unterstützung. Darüber hinaus bedanken wir uns für die finanzielle und nichtfinanzielle Unterstützung unserer Unternehmenspartner Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoffrecycling Austria AG, Linz Service GmbH, OMV Downstream GmbH und Wien Energie GmbH.

Literatur/Quellen

- Ali, A., Elfaky, E., Mohammed, S., Haroon, H., Eshag, I., Hassan, E., 2021. Textile recycling- A review. *Global Journal of Engineering and Technology Advances* 6, 069–074. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2021.6.3.0015>
- Blanch-Perez-del-Notario, B., Saeys, W., Lambrechts, A., 2019. Hyperspectral imaging for textile sorting in the visible-near infrared range. *Journal of Spectral Imaging* 8. <https://doi.org/10.1255/jsi.2019.a17>
- European Commission, 2022. Factsheet on Textiles [WWW Document]. European Commission – European Commission. URL https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_22_2017 (accessed 4.4.23).
- European Environment Agency, 2022. Textiles and the environment: the role of design in Europe's circular economy – European Environment Agency [WWW Document]. URL <https://www.eea.europa.eu/publications/textiles-and-the-environment-the> (accessed 4.4.23).
- Nellström, M., Grahn Lydig, S., Albertsson, G.S., Bolinius, D.J., 2022. Siptex Swedish Innovation Platform for Textile Sorting, A summary report of the final stage of the project.
- Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., Gwilt, A., 2020. The environmental price of fast fashion. *Nat Rev Earth Environ* 1, 189–200. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>

Kontakt

Hana Stipanovic, mag.ing.min., wissenschaftliche Mitarbeiterin

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel.-Nr. +43 677 / 64 02 13 50

E-Mail: hana.stipanovic@unileoben.ac.at; Homepage: <https://www.avaw-unileoben.at/>

Untersuchung der Auswirkung des Dispergierens auf die Erzeugung biobasierter Produkte aus biogenen Sekundärabfällen

Abstract: Eine kaskadische Nutzung vorhandener Sekundärabfälle zur Erzeugung biobasierter Produkte ist notwendig. Kurzkettige Carbonsäuren, die bereits in Sekundärabfällen enthalten sind, können durch einen biotechnologischen Behandlungsprozess zu mittelkettigen Carbonsäuren umgewandelt werden. Zur Untersuchung der Auswirkung des Dispergierens auf die Erzeugung biobasierter Produkte aus biogenen Sekundärabfällen wurden statische Bioreaktoren, ohne Rührfunktion, sowie dynamische Bioreaktoren, mit Rührfunktion betrachtet. In den dynamischen Bioreaktoren konnte eine Erhöhung der Extraktionsrate der mittelkettigen Carbonsäuren von bis zu 20% Capronsäure und bis zu 64% Caprylsäure erzielt werden.

1 Einleitung

Aufgrund des steigenden Verbrauchs an fossilen Rohstoffen (Europäische Union, 2020; OECD, 2019) gewinnt die kaskadische Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe zur Produktion von biobasierten Materialien und Produkten immer mehr an Bedeutung (BMBF & BMEL, 2020). Somit ist ein Wandel von einer linearen Wirtschaft zu einer kreislauforientierten Bioökonomie (circular bioeconomy) notwendig. In einer kreislauforientierten Bioökonomie wird die nachhaltige, ressourceneffiziente Verwertung von Biomasse in integrierten, mehrstufigen Produktionsketten (z. B. Bioraffinerien) fokussiert. Dabei wird die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen und eine nachhaltige Nutzung der Biomasse durch eine kaskadische Nutzung berücksichtigt (Stegmann et al., 2020, S. 5). Die Nutzung von Sekundärabfällen zur Erzeugung biobasierter Carbonsäuren, die üblicherweise durch eine chemische Synthese erdölbasierter Rohstoffe oder eine Synthese natürlicher Öle (z. B. Kokosnuss- oder Palmkernöl) produziert werden (Anneken et al., 2012), kann einen Beitrag zur kreislauforientierten Bioökonomie leisten. Sekundärabfälle sind Abfälle, die bei der Behandlung von Abfällen erzeugt werden, z. B. Reststoffe aus Verwertungs- und Beseitigungsverfahren (European Union, 2015). Enthalten diese Sekundärabfälle organische Bestandteile mit einer oder mehreren Carboxygruppen (-COOH), können sie zur Erzeugung biobasierter Carbonsäuren genutzt werden (Federle et al., 2017). In einem biotechnologischen Behandlungsprozess können spezialisierte Mikroorganismen die bereits im Sekundärabfall enthaltenen kurzkettigen Carbonsäuren (mit 1 - 3 Kohlenstoffatomen) zu mittelkettigen Carbonsäuren (mit 4 - 10 Kohlenstoffatomen) aufbauen. Dazu werden Kohlenstoffatome des Nährstoffes Ethanol verwendet. Dieser Prozess kann auch als Kettenverlängerung bezeichnet werden. Die Abtrennung der gebildeten mittelkettigen Carbonsäuren von dem Sekundärabfall erfolgt während des Behandlungsprozesses über ein unpolares Lösemittel als in-situ Extraktion (Flüssig-Flüssig-Extraktion). Dadurch kann eine Hemmung der Kettenverlängerung der Carbonsäuren verhindert werden (Klose, 2000).

Zielstellung der Untersuchung ist die Optimierung des Behandlungsprozesses durch das Dispergieren des Extraktionsmittels im Sekundärabfall. Bisher wurden die Untersuchungen zur Erzeugung mittelkettiger Carbonsäuren in statischen Bioreaktoren ohne Durchmischung im Labormaßstab durchgeführt und das verwendete Extraktionsmittel bildet eine Schwimmschicht oberhalb des Sekundärabfalls. Dabei begrenzt die Fläche der Trennschicht zwischen Extraktionsmittel und Sekundärabfall den Übergang der mittelkettigen Carbonsäuren in das Extraktionsmittel. Es soll untersucht werden, ob das Dispergieren des Extraktionsmittels im behandelten Sekundärabfall zu einer Erhöhung der Extraktion mittelkettiger Carbonsäuren sowie zu einer Steigerung der Erzeugung mittelkettiger Carbonsäuren führt. Dafür wurden die statischen Bioreaktoren mit einem geeigneten Rührwerk erweitert, um das Extraktionsmittel im Sekundärabfall zu verteilen und somit die Fläche zum Übergang der mittelkettigen Carbonsäuren zu erhöhen. Die Auswirkungen des Dispergierens auf die Erzeugung biobasierter Produkte aus biogenen Sekundärabfällen wurde durch einen direkten Vergleich der statischen und dynamischen Bioreaktoren untersucht. (Vogt & Steinberg, 2023)

2 Methodik

2.1 Substrat

Für die Untersuchung wird Sickerwasser einer Kompostierungsanlage als Sekundärabfall verwendet. Dieses enthält bereits kurzkettige Carbonsäuren und die für den biologischen Behandlungsprozess notwendigen Mikroorganismen. Je Bioreaktor werden 12 Liter Sekundärabfall verwendet. Zur Extraktion der mittelkettigen Carbonsäuren wird Rapsmethylester (Syskem Chemie GmbH, fatty acid methyl ester C16-C18) als unpolares Lösemittel verwendet. Es erfolgt eine Zugabe des Extraktionsmittels von 10 Vol-% des Sekundärabfalls. Es werden $9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ des für die Mikroorganismen benötigten Nährstoffes Ethanol (Carl Roth, Ethanol 96% vergällt) dem Sekundärabfall zugegeben, da nach Sarkar et al. (2021) bei dieser Konzentration die höchste Bildungsrate von Capronsäure (C6) während der Kettenverlängerung erwartet wird.

2.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Untersuchung werden Batch-Bioreaktoren mit einem Betriebsvolumen von 14 Litern verwendet. Diese werden zur Gewährleistung der notwendigen anaeroben Betriebsbedingungen luftdicht verschlossen sowie zu Beginn der Untersuchung mit dem Inertgas Stickstoff gespült. Der Inhalt der Bioreaktoren wird in einer Temperierkammer für 28 Tage auf $36^\circ\text{C} \pm 1$ erwärmt. Zur Unterdrückung einer Methanproduktion im Behandlungsprozess sollte der pH-Wert im Sekundärabfall zwischen 6,0 und 6,5 liegen. Zu Beginn der Untersuchung wird der pH-Wert mit Salzsäure ($c = 2,87 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) auf 6,0 eingestellt. Die Abtrennung der mittelkettigen Carbonsäuren erfolgt über eine in-situ Extraktion (Flüssig-Flüssig-Extraktion). Über verschiedene Probenahmestellen können Mischproben des Sekundärabfalls (unterer und oberer Bereich des Bioreaktors) sowie Proben des Extraktionsmittels entnommen werden. Entstehendes Biogas wird in einem Folienbeutel aufgefangen.

Es werden vier statische Bioreaktoren, ohne Rührfunktion, und vier dynamische Bioreaktoren, mit Rührfunktion, verwendet. Diese sind mit Ausnahme des Rührwerks identisch aufgebaut. Das verwendete Rührwerk setzt sich aus einem Motor (Brushless DC Motor, BPC Instruments AB) und einem Rührer zusammen. Der Rührer ist eine Balkenrührer, eine Kombination aus einem Schrägblatt- und einem Ankerrührer (Hemming & Wagner, 2017; Leonie Wenzel, 2022). Die gewählte Drehgeschwindigkeit beträgt etwa 70 RPM. Die Funk-

tion der statischen und der dynamischen Bioreaktoren unterteilt sich wie folgt: Es gibt jeweils zwei Bioreaktoren zur Doppelbestimmung des Behandlungsprozesses, einschließlich in-situ Extraktion. Des Weiteren werden jeweils ein Bioreaktor ohne Behandlungsprozess, jedoch mit in-situ Extraktion, sowie ein Bioreaktor als Referenzreaktor ohne Behandlungsprozess und ohne in-situ Extraktion verwendet. (Vogt & Steinberg, 2023)

2.3 Analytik

Die Probenahme des Sekundärabfalls sowie des Extraktionsmittels erfolgt die ersten sieben Tage der Untersuchung täglich, daraufhin im Rhythmus von vier bzw. drei Tagen (dienstags und freitags). Die Vorort-Analytik umfasst den pH-Wert, das Redoxpotential sowie die Leitfähigkeit und wird unmittelbar nach der Probenahme im Sekundärabfall durchgeführt. Diese Parameter geben Aufschluss darüber, ob die notwendigen Bedingungen für die Mikroorganismen vorliegen. Zusätzlich wird der Temperaturverlauf über den gesamten Untersuchungszeitraum aufgezeichnet. Die Konzentration des Nährstoffes Ethanol im Sekundärabfall wird nach der Probenahme mittels Gaschromatographie und Flammenionisationsdetektor (GC-FID) bestimmt. Dadurch kann die Menge des Ethanols festgestellt werden, die von den Mikroorganismen umgesetzt wurde. Anschließend erfolgt die Bestimmung der extrahierten Carbonsäuren im Extraktionsmittel ebenfalls mittels GC-FID. Die Konzentrationen an Carbonsäuren im Sekundärabfall werden mittels Hochleistungsflüssigchromatographie und UV-Detektor (HPLC) bestimmt.

Leider liegen die Ergebnisse der Konzentrationen der gebildeten Carbonsäuren im Sekundärabfall noch nicht im vollen Umfang vor und können daher noch nicht in dieser Betrachtung berücksichtigt werden.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Aufzeichnung des Temperaturverlaufs zeigt, dass die benötigte Temperatur von 36°C innerhalb des Bioreaktors erst zwischen dem vierten und fünften Tag der Untersuchung erreicht wurde.

Der pH-Wert nimmt in den statischen sowie in den dynamischen Bioreaktoren kontinuierlich ab. Es ist festzustellen, dass die Abnahme der pH-Werte der Bioreaktoren mit Behandlungsprozess inkl. in-situ Extraktion größer ist als die der Bioreaktoren ohne Behandlungsprozess bzw. der Referenzreaktoren. Die pH-Differenz zwischen diesen liegt etwa bei 0,5. Bis zum 14. Tag der Untersuchung sinkt der pH-Wert der statischen Bioreaktoren mit Behandlungsprozess auf ein Minimum von 5,8 und der pH-Wert der dynamischen Bioreaktoren mit Behandlungsprozess auf ein Minimum von 5,9. Die Abnahme der pH-Werte kann ein Anzeichen auf die Kettenverlängerung der Carbonsäuren sein.

Die Messungen des Redoxpotentials lassen keine genauen Rückschlüsse auf ein anaerobes oder aerobes Milieu zu. Nach Herstellerangaben der Messtechnik des Redoxpotentials (Xylem Analytics Germany Sales GmbH & Co. KG) könnte eine Ursache dafür die hohen Leitfähigkeitswerten im Sekundärabfall sein. Diese liegen zwischen 32,6 mS*cm⁻¹ und 35,8 mS*cm⁻¹.

Zu Beginn der Untersuchung wurden 9.000 mg*L⁻¹ Ethanol den Bioreaktoren mit Behandlungsprozess zugegeben. Nach einer anfänglichen Verzögerung von etwa vier Tagen ist eine Reduktion des Ethanols deutlich sichtbar. Die Konzentration an Ethanol im statischen Bioreaktor ist nach sieben Tagen auf

etwa $2.500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ abgebaut und nach 14 Tagen ist kein Ethanol mehr nachweisbar. Im Vergleich dazu beträgt die Konzentration des Ethanols im dynamischen Bioreaktor nach sieben Tagen etwa $1.000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ und nach bereits elf Tagen ist kein Ethanol mehr nachweisbar. Somit konnte die Untersuchung bereits nach 14 Tagen beendet werden, da kein Ethanol zur Erzeugung mittelkettiger Carbonsäuren vorhanden ist. Es ist ein beschleunigter Abbau des Ethanols in den Bioreaktoren mit Rührfunktion zu erkennen.

Zur Betrachtung der Auswirkung des Dispergierens auf die Extraktion der Carbonsäuren wurden die Konzentrationen von Buttersäure (C4), Valeriansäure (C5), Capronsäure (C6), Önanthsäure (C7) und Caprylsäure (C8) für die Untersuchungstage zwei, vier und sechs betrachtet. Es ist eine Anreicherung der Carbonsäuren im Extraktionsmittel über die sechs Untersuchungstage sichtbar. Wird die Differenz der prozentualen Zunahme der extrahierten Carbonsäuren zwischen den statischen und dynamischen Bioreaktoren betrachtet, so ist eine Steigerung dieser im dynamischen Bioreaktor ersichtlich. Am sechsten Untersuchungstag konnten 15% mehr Buttersäure, 16% mehr Valeriansäure, 20% mehr Capronsäure, 44% mehr Önanthsäure sowie 64% mehr Caprylsäure im Extraktionsmittel nachgewiesen werden. Die bisherigen Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass eine Erhöhung der extrahierten mittelkettigen Carbonsäuren in Bioreaktoren mit der Funktion des Dispergierens möglich ist. Derzeit kann noch keine Aussage über die Auswirkung zur Steigerung der Erzeugung mittelkettiger Carbonsäuren im verwendeten Sekundärabfall getroffen werden, da die Ergebnisse der Analysen noch nicht im vollen Umfang vorliegen.

Danksagung

Die Untersuchung wurde 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/Quellen

- Anneken, D. J., Both, S., Christoph, R., Fieg, G., Steinberner, U. & Westfechtel, A. (Hrsg.). (2012). Fatty Acids: in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a10_245.pub2
- BMBF & BMEL. (2020). Nationale Bioökonomiestrategie. Referat Nachhaltiges Wirtschaften, Bioökonomie (BMBF); Referat Bioökonomie, Stoffliche Biomassennutzung (BMEL).
- Europäische Union. (2020). Neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft: Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa (Bd. 22). Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union. <https://doi.org/10.2779/688789>
- European Union. (2015). Eurostat – Statistics Explained: Glossary “secondary waste” (ISSN: 2443-8219). https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Secondary_waste
- Federle, S., Hergesell, S. & Schubert, S. (2017). Die Stoffklassen der organischen Chemie: Praktisch und kompakt von Studenten erklärt (1. Aufl. 2017). Springer Berlin Heidelberg.

- Hemming, W. & Wagner, W. (2017). Verfahrenstechnik (12., korrigierte Auflage). Kamprath-Reihe. Vogel Media Business; Preselect.media GmbH.
- Klose, M. C. (2000). Fermentation mit In-situ-Extraktion und In-situ-Elektroextraktion [Dissertation]. Technische Universität München, München. <https://d-nb.info/962119555/34>
- 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.
- OECD. (2019). Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences. OECD. <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>
- Vogt, K. A. & Steinberg, I. (2023). Untersuchung der Auswirkungen des Dispergierens auf die Erzeugung biobasierter Produkte aus biogenen Sekundärabfällen. In A. Bockreis, M. Faulstich, S. Flamme, M. Kranert, M. Mocker, M. Nelles, P. Quicker, G. Rettenberger & V. S. Rotter (Hrsg.), 12. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft (1 Aufl., S. 377–381). innsbruck university press.

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
Homepage: www.fbbu.h-da.de

Rural Urban Nutrient Partnership – Nährstoffgemeinschaften für eine zukunftsfähige Landwirtschaft

Abstract: *Rural Urban Nutrient Partnership (RUN) – „Nährstoffgemeinschaften für eine zukunftsfähige Landwirtschaft“ ist ein inter- und transdisziplinäres Forschungsvorhaben, in dem die Zukunftsvisionen einer Partnerschaft zwischen Landwirt*innen und städtischen Bewohner*innen etabliert und praktisch überprüft werden soll. Das Projektziel ist die Schließung von Nähr- und Wertstoffkreisläufen zwischen regionalen Stadt- und Landschaftsräumen und liefert einen wertvollen Beitrag zur Steigerung der Resilienz und Ressourceneffizienz von Agrarsystemen. Das Vorhaben wird von einem inter- und transdisziplinären Konsortium aus Agrar- und Ingenieurwissenschaftlern, Soziologen, Systemanalytikern, Stadt- und Landschaftsplanern, Ingenieuren und kommunalen Institutionen durchgeführt.*

1 Einleitung

Rohstoffknappheit, Preisexplosionen, Wasserknappheit, endliche Ressourcen – die Landwirtschaft steht vor großen Herausforderungen. Im Rahmen der Förderlinie Agrarsysteme der Zukunft fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) das Projekt „Rural Urban Nutrient Partnership (RUN)“, um im Sinne bioökonomischer Prinzipien Lösungen für eine zukunftsfähige Landwirtschaft zu entwickeln.

RUN hat zum Ziel, Nährstoffkreisläufe zwischen Stadt und Land zu schließen. Hierfür wird der effiziente und schonende Umgang mit den uns zur Verfügung stehenden Ressourcen und das Zusammenspiel nachhaltiger landwirtschaftlicher Produktion mit zukunftsorientiertem Konsumverhalten städtischer Bewohner*innen erforscht. Wesentliche Elemente sind dabei innovative Rückgewinnungsverfahren von Nährstoffen aus Bioabfällen und häuslichen Abwässern für die Herstellung sicherer Düngemittel. Neben der Entwicklung technischer Verfahren erforscht das inter- und transdisziplinäre Vorhaben auch pflanzenbauliche Fragestellungen, erarbeitet landschaftsökologische und ökonomische Modelle und untersucht die gesellschaftliche Akzeptanz.

Zur Erreichung des Projektziels werden übertragbare und detailliert auf ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit geprüfte Konzepte und Technologielösungen erarbeitet und in der Praxis erprobt. Die intensive Kommunikation zwischen den Akteur*innen, die wechselweise die Rollen Konsument und Produzent haben, sowie die Überwindung von Hemmnissen werden durch die sozialwissenschaftliche Begleitung besonders gefördert. Ein hoher Innovationsgrad und somit Forschungsbedarf besteht in der (Weiter-)Entwicklung von Technologien, die nährstoffreiche kommunale Sekundärressourcen (Abfall- und Abwasserteilströme) in sichere und wirksame Design-Düngemittel für die Landschaft verwandeln. Es sind Versuche auf unterschiedlichen Skalenebenen erforderlich, die schließlich in einer großtechnischen Pilotanlage [ca. 100 bis 200 Einwohner(werte)] münden. Schließlich soll die Machbarkeit in der Praxis unter

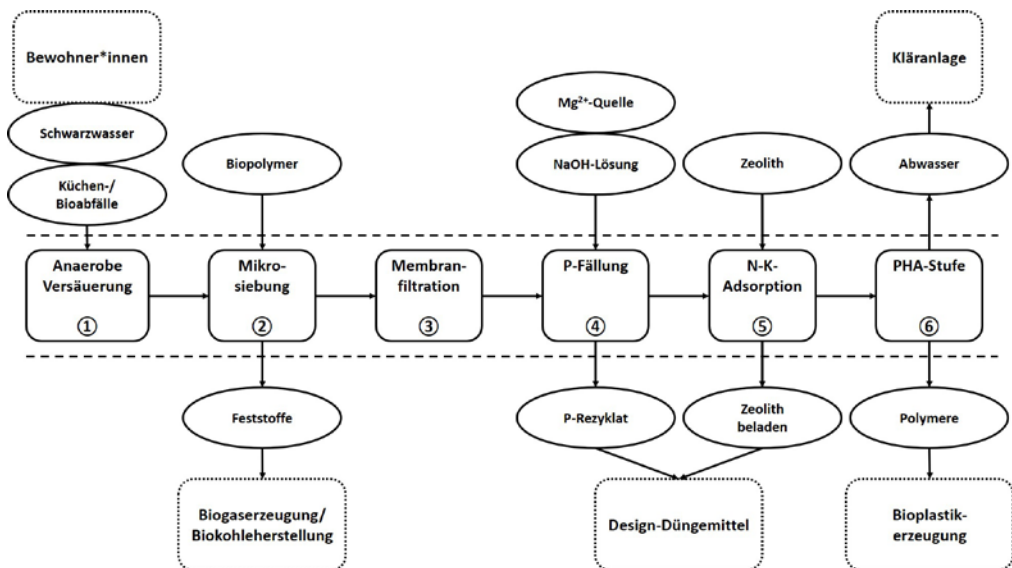
Beteiligung aller Akteur*innen demonstriert werden. Im vorliegenden Beitrag liegt das Augenmerk speziell auf der RUN-Technologie, also den technischen Prozessen und Verfahren zur Nährstoffrückgewinnung.

2 Methodik

2.1 RUN-Technologie – Gesamtverfahrensprozess

Mit der RUN-Technologie werden die Ausgangsstoffe Schwarzwasser und zerkleinerte Küchen-/Bioabfälle gemeinsam mittels mechanischer, biologischer sowie chemischer Prozesse zu den mineralischen Düngern und Biopolymeren verarbeitet. Die Düngemittel mit den Nährstoffen Phosphor, Stickstoff und Kalium sollen in der Landwirtschaft bedarfsgerecht eingesetzt werden. Die Biopolymere stellen Ausgangsprodukte für die Erzeugung von Biokunststoffen, beispielsweise Folien, dar.

Die Machbarkeit bzw. technische Umsetzung der RUN-Verfahrenskette wurde bereits erfolgreich im Labormaßstab getestet. Eine Versuchsanlage im Halbtechnikmaßstab zur Optimierung der Verfahrensschritte und zur Ableitung von Skalierungs- und Betriebsparametern für den Pilotbetrieb befindet sich im laufenden Betrieb, ebenso wie die Fertigung der großtechnischen Pilotanlage. In der nachfolgenden Abbildung sind die notwendigen Prozessschritte im laufenden halbtechnischen Betrieb dargestellt:



Zu Beginn eines Batchdurchlaufs werden Schwarzwasser und zerkleinerte Küchen-/Bioabfälle in einem festgelegten Mischungsverhältnis in einem mesophilen Reaktor miteinander vermischt. Während eines vorgegebenen Reaktionszeitraums findet eine anaerobe Versäuerung ① statt, wodurch es zur Mobilisierung der Nährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) sowie zur Produktion organischer Säuren kommt. Anschließend wird die saure Matrix dem Reaktor entnommen und konditioniert, d.h. durch Zugabe

eines Biopolymers auf Kartoffelstärkebasis die notwendige Flockung der enthaltenen Matrixfeststoffe herbeigeführt. Der überwiegende Anteil dieser Feststoffe wird dann durch Mikrosiebung ② (durchschnittliche Maschenweite 100 µm) aus dem flüssigen Prozessstrom entfernt. Die abgetrennten Feststoffe werden der Biogaserzeugung und/oder der Biokohleherstellung zugeführt. In der sich anschließenden Cross-Flow-Membranfiltration ③ wird der Prozessstrom weitgehend von noch vorhandenen Feststoffen entfrachtet. Dazu kann entweder eine Mikrofiltrationsmembran (durchschnittliche Porenweite 0,2 µm) oder eine Ultrafiltrationsmembran (durchschnittliche Porenweite 0,03 µm) eingesetzt werden. Das entstandene Retentat (feststoffreich) kann dem Prozessschritt der anaeroben Versäuerung ① und/oder der PHA-Stufe ⑥ zugeführt werden. Das membranfiltrierte Permeat (feststoffarm) wird zur P-Fällung ④ weiterverwendet. Durch Zugabe von Magnesiumchlorid (Mg²⁺-Quelle) zum Permeat und anschließender pH-Wert-Erhöhung auf ca. 8,5 mit Hilfe von Natronlauge kommt es zur Ausfällung des Phosphors als Struvit-reiche P-Rezyklate. Nach Sedimentation und Abtrennung der P-Rezyklate wird der verbleibenden Flüssigphase der Zeolith Klinoptilolith als Adsorptionsmittel für die N-K-Adsorption ⑤ zugegeben. Nach Ende der vorgegebenen Reaktionszeit wird der beladene Zeolith abgetrennt und die jetzt von Phosphor, Stickstoff und Kalium angereicherte – jedoch weiterhin mit organischen Säuren angereicherte – Flüssigphase der PHA-Stufe ⑥ zum Zweck der Polymererzeugung zugeführt.

2.2 Anaerobe Versäuerung Verfahrensschritt

Im verfahrenstechnischen Teil des RUN-Konzepts bestimmt die anaerobe Versäuerung von Schwarzwasser (Fäzes und Urin) und Küchen-/Bioabfall das Ergebnis der nachfolgenden Verfahrensschritte Nährstoffrückgewinnung und Biopolymererzeugung. Folglich ergibt sich u. a. die Fragestellung, welche Mischungsverhältnisse von Schwarzwasser und Küchen-/Bioabfall oder welche Reaktorbetriebsweise vorteilhaft sind. Einerseits für die Freisetzung von organisch gebundenem Phosphor zur Nährstoffrückgewinnung, andererseits für die Bildung spezifischer organischer Säuren zur Biokunststoffproduktion. Für den großtechnischen Betrieb ist auch zu klären, ob für den Reaktorbetrieb analytische Leitparameter ableitbar sind. Weiterhin ist für die Sicherstellung der Erhaltung der produzierten organischen Säuren eine wirksame Unterdrückung der Methanogenese im Reaktor erforderlich.

Als methodischer Untersuchungsansatz wurde die mesophile anaerobe Versäuerung mit Desintegration, Hydrolyse und Acidogenese von Schwarzwasser und Küchenabfall im halbtechnischen Batch- und Fed-Batch-Betrieb gewählt. Einen hohen Stellenwert besaßen dabei die Reproduzierbarkeit und Systematik der Experimente, z.B. wurde aufwändig ein Standard-Küchenabfall erzeugt.

Die Versäuerung im Batch-Betrieb erfolgte mit den eingestellten Mischungsverhältnissen von Schwarzwasser und Standard-Küchenabfall von 10 L zu 1 kg (2 Versuchs-Batches), 20 L zu 1 kg (3 Versuchs-Batches) und 30 L zu 1 kg (2 Versuchs-Batches). Dementsprechend betragen die Startfüllungen des Versäuerungsreaktors zwischen ca. 100 bis 110 L Schwarzwasser und ca. 3,5 bis 10 kg Standard-Küchenabfall. Die Temperierung des Reaktorinhalts erfolgte auf einen eingestellten SOLL-Wert von 40 °C (IST-Wert ca. 36 – 39 °C je nach Platzierung der Temperatursensoren im Reaktor). Der Abbruch des Batchbetriebs erfolgte stets nach einer Reaktionszeit von 168 h. Eine tägliche Beprobung des Reaktorinhalts erfolgte im Abstand von 24 h. Nach Abbruch der Versäuerung lag die mittlere Gesamtposphorkonzentration in der sauren Matrix bei ca. 107 mg/L (Stichprobenumfang n=7) mit einer potenziell zur P-Fällung zur Verfügung stehenden mittleren gelösten Phosphorkonzentration von ca. 80 mg/L (Stichprobenumfang n=7).

Mit dem bisher durchgeführten halbtechnischen Batch- und Fed-Batch-Betrieb konnte gezeigt werden, dass durch die mesophile Desintegration, Hydrolyse und Acidogenese von Schwarzwasser und Standard-Küchenabfall die gelöste Phosphorkonzentration in dieser Mischung signifikant gesteigert wird. Der Anteil des gelösten Phosphors, bezogen auf den gesamten Phosphor in der Mischung aus Schwarzwasser und Standard-Küchenabfall, erhöhte sich durchschnittlich von anfänglich 45 % auf 76 % (n = 7). Im Fed-Batch-Betrieb konnte durch die Wahl des Mischungsverhältnisses von Schwarzwasser und Standard-Küchenabfall die Methankonzentration im Abgasstrom konstant niedrig gehalten werden (< 15 %), was auf eine wirksame Methanogenese-Supprimierung hinweist.

3 Ausblick

Um die neue Technologie mit den Akteur*innen unter lebensnahen Bedingungen zu erproben, wird eine großtechnische Pilotanlage am Umwelt-Campus Birkenfeld der Hochschule Trier installiert. Der Betrieb der Pilotanlage wird intensiv wissenschaftlich begleitet, um weitere Erkenntnisse bezüglich des Skalenerhaltens und der Robustheit der RUN-Technologie zu erlangen. Neben der Optimierung des technischen Betriebs der Anlage wird auch ihre Nachhaltigkeit in Bezug auf Umweltrelevanz (Ökobilanz) und Wirtschaftlichkeit bewertet. Die Pilotanlage befindet sich aktuell im Bau und wird voraussichtlich Ende Januar 2024 fertiggestellt und in Betrieb genommen. Gemeinsam mit der Installation eines Informations- und Erfahrungsraums für öffentliche/n Wissenstransfer und Diskussion wird RUN zu einem sogenannten Reallabor.

Danksagung

Das Projekt RUN wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenprogramm „Forschung für nachhaltige Entwicklung“ (FONA3) unter dem Förderprogramm „Agrarsysteme der Zukunft“ mit 5.951.784 Euro über 5 Jahre gefördert.

Kontakt

Volker Preyl, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Universität Stuttgart / Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA)

Tel.-Nr.: +49 711 685 63702

E-Mail: volker.preyl@iswa.uni-stuttgart.de

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

Homepage Projekt RUN: <https://www.run-projekt.de/>

A Vision-Based Trash Particle Classification System for Sorting Facilities

Abstract: *In recycling, it is still mandatory to deploy human workers for waste sorting on the conveyor belt to guarantee the high purity of the sorted material and to be able to cope with changing material streams. In this paper, we present a vision-based classification system that can track, identify, and classify objects using only cameras operating in the visible light spectrum. Our results showcase a system that learns only using a small dataset of labelled images of plastics on the conveyor belt and achieves competitive performance in object detection and classification for the initial deployment of the system in the sorting facility. This approach requires the labelled dataset to be representative of the material flow. Our results indicate competitive accuracy in the ranges 67%-84% and 71%-82%, achieved using, respectively, only 20 and 40 training samples. To achieve this, we have leveraged transfer learning and few-shot learning techniques on synthetically generated images for object detection, and on a small, labelled dataset for object classification.*

1 Introduction

The development level in the context of recycling and, thus, the operational performance of waste processing plants differs significantly at national levels within the European Union. However, the current mode of operation relies heavily on manual sorters in the final stage of sorting plants. The sorting workers pick and separate objects from a conveyor belt trash flow to ensure the purity of the sorted material. Our primary focus in the RecAlcle project is to design a vision-based system that supports these manual sorters in their crucial work while also learning from their expertise [9]. Recycling trash, particularly plastics, presents significant challenges to computer vision systems. Furthermore, the composition of trash can vary regionally, seasonally and at special events, like Halloween. Although previous steps in the recycling process contribute to a more homogeneous trash flow, similar products reaching the sorting worker may appear drastically different from the outside. Therefore, leveraging the knowledge and experience of manual sorters may prove to be vital for the success and performance of automatic trash particle classification systems.

The concept of vision-based object detection and classification, or categorization, has revolutionized various fields, driven by the remarkable accuracy achieved by Convolutional Neural Network (CNN) models. These models are deeply rooted in the domains of Machine Learning (ML) and Deep Learning (DL) and have demonstrated exceptional capabilities when trained on big data sets [3]. These datasets typically comprise a vast array of images, labeled with bounding boxes, and categorized into distinct classes, such as "PET". However, a significant challenge arises when it comes to recycling trash particles. Unlike some domains

with readily available „big“ datasets, recycling trash lacks such big, comprehensive, and well-annotated resources. This scarcity of data presents a challenge for vision-based systems.

The transfer learning concept has gained considerable attention in the field of Deep Learning. It involves an additional training phase, where a „big pre-trained“ model is fine-tuned on a new task [5]. Transfer learning has proven to be very effective. However, the effectiveness of transfer learning depends significantly on the size and quality of the transfer-learning dataset, that is, the dataset used for the new task. Recent research has shed light on a particularly promising aspect of transfer learning. CNN models pre-trained on huge datasets have shown remarkable potential when applied to small and tiny transfer-learning datasets, sometimes consisting of just 1 to 10 images per object class. This cutting-edge technique, often referred to as few-shot transfer learning [5], has opened exciting possibilities for various applications, including ours, which is focused on recycling trash particle detection and classification.

Our work has focused on benchmarking transfer and few-shot learning of different CNN models to achieve recycling trash particle detection and classification, with the objective of achieving an initial system that can be deployed at the recycling sorting plant. The novelty of this work lies on the utilization of modern Deep Learning techniques and our focus on the usage of small training datasets and on the benchmarking of the number of shots, or images, required for learning the trash particle detection and classification tasks. We present our methodology and experimental results for object detection and classification in Secs. 2.1 and 2.2 respectively.

2 Methodology and Experimental Results

Our vision-based trash particle classification system consists of two main modules. The first module focuses on object detection, specifically in the detection of trash particles on conveyor belts. The second module is a vision-based classifier, which identifies the type of material of the trash particle. For the training, testing and validation of both modules we use combinations of three datasets: a synthetically generated dataset, the publicly available TrashNet dataset [6] and our own dataset, named DWRL dataset, acquired at the DIGITAL Waste Research Lab (DWRL) of the Montanuniversitaet Leoben [8]. Research performed at the DWRL laboratory focuses on particle-, sensor- and data-based waste and recycling technology. In the DWRL dataset, a camera captures images or videos of trash particles on the moving conveyor belt, by imaging its complete width and using a front-to-parallel view of the belt. The resolution of the camera is such that bottle caps are visible, with enough pixels to potentially be classifiable by the developed system.

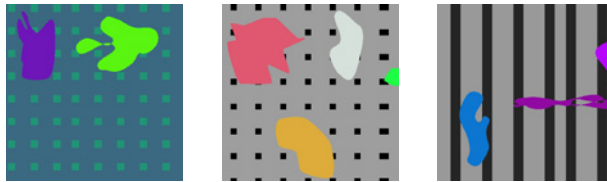
For object detection (Sec. 2.1), we implemented a pre-trained model, which we fine-tuned using synthetically generated images by means of transfer-learning and performed a qualitative evaluation on the DWRL dataset. For trash particle classification (Sec. 2.2), we implemented a pre-trained model, which we fine tune using transfer-learning, and performed evaluations on the TrashNet dataset [6] and on the DWRL dataset. Thanks to its smaller size, the DWRL dataset was adequately separated into proper training and testing samples within a reasonable time. For the TrashNet dataset, due to its bigger size, random sampling without repetition was utilized.

2.1 Object Detection

	Anteil der Rostasche nach Aufbereitung	Anteil der Bettasche nach Aufbereitung
Mineralikfraktion 0-8 mm	67,9%	33,6%
Glasfraktion >9 mm	-	35,0%
Metallreiche Fraktionen	21,2%	26,3%
Fraktionen zur Beseitigung	11,0%	5,1%
Summe	100%	100%

The object detection phase is a crucial component of our methodology, serving as a precursor to the classification process and aiding in the identification of diverse items on the conveyor belt. Utilizing the Single Shot MultiBox Detector (SSD) framework proposed by Liu et al. [1], our model demonstrates proficiency object detection and localization.

Training Dataset. We generated an artificial dataset, named synthetic dataset, to enhance the model's adaptability to the nuanced challenges posed by trash detection. Consisting of 4000 images, this synthetic dataset features mono-colored trash objects of random shapes on a conveyor belt with a repeating pattern. The introduction of randomness in color, size, and patterns, along with precisely known object positions, facilitated the creation of a comprehensive dataset complete with corresponding bounding box labels.



Samples from synthetic dataset. The images showcase examples from our synthetic dataset, featuring mono-colored trash objects of random shapes on a conveyor belt with a recurring pattern. Each image has corresponding bounding box annotations in the label set.

The decision to generate an artificial dataset arises from the inherent difficulty associated with the manual labeling of bounding boxes, a labor-intensive task for humans. Recognizing this challenge, we aimed to ease the burden by automating the generation of labeled data through a carefully orchestrated synthetic dataset. This approach not only streamlines the training process but also ensures the availability of a well-annotated dataset, crucial for effective model training. Moreover, the introduction of randomness in the shapes of trash objects in our synthetic dataset mirrors the real-world variability encountered on conveyor belts. Trash particles inherently exhibit diverse and irregular shapes, and our artificial dataset aims to capture this variability realistically. By mimicking the randomness observed in actual waste streams, we aim to equip our model with the adaptability required to effectively detect trash items in real-world applications, underscoring the robustness of our training approach.

Methodology. In search of a robust training dataset for the object detection model, we adopted a multifaceted strategy. Initially, we initiated the model's training with pretraining using weights from the Microsoft COCO

dataset by Lin et al. [2]. This foundational pretraining equips the model with the ability to recognize common objects across varied contexts. The subsequent fine-tuning process in the synthetic dataset of the SSD model involved fine tuning the last four layers, initially initialized randomly, with a specific focus on detecting the singular class of interest—objects. After fine-tuning the last layers, we trained all layers of the model. Training was executed on an RTX6000.

Experimental Results. The validation was achieved through the application of our trained model on the DWRL dataset, where we kept the objects with a confidence score above 0.5. These are video sequences, acquired at the DWRL, of trash particles circulating through the conveyor belt. For our qualitative evaluation, the video sequences are processed and automatically visually annotated using our model with the bounding boxes of the detected trash particles. We qualitatively evaluated performance through a careful visual analysis of the bounding boxes in the video sequences. All objects were successfully and consistently detected during their passage in front of the camera. However, while the bounding boxes are often qualitatively correct, they are also often partial, covering only part of the trash particle. For this reason, in the DWRL dataset used for object classification (Sec. 2.2), we included both good qualitatively correct bounding boxes, as well as partial ones.

2.2 Object Classification

Instead of working with large datasets of labelled images of the trash recycling material flow, in this study, we leverage the power of transfer learning and few-shot learning for trash particle classification. Specifically, we benchmark the accuracy of our image-based classification model with respect to the number of labeled samples in small training datasets, consisting of images of trash particles.

Datasets. Two distinct datasets were employed for our experiments, the publicly available TrashNet dataset [6] and our DWRL dataset. Below, we show images of both datasets, as well as tables indicating the number of training and test samples on each dataset. The DWRL dataset exclusively contains image detections from our object detection system, which as shown, includes complete and partial detections of the trash particles. The DWRL dataset was manually labelled, and includes a carefully separated test set, with exclusively different objects for the train and test sets. For TrashNet, the test set was separated by random sampling without repetition, due to the higher number of images. Partial views or different view angles of the same object can be included in the train and test sets. This is reasonable for the recycling use case, for instance, a given bottle brand can appear repeatedly in the recycling material flow.

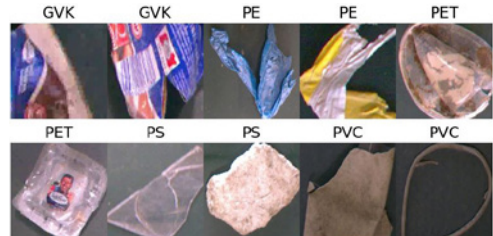
Methodology. We utilize a pre-trained MobileNet model [7], initially pre-trained on the ImageNet dataset [3]. The convolutional layers of MobileNet were frozen to retain the valuable pre-trained weights for feature extraction. For transfer-learning [4], the last layers of the network are re-trained for the trash particle classification task. We provide results for, both, Transfer Learning (TL) using the full training sets, and, few-shot learning, similarly to [5], using equal amounts of training images per trash particle type.

Material type	train	test
Cardboard	323	80
Glass	401	100
Metal	328	82
Paper	476	118
Plastic	386	96



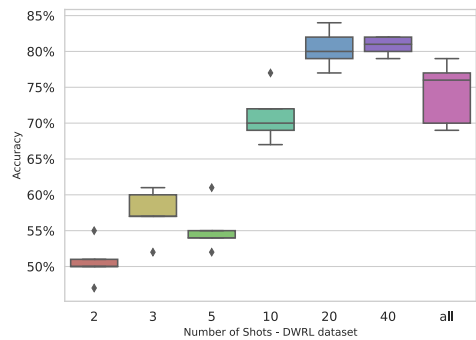
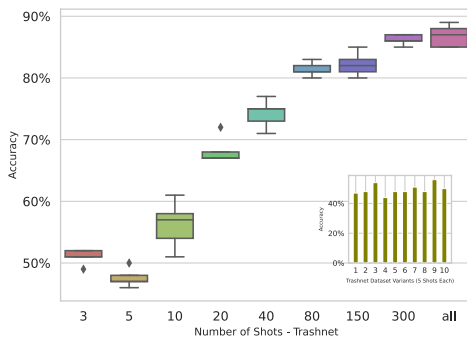
Samples from the TrashNet dataset [6], showing contained trash types, and table description with number of train and test samples.

Plastic type	train	test
GV	40	10
PE	80	20
PET	80	20
PS	80	20
PV	40	10



Samples from the DWRL dataset [6], showing contained plastic types, and table description with number of train and test samples.

Experimental Setup. The experiments conducted on both datasets involved varying the number of images (shots) per class, ranging from 3 to the entire dataset, to investigate the model's performance under different few-shot scenarios and the transfer learning scenario. Results for different few-shot scenarios were obtained, specifically (few-shot learning) 2, 3, 5, 10, 20, 40, 80, 150, 300 equal numbers of images per trash particle type, and (transfer learning) using the entire dataset, with the number of images specified in dataset tables. To get a better performance evaluation from our experiments, each training scenario was executed five times, so that the resulting accuracy distributions can be studied.



Trash particle classification accuracy, model trained with increasing numbers of images, (2, 3...) few-shot and (all) transfer learning.

Experimental Results. Our performance assessments in trash particle classification using the two datasets are shown by means of box plots (left) for the publicly available Trashnet, and (right) for our DWRL dataset. Gradual improvement in accuracy was observed with an increasing number of training samples. For small number of training samples, for instance 3 and 5, the achieved classification accuracy is 45% to 55%, which is above the random guess accuracy of 20% for a 5-class classification problem. Competitive accuracy of 67%-84% and 71%-82%, depending on the dataset, are achieved using only 20 and 40 training samples per class. For the DWRL dataset, using all training samples achieves less accuracy than using a balanced training dataset with 40 samples per plastic type. It is interesting how the accuracy in each dataset is similar for equal amounts of training images in our few-shot learning experiments. Therefore, our performance assessments using the TrashNet dataset indicate that the classification accuracy plateaus in the 85-90% range for sets of training images with 300-500 samples. Further accuracy improvements may require much bigger training datasets, which motivates future research on continual learning, so that the system achieves adaptation to the ongoing material flow.

To assess the impact of varying the training image set, instead of the number of training images, we conducted additional experiments using 10 different 5-shot datasets, sampled randomly from the entire training sets of each dataset. The accuracy results, shown in the bar plot graph inside the left box plots figure demonstrate consistent accuracy across the 10 different 5-shot scenarios, with minimal fluctuations. This seems to indicate a certain level of robustness of the classifier, with respect to the utilized training samples.

3 Conclusions

The primary objective of this study was to evaluate whether small, labeled datasets allow to classify trash particles in plastic recycling in sorting facilities. The vision-based trash particle classification problem has been divided into two main tasks, object detection and trash particle classification. For both tasks we have tested modern Computer Vision techniques, specifically Transfer Learning and Few-Shot Learning. For object detection, we have implemented an automatic artificial image generation method for the detection of objects on conveyor belts and trained our model on its generated images. For trash particle classification, we have acquired the small DWRL dataset, extracted objects from the images using our so-trained object detection method, and labelled a small dataset from the resulting object detections. To better assess the quality of our trash particle classification method, we have additionally evaluated it on a bigger and more standard publicly available recycling dataset, the TrashNet dataset.

Our experiments collectively provide compelling evidence for the effectiveness of few-shot and transfer learning in the context of trash particle classification for recycling sorting facilities. We demonstrate how competitive trash particle detection and classification models can be trained using small sets of labelled images. Our results indicate competitive accuracy in the ranges 67%-84% and 71%-82%, achieved using, respectively, only 20 and 40 training samples, and accuracies of 85-90% for 300-500 training image samples. At around 150-300 images, the accuracy seems to be plateauing, and further gains in accuracy will require increasingly higher numbers of images. Therefore, our methodology offers a practical alternative to the challenges of collecting large datasets in real-world scenarios. Our models for trash particle detection and classification, trained by means of transfer and few-shot learning using small datasets with 40 labelled images, achieve a prototype system, which can be used for the first deployment in recycling sorting plants. As future work, we plan to test our developed system in a setting similar to its implementation in a sorting

facility, and analyze the challenges faced at its first use and during long-term utilization, as once deployed, the system will be required to learn and adapt to the variations in the trash flow over time. On the one hand, we are interested in testing the accuracy of the object detection and classification methods over time and analyze whether the accuracy of the systems plateaus at a certain level, or whether the accuracy continues to gradually increase. On the other hand, as part of the RecAlcle project, we are interested in testing the capabilities of the system to support the sorting worker and reduce the amount of strain experienced during the execution of the sorting task.

Acknowledgements

This work has been supported by the by the Austrian Research Promotion Agency FFG, as follows: (1) funding for the work through the AI for Green 2021 (KP) program, through the project RecAlcle, Contract No. 4352943, and (2) support through the FFG-COMET-K1 Center "Pro²Future" (Products and Production Systems of the Future), Contract No. 881844.

References

- [1] Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.-Y., & Berg, A.C. (2016). SSD: Single Shot MultiBox Detector. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 21–37). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-46448-0_2
- [2] Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., Bourdev, L., Girshick, R., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Zitnick, C. L., & Dollár, P. (2015). Microsoft COCO: Common Objects in Context. *arXiv preprint arXiv:1405.0312*.
- [3] Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Hinton, G.E., (2017). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, 60(6), pp.84-90.
- [4] Kumsetty, N.V., Nekkare, A.B. and Kamath, S., (2022), April. Trashbox: Trash detection and classification using quantum transfer learning. In *2022 31st Conference of Open Innovations Association (FRUCT)* (pp. 125-130). IEEE.
- [5] Entezari, R., Wortsman, M., Saukh, O., Shariatnia, M. M., Sedghi, H., & Schmidt, L. (2023). The Role of Pre-training Data in Transfer Learning. *arXiv preprint arXiv:2302.13602*.
- [6] Yang, M., & Thung, G. (2016). Classification of trash for recyclability status. CS229 project report, 2016(1), 3.
- [7] Wu, T.W., Zhang, H., Peng, W., Lü, F. and He, P.J., (2023). Applications of convolutional neural networks for intelligent waste identification and recycling: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 190, p.106813.
- [8] Kandlbauer, L., Sarc, R. & Pomberger, R. Großtechnische experimentelle Forschung im Digital Waste Research Lab und Digitale Abfallanalytik und -behandlung. *Österr Wasser- und Abfallw* (2023). <https://doi.org/10.1007/s00506-023-00999-1>
DIGITAL Waste Research LAB (DWRL), Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Department of Environmental and Energy Process Engineering, Montanuniversitaet Leoben, Austria. Official Laboratory opening: 10/24/2023. Website: https://www.avaw-unileoben.at/en/forschung-geraete_und_technikum-digital_waste_research_lab/

- [9] Aberger, J., Khodier, K., & Sarc, R. (2023). Digitalisierung der Handsortierung durch Künstliche Intelligenz, Machine Learning und Human Machine Interaction. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 1-7.

Contact

Somayeh Shami, Researcher

Jesus Pestana

Michael Krisper

Pro2Future GmbH, Graz, Austria

Tel.-Nr. +43-316-873-9152

E-Mail: somayeh.shami@pro2future.at

Homepage: <https://www.pro2future.at>

Benedikt Haecker, Researcher

Bernhard Prangl

Siemens Aktiengesellschaft Österreich

Tel.-Nr. +43-681-81686094

E-Mail: benedikt.haecker@siemens.com

Homepage: <https://www.siemens.com>

Julian Aberger, Researcher

Montanuniversitaet Leoben, *Chair of Waste Processing Technology and Waste Management, Leoben, Austria*

Tel.-Nr. +43 3842 402-5123

E-Mail: julian.aberger@unileoben.ac.at

Homepage: www.avaw-unileoben.at

TEIL 2

Kreislaufwirtschaft II

Leitung: Prof. Dr.-Ing. Anke Bockreis

Investigation of Different Mechanical Methods for Photovoltaic Module Recycling

Abstract: *This study compares mechanical methods for recycling glass-backsheet photovoltaic (PV) modules: milling, vibration-assisted knife cutting and peeling. Significant improvements in milling achieved larger backsheet chip sizes with reduced energy consumption. Vibration-assisted knife cutting showed promises for cell sheet removal but presented notable tool wear. Peeling excelled in backsheet removal but solutions regarding peeler fixation must be found. Each method demonstrates considerable potential for PV module recycling, prompting further exploration. Recommendations include investigating sensor-integrated milling, peeling for altered modules, diverse heating methods for peeling and optimization of peeling fixation. This study contributes valuable insights towards advancing sustainable practices in the rapidly evolving field of PV module recycling.*

1 Introduction

With solar energy gaining more and more importance, it is projected that the cumulative mass of end-of-life PV modules in 2050 will range from 60 to 78 million tons according to a report jointly published by the International Renewable Energy Agency (IRENA) and the IEA Photovoltaic Power Systems Program (IEA-PVPS) (IRENA et al., 2016). Efficient recycling management is imperative for the management of these waste volumes. PV modules, designed as multi-layer structures to withstand up to 30 years of environmental stressors, present a challenge when it comes to layer-by-layer recycling. Nonetheless, achieving a holistic recycling approach is highly desirable. This aspiration underlies the objective of the Austrian research project PVReValue. By recycling PV modules valuable materials including metals and glass can be recovered. The solar module recycling industry, however, is still in its early stages of large-scale development. The most frequently used methods include mechanical, chemical and thermal delamination (Czajkowski et al., 2023). PV modules can be broadly categorized as glass-backsheet and glass-glass modules. This study specifically concentrated on investigating the delamination of glass-backsheet modules. Small modules were used as test modules, their structure comprised glass, ethylene-vinyl acetate (EVA), cell layer, EVA and ICOSOLAR® PPF backsheet and can be seen in figure 1. This study aims to compare different mechanical methods for recycling glass-backsheet photovoltaic modules. The mechanical methods under scrutiny encompass milling, vibration-assisted knife cutting, and peeling.

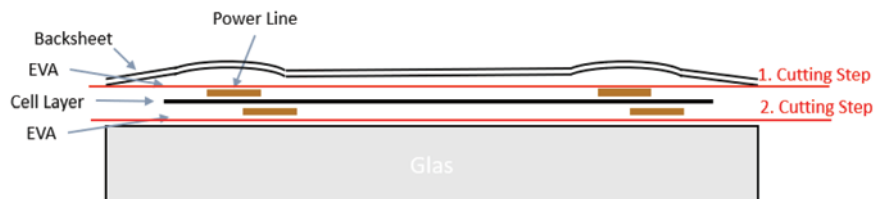


Figure 1: PV module structure and cutting step visualization.

2 Investigated Mechanical Methods for PV Module Recycling

2.1 Milling

Concerning the recycling of photovoltaic (PV) modules, the two-step milling process involves a sequential detachment of different layers within the module. As seen in figure 1, in the initial step, the backsheet and a portion of the ethylene-vinyl acetate (EVA) are removed. Subsequently, in the second step, the residual layers - comprising the remaining EVA, the cell sheet, and the second layer of EVA - are extracted, leaving the glass layer intact. For the two-step milling process, a computerized numerical control (CNC) milling machine was used. The PV modules were fixated during machining through vacuum clamping. This involved positioning the modules in such a way that the glass layer faced the vacuum clamping system, while the backsheet was oriented towards the milling tool. The for testing varied parameters comprised the tool diameter, the number of teeth of the milling tool, the rotational speed of the milling tool, the feed per tooth, the feed rate, the cutting speed, the axial cutting depth, the radial cutting depth and the pathway (Ottitsch et al., 2023).

Several studies (Duflou et al., 2018, Noda et al., 2014., Shinryo Corporation, 2016, Komoto, 2016, Fiandra et al., 2019, Bilbao et al., 2021) either incorporated or briefly mentioned milling as a step in the recycling process for backsheet removal, however, it is noteworthy that only Dobra et al. (2022) provided a detailed account of the milling process. In comparison to the preceding study by Dobra et al., this research achieved a significant enhancement in the chip size of the recovered backsheet, reaching a length conducive to further recycling. This improvement was achieved while decreasing rotational speed, thereby conserving energy. Furthermore, a, for industrial goals, sufficient feed rate was used and an optimal machining strategy, a meandering operation parallel to the wires of the module, was identified enabling the removal of the copper wires as a whole. For backsheet removal the double-edged milling cutters with a wedge angle of approximately and a rake angle of approximately performed best. It was noted that if rotational speed and feed rate were too low, the milling operation became challenging, and residual backsheet material persisted on the module. For cell sheet removal the milling cutters with a wedge angle of approximately, a rake angle of approximately and 4 teeth performed best. It was not observed that the varied parameters had an influence on the chip size of the cell sheet (Ottitsch, 2023). Contrary to the findings of Duflou et al. (2018), this study found tool wear to be insignificant.

2.2 Peeling

Peeling experiments were performed similar to DIN EN 1372 (DIN EN 1372, 2015) utilizing a tensile testing machine (Zwick Z100). A plier, serving as a peeler, was securely clamped to the backsheet layer and affixed to the machine's guide to ensure precise and controlled motion. To prepare the PV modules for peeling tests, 15 mm wide strips were pre-cut using a Stanley knife. Subsequently, the tips of these strips were lifted using a Multi Tool to facilitate later clamping by the plier. During testing the PV modules were clamped and temperature was applied by a heat gun. The heat gun was continuously guided during tests to heat the EVA-layer between backsheet and cell-sheet to approximately 80 °C. Temperature measurements during experiments were conducted by placing the tip of the surface temperature probe directly onto the EVA, positioned 10 mm away from the peeling point. The velocity of the tensile testing machine was varied and the needed peeling force was recorded throughout all tests. To explore the influence of velocity on the peeling process, the velocity of the tensile testing machine was systematically varied. Throughout all tests, the requisite peeling force was recorded to analyze the relationship between peeling force and varying velocities.

Peeling was analyzed by Kim et al. (2019) and Wang et al. (2019b), who investigated the effect of temperature on the peeling process, Krauter et al. (2011) looked into the peeling force needed to detach EVA from the glass-layer. This study specifically focused on the impact of peeling velocity and angle. Peeling showed optimal detachment results for separating the backsheet layer from the residual PV module. The backsheet layer was able to be recovered while removing little to no EVA. The method performed optimally when detaching sections of the backsheet containing a cell layer underneath. Challenges arose in cell gap areas. Despite difficulties noted, Wang et al. manually peeled the complete backsheet layer by heating the module to 150 °C (2019b). In this study, the needed peeling force increased with the peeling velocity, at a peeling force of was necessary, at a peeling force of was needed. In contrast, Krauter et al. (2011) measured the needed peeling force at a peeling angle of 90° to be between and , but Krauter et al. did not mention using heating, therefore this difference in needed peeling force is most likely temperature related. In this study, the needed peeling force increased with the peeling velocity. In this study, was the maximum velocity at which removal performed well, above at an EVA temperature of 80 °C peeling showed insufficient results. Out of the tested peeling angles ranging from 63 ° to 102 °, it was observed that lower peeling angles resulted in a lower needed peeling force. Furthermore, as backsheets degrade over time in the field, this may lead to less cohesion within the backsheet and cracking could occur during the peeling process. Therefore, further experiments testing this method on different backsheet materials and on altered PV modules must be carried out. Other heating methods should be employed since using the heat gun led to cracking of the glass due to the uneven temperature appliance. Solutions regarding optimizing the fixation of the backsheet layer to the pulling machine must be found.

2.3 Vibration-assisted Knife Cutting

Vibration-assisted knife cutting was executed using a purpose-built configuration integrated into the CNC milling machine described previously. This setup firmly attached a Multi Tool to the machine, ensuring precise guidance during the cutting process. Vacuum clamping was employed as the preferred fixation method to securely anchor the PV modules throughout the experiments. The exploration of this method involved the manipulation of several key parameters, including the feed rate , the setting angle between the Multi Tool knife and the PV module, and the oscillation rate of the vibrating blade.

Few studies have been carried out on vibration-assisted knife cutting, Ercole (2016) investigated a system composed of vibrational knife cutting and a roller mill at temperatures ranging from 90 to 120 °C to detach the glass layer, however his results led to glass cullets. This study aimed to analyze vibration-assisted knife cutting, striving to achieve detachment with minimal damage to the glass layer under room temperature conditions. The investigation included testing various vibrational frequencies and exploring different setting angles to optimize the cutting process. The setting angle between the blade of the Multi Tool and the PV module was investigated, the setting angles tested ranged from 8 to 18 °. It was observed that the larger angles performed better, possibly because they enabled easier knife insertion and hindered gliding of the knife. Feed rates ranging from to were investigated. Feed rates generally did not influence the results strongly, however slower feed rates led to better knife insertion which ultimately favored cell sheet removal. The oscillation rate of the blade showed the strongest influence on cell sheet removal, the used Multi Tool performed best at the machine's highest oscillation rate setting (6) oscillating 20,000 times per minute, which is commonly used for cutting harder materials like metals or wood. Cell sheet removal was more challenging at the oscillation rate setting (4) oscillating at 18,000 times per minute and lower, this setting is often used for cutting softer materials like plastics (Bosch, 2022).

The different tested methods are compared in Fig. 1. Peeling and knife cutting detached layers in large pieces whereas milling generated small chips.

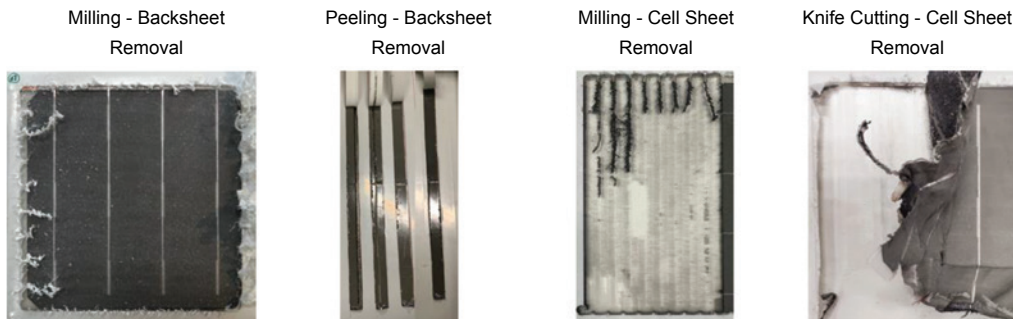


Figure 2: Comparison of the investigated methods: milling, peeling and vibration-assisted knife cutting.

3 Conclusion

While milling generated small chips, peeling and knife cutting detached layers in large pieces. Peeling excelled in backsheet removal, while vibration-assisted knife cutting showed promises for cell sheet removal, albeit with significant tool wear. Milling demonstrated efficacy for both layers but faced challenges in backsheet removal due to irregular layer height, resulting in additional EVA removal during backsheet removal. This challenge is less significant to peeling, where the peelers force acts at the weakest bond. This study underscores the potential of all investigated strategies for PV module recycling, emphasizing the need for further research in sensor-integrated milling, peeling for altered modules, diverse heating methods, optimization of peeling fixation, precise knife insertion, and blade tool wear solutions.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the Austrian Research Promotion Agency (FFG) for providing funding for the PVReValue project (FFG-Nr.: 897767) through the 2nd call of the FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft at TU Wien.

References

- Bilbao, J., Heath, G., Norgren, A., Lunardi, M., Carpenter, A., Corkish, R. (2021). PV Module Design for Recycling Guidelines 2021. International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-23, ISBN 978-3-907281-27-7.
- Bosch. (2022). PMF 250 CES. Available online: <https://media3.bsh-group.com/Documents/0603102100-PMF-250-CES-de-AT-o393157v21-160992A84G-202207.pdf>
- Czajkowski, A., Wajda, A., Poranek, N., Bhadoria, S., Remiorz, L. (2023). Prediction of the Market of End-of-Life Photovoltaic Panels in the Context of Common EU Management System. *Energies*, 16: 284, 2023, doi: 10.3390/en16010284
- DIN EN 1372. (2015). Klebstoffe - Prüfverfahren für Klebstoffe für Boden- und Wandbeläge – Schälversuch, Deutsche Fassung EN 1372:2015, Beuth Verlag GmbH.
- Dobra, T., Thajer, F., Wiesinger, G., Vollprecht, D., & Pomberger, R. (2022). Selective delamination by milling as a first step in the recycling of photovoltaic modules. *Environmental technology*, 43, [2061380]. <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2061380>
- Dufloy, J., Peeters, J., Altamirano, D., Bracquene E., Dewulf, W. (2018). Demanufacturing Photovoltaic Panels: Comparison of End-of-Life Treatment Strategies for Improved Resource Recovery. *CIRP Annals*, vol. 67, no. 1: 29-32.
- Ercole, P. (2016): FRELP 2 Project - Full Recovery End of Life Photovoltaic. 32nd EU-PVSEC, Munich, Germany, June.
- Fiandra, V., Sannino, L. Andreozzi, C. Corcelli F., Graditi, G. (2019). Silicon Photovoltaic Modules at End-of-Life: Removal of Polymeric Layers and Separation of Materials. *Waste Management*, vol. 87, no. March: 97-107.
- IRENA, IEA-PVPS. (2016). End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels; Technical Report; IRENA: Masdar City, Abu Dhabi; IEA-PVPS: Bern, Switzerland; Available online: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels> (accessed on 10 October 2023).
- Kim, J.-H., Lee, J.-K., Ahn, Y.-S., Yeo, J.-G., Lee, J.-S., Kang, G.-H., & Cho, C.-H. (2019). Peeling Behavior of Backsheet according to Surface Temperature of Photovoltaic Module. *Korean Journal of Materials Research*. The Materials Research Society of Korea. <https://doi.org/10.3740/mrsk.2019.29.11.703>
- Komoto, K. (2016). Approaches to PV Waste Management in Japan. Workshop on PV End-of-Life management: Challenges and Opportunities, EU-PVSEC (https://www.photovoltaic-conference.com/images/2016/2_Programme/parallel_events/PvProductionQualityInnovation/Keiichi_KOMOTO.pdf), Munich.
- Krauter, S., Péridon, R., Lippke, B., Hanusch, M., Grunow, P. (2011). PV Module Lamination Durability. 2. 10.18086/swc.2011.14.10.
- Noda, M., Kushiya, K., Saito, H., Komoto, K., and Matsumoto, T. (2014). Development of the PV Recycling System for Various Kinds of PV Modules. 6th WCPEC, Kyoto, Japan.

Ottitsch, J., Thin, M., Wiesinger, G., Bleicher, F. (2023). Optimization of Mill Cutting Parameters for the Two-Step Milling Process in Photovoltaic Module Recycling. 39th Danubia-Adria Symp. Adv. Exp. Mech., Siofok 2023, 76-77, ISBN: 978-963-421-927-9.

Shinryo Corporation. (2016). Development of low-cost recycling technology for various kinds of PV modules. FY2015 NEDO debriefing session, Oct.

Wang, R., Song, E., Zhang, C., Zhuang, X., Ma, E., Bai, J., Yuan, W., & Wang, J. (2019b). Pyrolysis-based separation mechanism for waste crystalline silicon photovoltaic modules by a two-stage heating treatment. RSC Advances, 9(32): 18115–18123. <https://doi.org/10.1039/C9RA03582F>

Contact

Dipl.-Ing., Josefina Maria Ottitsch, wissenschaftliche/r MitarbeiterIn

Technische Universität Wien / Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien

Tel.-Nr. +43 1 58801 311798

E-Mail: ottitsch@ift.at

Homepage: www.ift.at

Entwicklung einer Entscheidungsmethodik für die zirkuläre Produktgestaltung

Abstract: Für eine erfolgreiche Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in Unternehmen müssen bereits in frühen Phasen der Produktentwicklung neben dem kreislaforientierten und zirkulären Design von Produkten und Dienstleistungen auch passende Geschäftsmodelle mitgedacht werden. Heute geschieht dies, aufgrund mangelnder anwendernaher Lösungen in der Praxis, für viele grundsätzliche Festlegungen unzureichend. Um diese Forschungslücke zu schließen, wurde eine Vorgehensweise zur Entscheidungsunterstützung konzipiert, mit der zu Produkt- und Geschäftsmodellcharakteristika passende Design- und Gestaltungsgrundsätze für Produkte früh identifiziert und sicher zugewiesen werden können. Diese Vorgehensweise wurde für eine praxistaugliche und entwicklungsbegleitende Anwendung in ein digitales Werkzeug überführt. Der folgende Beitrag skizziert die Entwicklungsschritte dieser Anwendung und zeigt, wie zukünftig in Unternehmen kreislauffähige und zirkuläre Produkte einfach und zielsicher entwickelt werden können. Die Entscheidungsmethode ermöglicht den an Produktentwicklungen beteiligten Akteurinnen und Akteuren eine einfache und systematische Berücksichtigung kreislaufwirtschaftlicher und umweltrelevanter Informationen.

1 Einleitung

Die Anforderungen an die Zirkularität von Produkten steigen derzeit nicht nur aus Umweltsicht, sondern auch durch gesetzliche Rahmenbedingungen und Normen wie beispielsweise der EU-Ecodesign-Richtlinie (European Commission 2022). Daher müssen Unternehmen praxistaugliche Zirkularitätsmaßnahmen identifizieren und umsetzen. Die Identifikation solcher Maßnahmen und deren konkrete betriebliche Umsetzung wurden im Rahmen des durch das deutsche Bundeswirtschaftsministerium (BMWK) geförderten Forschungsvorhabens „DfC-Industry“¹ entwickelt, das auf die Entwicklung digitaler Lösungen zum Entwurf ressourceneffizienter Produkte für die Circular Economy abzielt. Die Herausforderung liegt in der umsetzungsorientierten Bereitstellung von Lösungsansätzen, die für ein breites Produktspektrum anwendbar sind und über die bekannten checklistenbasierten Ansätze und Ökobilanzsoftware-Add-ons für die Integration in bestehende CAD-Software hinausgehen (Tura et al 2019). Diese geben dem Anwender zwar Impulse, setzen im Produktentstehungsprozess (PEP) jedoch oft zu spät an. Auch sind sie aufgrund

¹ 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“ mit einer 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.

des niedrigen Konkretisierungsgrads aus Sicht vieler Produktentwickler wenig hilfreich. Mithilfe einer literatur- und expertenbasierten Entscheidungsunterstützung sowie dem Transfer in ein digitales Tool sollte daher ein anwenderorientiertes Instrument geschaffen werden, das die Mängel bestehender Lösungen überwindet und die zirkuläre Gestaltung zukünftiger Produkte sicherstellt.

2 Forschungskontext und Methodenentwicklung

2.1 Entscheidungsunterstützung für ein „Design for Circularity“

Der aktuelle Diskurs zur „Circular Economy“ wurde mittels umfassender Literaturanalysen systematisch aufbereitet. Die zugrunde liegende Annahme dieser Untersuchung war, dass die Fähigkeit eines Produkts, in Kreisläufen genutzt zu werden, nicht ausschließlich von seinen inhärenten Merkmalen abhängt. Zusätzliche Einflussfaktoren wie z. B. die Nutzungsumstände, produktbezogene Geschäftsmodelle, Reparatur- oder Leasingoptionen sind relevant. Die Operationalisierung des Design for Circularity im PEP ist aufgrund der Vielzahl von Dimensionen und Handlungsebenen komplex. Um diese Komplexität zu beherrschen, können Entscheidungsmatrizen und -bäume die Akteure im PEP unterstützen (Pruhs et al. 2023). Daher wurde ein solcher Entscheidungsbaum entwickelt.

Zunächst wurden dafür aus den Resultaten der Literaturanalyse drei Dimensionen der Kreislaufwirtschaft ausgewählt, die später als Basis für die Entwicklung von Entscheidungsmatrizen dienen sollten:

1. **CBM** = Circular Business Models: Zirkuläre Geschäftsmodelle und Strategien
2. **LCI** = Life Cycle Intensity: Klassifizierung der Haupt-Umweltwirkung eines Produktes. Diese Umweltwirkung wird auf Basis einer Ökobilanzuntersuchung (LCA/Life Cycle Assessment) identifiziert und einer spezifischen Lebenszyklusphase zugewiesen (Wimmer und Züst 2001)
3. **EDA** = Ecodesign Anforderungen: Richtlinien wie z. B. die der EU-Richtlinie 2009/125/EC zur Produktgestaltung (European Commission 2022)

Die aus jeweils zwei dieser drei Dimensionen gebildeten Entscheidungsmatrizen ermöglichen dann einen Variantenvergleich durch ein Bewertungsraster. Die Kombination der drei Dimensionen ergibt die folgenden drei Matrizen (Pruhs et al. 2023):

- In der **LCI x EDA-Matrix** werden die Lebenszyklusintensitäten den Ecodesign-Ansätzen gegenübergestellt und bewertet. Ausgehend von der Lebenszyklusphase mit dem größten ökologischen „Hotspot“ eines Produktes, d. h. der Phase mit dem höchsten Verbesserungspotenzial, werden passende EDAs zugeordnet. Diese Matrix bewertet damit den ökologischen (bzw. „zirkulären“) Beitrag dieser EDAs für die ausgewählte LCI und dient der Priorisierung.
- Die **CBM x LCI-Matrix** kombiniert die LCIs mit sinnvoll anwendbaren CBMs. Sie bewertet den zirkulären Beitrag des Geschäftsmodells für die spezifische Produktart und priorisiert die CBMs für das spezifische Produkt mit seiner jeweiligen LCI.
- Die **CBM x EDA-Matrix** führt die CBMs mit allen EDAs zusammen und dient damit zur Bewertung der Sinnhaftigkeit und Umsetzbarkeit der EDAs im Falle der Umsetzung spezifischer CBMs.

So entsteht eine praxisorientierte Hilfestellung bei der Entscheidungsfindung (Grüning und Kühn 2012), indem Abhängigkeiten und Wechselwirkungen identifiziert werden (Schawel und Billing. 2004).

Der konkrete Entscheidungsprozess kann jetzt entweder von einem strategischen (strategisches Level: Geschäftsmodell) oder einem produktbezogenen Ausgangspunkt (Produktlevel: Neu- oder Folgeentwicklung) gestartet werden (Pruhs et al. 2023). Die Matrizen bilden in beiden Fällen die Grundlage eines Entscheidungsbaums, dessen Pfad zu technischen Prinzipien der Zirkularitätsumsetzung, den Circular Design Principles (CDP), führt. Dabei werden schrittweise Produkteigenschaften oder Festlegungen des Produktentwicklers abgefragt. Diese Informationen werden mit Hilfe der Matrizen bewertet und basierend darauf zirkularitätsorientierten Empfehlungen oder Möglichkeiten zugeordnet.

2.2 Methodenentwicklung: Vom Entscheidungsbaum zum digitalen Tool

Für die anwenderorientierte Aufbereitung der Erkenntnisse wurde der Entscheidungsbaum durch die Methode des Wireframing zur Überführung in ein digitales Tool, dem „Circularity Navigator“, vorbereitet. Die Visualisierung in Abbildung 1 veranschaulicht die grundlegenden Layout- und Designelemente und kann als Grundlage für eine technische Umsetzung dienen (Gudoniene et al. 2023). Der Circularity Navigator führt Produktentwickler nun durch die Dimensionen. Dabei werden anhand der Bewertungen in den Matrizen die Vielfalt an zirkulären Designprinzipien und die damit verbundene Auswahl an konstruktiven Lösungsansätzen reduziert.

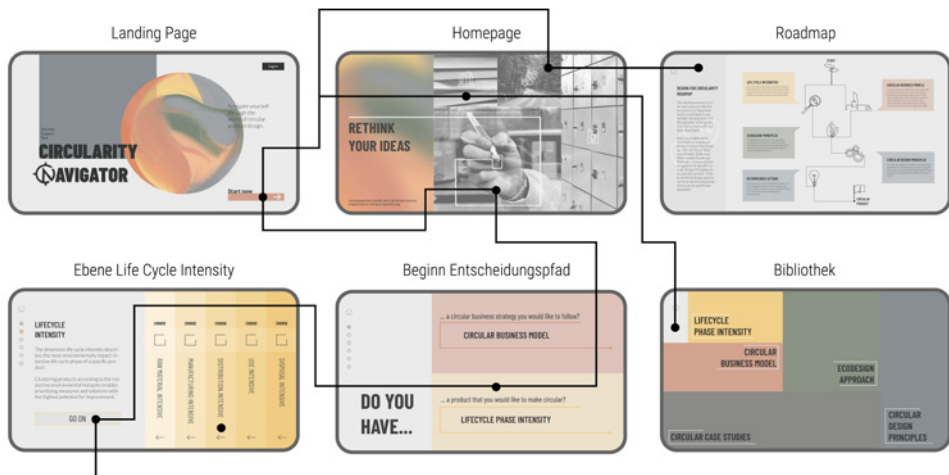


Abbildung 1: Wireframing (Auszug) des Circularity Navigator

Letztlich soll der Circularity Navigator als Webanwendung verfügbar sein, die sowohl in bestehende Produktentwicklungsmethoden integriert werden als auch als eigenständige Lösung zur Ideengenerierung im Innovationsmanagement dienen kann.

Die zentralen Stakeholder des PEP sind Projektmanager, Entwicklungsingenieure, Materialentwickler, Kosteningenieur, LCA-Experten, Einkäufer, Produktionsplaner sowie, je nach Entwicklungssituation, weitere externe Stakeholder. In den Phasen der Produktentwicklung wird der Circularity Navigator von den jeweils verantwortlichen Stakeholdern in der Entwicklung angewendet (Pruhs et al. 2023). Für Produktentwickler ist es wichtig, die konstruktiven Maßnahmen für zirkuläre Produkte zu kennen. Hier

unterstützt der Circularity Navigator nicht nur mit einer produktspezifischen Auswahl an EDAs, sondern zusätzlich mit der technischen Detaillierung eines jeweiligen EDAs auf konstruktiver Ebene, den CDPs. Diese, durch die CDPs bereitgestellten Informationen können und sollen dann in Unternehmen durch Materialvergleichslisten, Beständigkeitsbewertungen, Verfügbarkeitsinformationen zu Rezyklaten oder weiteren, unternehmensspezifischen Hinweisen ergänzt werden. In einer späteren Entwicklungsstufe ist vorgesehen, eine Priorisierung bevorzugt unter Nutzung bestehender Indikatorensysteme prozessintegriert und möglichst automatisiert vorzunehmen.

Zusätzlich zu den Informationen über Produktstruktur und Produkteigenschaften ist auch die Kenntnis des idealen Umsetzungszeitpunkts entscheidend für die Umsetzung von Zirkularitätsansätzen. Der Circularity Navigator kann ab der Phase der Ideengenerierung eingesetzt werden, um produktspezifische EDAs auszuwählen und als technische Handlungsmaßnahmen in der Anforderungsliste aufzunehmen. Je nach Entwicklung bzw. Weiterentwicklung des Konzepts kann der Circularity Navigator darüber hinaus für weitere Produktpassungen oder zur Überprüfung bereits angewendeter oder noch offener zirkulärer Maßnahmen genutzt werden. Zusätzlich dient er als Wissenspool und als Nachschlagewerk bei offenen Fragen hinsichtlich zirkulärer Strategien. Die Integration des Circularity Navigators in den PEP ermöglicht es einer Vielzahl von Akteuren, die an Produktentwicklungen beteiligt sind, auch ohne spezifisches kreislaufwirtschaftliches Hintergrundwissen Kreislaufwirtschafts- und Umweltinformationen sowie Konstruktionsmaßnahmen auf einfache und systematische Weise zu berücksichtigen.

Zusammenfassung

Praxistaugliche Lösungen zur kreislaufwirtschaftlichen Gestaltung industrieller Produkte müssen die Anforderungen zahlreicher, meist unternehmensinterner Stakeholder berücksichtigen. Durch die systematische und schrittweise Berücksichtigung von Gestaltungsregeln für kreislaufgeeignete Produkte, den Umweltauswirkungen dieser Produkte und von zirkularitätsorientierten Geschäftsmodellen können Produkte sicher zirkulär gestaltet werden. Der „Circularity Navigator“ setzt diese Systematik für Stakeholder der Produktentwicklung praxisorientiert um und ermöglicht eine frühestmögliche Integration der Zirkularität im komplexen Produktentstehungsprozess.

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 Projekträger Jülich betreut. Auch ihnen gilt der Dank des Autorenteam. Die alleinige Verantwortung für diesen Text liegt bei den Autoren.

Literatur/Quellen

- European Commission (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.
- Grünig, Rudolf und Kühn, Richard (2013): Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme. Ein heuristischer Ansatz. 4. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Gudoniene, D.; Staneviciene, E.; Buksnaitis, N., D. (2023): The Scenarios of Artificial Intelligence and Wi-frames Implementation in Engineering Education. Sustainability. DOI: doi.org/10.3390/su15086850).
- Pruhs, A.; Kusch, A.; Viere, T.; Woidasky, J. (2023): Operationalisierung von „Design for Circularity“ in der industriellen Produktentwicklung. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, S. 271-281.
- Pruhs, A.; Kusch, A.; Bertagnolli, F.; Viere, T.; Woidasky, J. (2023): Produktentstehungsprozess mit der Lean Methode Makigami – Eine optimierte Produktentwicklung zur Integration eines nachhaltigen und zirkulären Produktdesigns. In: Industrie 4.0 Management 39, S. 55-60. DOI: doi.org/10.30844/IM_23-6_61-65.
- 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/>

Exploring the Potentials for Increasing the Resource Efficiency in the Plastic Packaging Value Chain with a Digital Product Passport

Abstract: Only about 33.2% of post-consumer plastic waste is recycled in Germany. To support the closing of material loops, the transfer of information between all actors in the recycling value chain needs to be improved. Therefore, the concept of information exchange through a Digital Product Passport (DPP) is proposed. The development of DPPs is still at an early stage and research is needed to understand how and under what conditions such new digital technology developments can contribute to increasing the share of recycled materials, especially for plastic packaging. To investigate such aspect, expert interviews and a comprehensive literature review were conducted. One key finding was the different levels of acceptance towards the DPP by the different stakeholders involved. The Collector and the Sorters expressed a low acceptance of the DPP, since they would be willing to share information, but they perceived low or no usefulness of the information available in the DPP for their own purposes. The Recycler and the Online Market Place for recyclates expressed a high acceptance towards the DPP, as they would be willing to share and receive information. Despite conflicting opinions among the stakeholders, the DPP demonstrated to be a potential complementing measure to increase the circular economy of plastic packaging.

1 Introduction

The challenges of closing the plastic packaging loop are faced throughout the value chain. In the production phase, plastic products are designed for single use; in the use phase, impurities and contaminants can be introduced by users; in the disposal phase, lack of awareness and confusion lead to inappropriate waste disposal; in the waste sorting and recycling phases, complex mixed plastic waste streams reduce the quality and quantity of secondary material production. Various measures have been proposed to support the transition from a linear to a circular economy (CE), but they still do not address the lack of transparency and information asymmetry between stakeholders throughout the value chain. The amount of post-consumer plastic waste in Germany in 2021 was 5.44 million tons, of which about 66% was recovered for energy and 33% was recycled. Only about 9% of the new plastic products produced consisted of post-consumer recycled material (Conversio 2022). Plastics therefore still have a very low circularity ratio.

A common challenge in closing the plastic packaging material loop is the lack of an efficient communication among stakeholders throughout the value chain (Milios et al. 2018; van Eygen et al. 2018). The coordination and communication between stakeholders from all sectors are of significant importance, as circularity is

a systemic property rather than an individual one (Stumpf et al. 2023). The requirements of recyclers are usually not sufficiently taken into account in supply chains and, in particular, in the design process (Diaz et al. 2021).

The Digital Product Passport (DPP) offers one potential solution for improving a product's or material's circularity. According to the European Commission, the DPP „electronically register, process and share product-related information amongst supply chain businesses, authorities and consumers (EC 2022)“. As the first mandatory DPP at European level, the development of the Digital Battery Passport (DBP) has received particular attention (EU 2023). The Passport can include a product's components, materials, chemical substances, reparability, spare parts, and proper disposal instructions. This data should be gathered from all stages of the product's life cycle and used to optimize design, production, usage, and disposal processes (Adisorn et al. 2021; Götz et al. 2022; Walden et al. 2021). But it is still not clear how or in which extent the information will be gathered and used. The Cirpass (2023) project has registered more than 100 projects dealing with digital passports. Such projects have been focusing on the IT infrastructure and having textiles and batteries as the main material flows under investigation (Cirpass 2023). Thus, the DPP for plastic packaging is underexplored and raises the question of how a DPP for plastic packaging should be designed to contribute to a closed material loop. To investigate this question, expert interviews were conducted with stakeholders involved in the plastic packaging value chain, specifically the end-of-life (EoL), secondary material production and supply phase.

2 Material and methods

Semi-structured qualitative interviews were conducted with six experts from small and medium enterprises of the EoL sector (collection, sorting and recycling) and of the digital infrastructure sector (online market place and DPP provider). Information gathered from these interviews were compared and complemented to the findings from a comprehensive literature review. Based on the views of the different stakeholders and on the literature review, the following aspects were investigated: (i) identification of the stakeholders of the plastic packaging EoL value chain and its current information exchange process, (ii) assessment of the acceptance level of the DPP among EoL stakeholders, (iii) information requirements of a DPP for plastic packaging; (iv) DPP concept development for plastic packaging, (v) assessment of the DPP as a complementary measure to improve the plastic packaging value chain and (vi) assessment of the implications of a closed plastic packaging loop by an optimized information exchange onto the current energy system. A more comprehensive description of the methodology and the assessments can be found in Liew (2023). The following section focuses on the key findings of items (i) and (ii).

3 Results and discussion

Fig. 1 presents an overview of the stakeholders involved in the phases of collection/sorting and of recycling/manufacturing of recyclates from plastic waste. Two new stakeholders were identified from the interviews, which were not previously mentioned in the literature review: The German Dual System and the transshipment point.

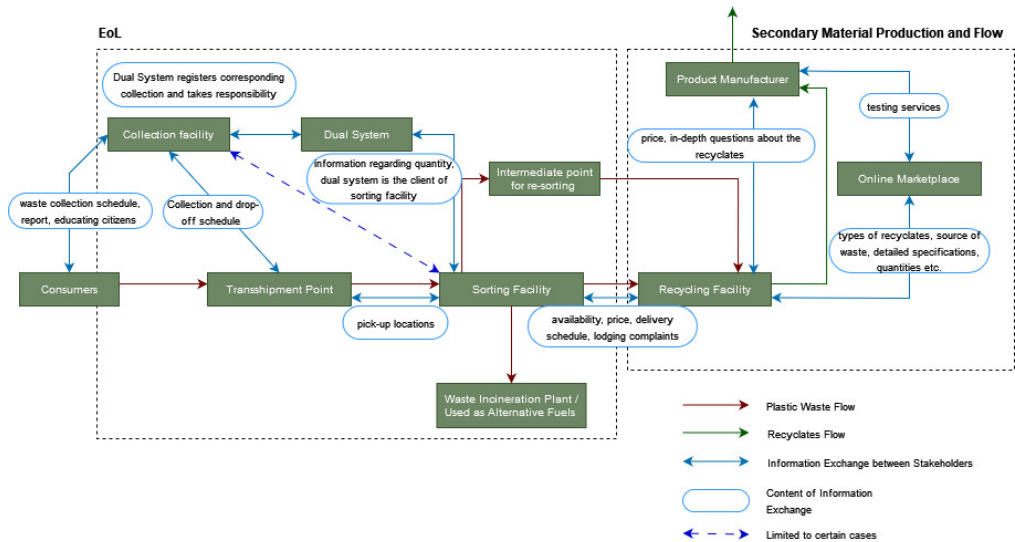


Figure 1: Stakeholders involved in the EoL value chain of plastic packaging waste (Liew, 2023).

The acceptance level of the DPP by the different stakeholders showed conflicting opinions. While the Recycler and Online Market Place wished more information to be exchanged, the Collector and Sorters were satisfied with the current level of information exchange. Low acceptance of the DPP was largely associated with confusion surrounding the proposed concept. High acceptance was associated with the potential benefits of DPP, such as facilitating the identification of hazardous materials, producing higher-quality products, and enhancing traceability and transparency. This difference in opinion indicates that a CE is not fully established for plastic packaging and information gap exists, especially for stakeholders such as recyclers. Additionally, the lack of traceability in the value chain was also identified as a significant gap by the Recycler and the Online Market Place.

The experts from collection/sorting agreed that sorters should provide feedback information to product manufacturers on the sortability of products. Despite the low acceptance, the Collector acknowledged that the DPP could provide information on the origin a certain batch of plastic waste, helping the collection facility to identify areas where of raise awareness among citizens are needed. One Sorter highlighted that he would not disclose precise details about the composition and quantities of sorted waste. Similarly, the Recycler mentioned that he would not disclose the exact recipe used for producing specific components, although information regarding the ingredients may be shared while refraining from specifying exact quantities.

The Recycler mentioned that the information gathered would be highly valuable during the compounding step. If certain additives are already present in the mixture and if they still retain effectiveness, the Recycler can avoid adding these specific additives to the product. Further, the DPP could enable the easy identification of toxic ingredients in a product, allowing them to be directed to incineration rather than the recycling. According to the Online Market Place, the implementation of a DPP would significantly improve traceability

and transparency. For example, the DPP would provide buyers of recyclates with information about whether the material is post-industrial, post-consumer, or completely virgin.

Some challenges associated with the DPP were also identified. The extent to which it is feasible to track the plastic's journey through its lifecycle remains a question. This is because the data carrier (e.g. a QR codes) would likely get damaged during the sorting and recycling steps. Furthermore, one Sorter estimated that the implementation of a DPP would require additional sorting steps, demanding efforts and investment. Supplementary, expert suggestions for enhancing the attractiveness of a DPP for plastic packaging were collected. Based on expert experiences and on literature review, we proposed a concept of a DPP system and DPP data requirements for plastic packaging. The DPP system should incorporate aspects such as data carrier type, data collection, processing, storage, exchange, access, validation, verification, and privacy. The suggested content for the DPP includes general product and manufacturer information, sustainability and circularity data, details of value chain actors, EoL and recyclate data, and compliance details, labels, and certifications.

4 Conclusions

Although our research was based on a limited number of interviews, it still provides valuable insights into both the stakeholder views and the needs which can be used for the design of a DPP for plastic packaging. In general, this study found out that the DPP aligns well with other measures to improve the plastic packaging value chain, complementing their implementation. For example, the DPP can support the eco-design of plastic packaging by providing manufacturers with recyclability information from the sorters and recyclers.

Acknowledgements

This conference proceeding was based on the master's thesis of Gavineesha Liew, developed at the Technical University of Darmstadt in 2023. The master's thesis was developed within the research project K3I-Cycling, funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF).

References

- Adisorn, Thomas; Tholen, Lena; Götz, Thomas (2021): Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy. In: *Energies* 14 (8), S. 2289. DOI: 10.3390/en14082289.
- Cirpass (2023): DPP_related_dataset_23-06-2023 (Excel). Online verfügbar unter: <https://cirpassproject.eu/dpp-related-initiatives-dataset/>, zuletzt geprüft am 11.01.2024
- Conversio (2022): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen (Kurzfassung). Online verfügbar unter https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf, zuletzt geprüft am 16.02.2023.
- Diaz, Anna; Schöggel, Josef-Peter; Reyes, Tatiana; Baumgartner, Rupert J. (2021): Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and life-

- cycle information management. In: Sustainable Production and Consumption 26, S. 1031–1045. DOI: 10.1016/j.spc.2020.12.044.
- EC (2022): Proposal for a Regulation on Ecodesign for Sustainable Products. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:bb8539b7-b1b5-11ec-9d96-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF, zuletzt geprüft am 05.01.2024.
- EU (2023): Regulation (EU) 2023/ of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC 2023. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>, zuletzt geprüft am 05.01.2024.
- Götz, Thomas; Berg, Holger; Jansen, Maike; Adisorn, Thomas; Cembrero, David; Markkanen, Sanna; Chowdhury, Tahmid (2022): Digital product passport: the ticket to achieving a climate neutral and circular European economy?: University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership. Online verfügbar unter <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/8049>.
- Liew, Gavineesha (2023): Exploring the Potentials for Increasing the Resource Efficiency in the Plastic Packaging Value Chain with a Digital Product Passport: An Analysis of Information, Material, and Energy Flows. Master's thesis. Technische Universität Darmstadt.
- Milios, Leonidas; Holm Christensen, Lena; McKinnon, David; Christensen, Camilla; Rasch, Marie Katrine; Hallström Eriksen, Mikael (2018): Plastic recycling in the Nordics: A value chain market analysis. In: Waste management (New York, N.Y.) 76, S. 180–189. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.03.034.
- Stumpf, Lukas et al. (2023): Circular plastics packaging – Prioritizing resources and capabilities along the supply chain. In: Technological Forecasting and Social Change 188, S. 122261. DOI: 10.1016/j.techfore.2022.122261.
- van Eygen, Emile; Laner, David; Fellner, Johann (2018): Integrating High-Resolution Material Flow Data into the Environmental Assessment of Waste Management System Scenarios: The Case of Plastic Packaging in Austria. In: Environmental Science & Technology 52 (19), S. 10934–10945. DOI: 10.1021/acs.est.8b04233.
- Walden, Joerg; Steinbrecher, Angelika; Marinkovic, Maroye (2021): Digital Product Passports as Enabler of the Circular Economy. In: Chemie Ingenieur Technik 93 (11), S. 1717–1727. DOI: 10.1002/cite.202100121.

Contact

M.Sc., Tabea Hagedorn, research associate

TU Darmstadt - Material Flow Management and Resource Economy (SuR)

E-Mail: t.hagedorn@iwar.tu-darmstadt.de

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

Dr. techn. Alice do Carmo Precci Lopes, research associate and team leader

TU Darmstadt - Material Flow Management and Resource Economy (SuR)

Tel.-Nr. +49 6151 16 20730

E-Mail: a.lopes@iwar.tu-darmstadt.de

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

Innovative Slab Connection to Reduce Material Use and Increase Flexibility in a “Design for Disassembly” Structure

Abstract: *The construction industry is constantly searching for techniques to reduce material, reuse and recycle. Based on this need and the growing environmental concern that the construction industry represents for Europe's climate goals, the Hamburg partners of the CIRCuIT project have developed flexible slab connections for building construction under the term "Design for Disassembly". The project aimed to develop three different slab-beam connections to not only reduce the use of materials but also to extend the life of the elements by extending their use in future construction projects. These flexible slab designs demonstrate a simple dismantling of the elements to be further reused with minimal destruction and delay. The expected result is to create a more flexible structure where demolition can be done in a cleaner way, resulting in less mixed construction and demolition waste. The first slab scenario consisted of a connection using an inverted steel T-beam that connects all the continuing prestressed concrete slabs. Approximately, 90% of the concrete material can be recycled from these elements. The second slab scenario uses the connection of hollow prestressed concrete slabs. The slabs are connected with a so-called "hammer head" together with cast-in-place concrete to fill the voids. In this scenario, it is expected that 80% of the precast concrete elements are non-destructively removable and therefore reusable. The final slab connection scenario involved the use of combined wooden slabs and beams connected to perpendicular reinforced concrete beams. In this hybrid design, the wooden elements cannot be completely removed in one piece, but they can be cut into smaller sections and thus recycled.*

1 Introduction

The implementation of flexible connection designs in construction, particularly in the context of schools in Hamburg, presents an opportunity for faster construction progress and associated economic and ecological advantages [1]. This is an interesting alternative for exploration in the context of sustainability in concrete construction. In Hamburg, several comparable schools are being built with the same concept. The project Klassenhäuser (School houses) funded by the CIRCuIT project consists in 3 story buildings, where the concept of flexible design is demonstrated. A special focus is placed on the comparison of the conventional in-situ concrete method with prestressed concrete cast elements, as well as with prestressed concrete elements with seam and joint. Furthermore, a bolted timber-concrete construction method is also considered.

2 Methodology

2.1 Prestressed Slabs with Inverted T-beam Connection

The initial slab connection involved the utilization of pre-stressed slabs, varying in thickness from 18cm to 25cm and spans ranging from 3m to 6m based on the load-bearing structure. These slabs are connected to an inverted steel T-beam, all slabs adjacent to each other. Unfortunately, these elements are not suitable for reuse conserving their original shape due to construction-related damage. Nevertheless, there is a potential for recycling 90% of the concrete material as recycle concrete aggregates [1].

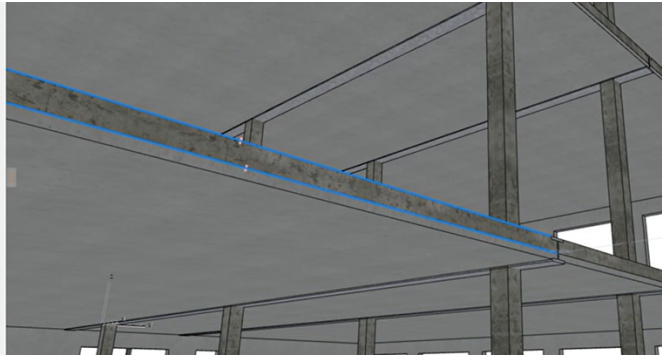


Figure 1 BIM Model of Scenario 1. Inverted T-Beam Connection (Provided by: Otto Wulff Bauunternehmung)

2.2 Hollow Prestressed Slabs with Hammer Head Connection

The second slab connection employs hollow prestressed concrete slabs, minimizing concrete usage by strategically applying it in the tension/compression zones for optimal design efficiency. The connection parallel to the tension axis incorporates a „hammer head“ connection with cast-in-place concrete to fill the void and

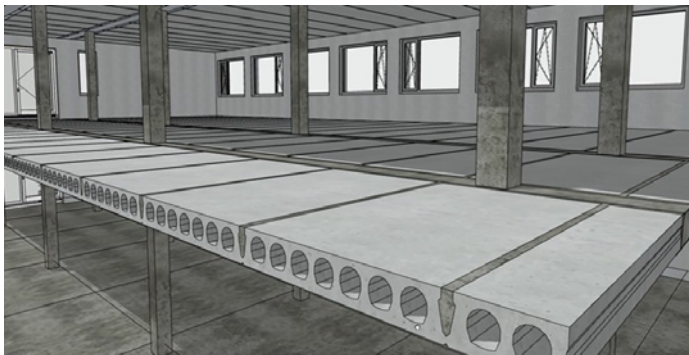


Figure 2. BIM Model of Scenario 2. Hollow Slabs Connected with Hammer Head Connection (Provided by: Otto Wulff Bauunternehmung)

create a good bond between slabs [2], as can be seen in Figure 2. These slabs are supported on a perpendicular direction by composite trapezoid beams creating a triangular gap between the beam and the slabs. This gap is subsequently filled with cast-in-place concrete to establish a robust bond between the beams and concrete slabs, as seen in Figure 3. In this context, it is assumed that 80% of the precast concrete elements can be non-destructively removed, allowing for reusability [1].

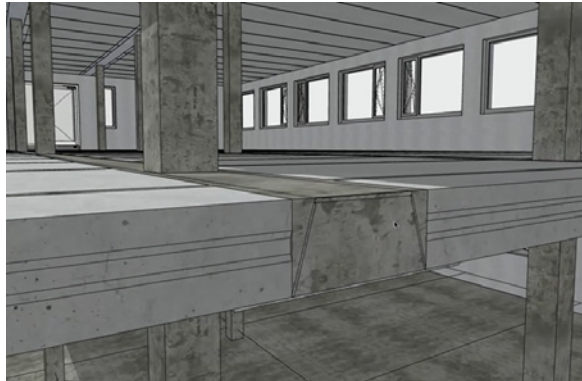


Figure 3 BIM Model of Beam Connection Perpendicular to the Axis of the Hollow Slabs
(Provided by: Otto Wulff Bauunternehmung)

2.3 Wooden slabs and Beams Connected to Reinforced Concrete Beams

The last slab connection incorporated a combination of wooden slabs and beams linked to reinforced pre-cast concrete beams running perpendicular to the slab axis, as seen in Figure 4. The wood composite utilized in this connection eliminates the need for concrete pouring. While the wooden elements cannot be entirely removed as a continuous piece, they can be cut into smaller sections for recycling purposes. Here it is expected that approximately 95% of the wooden elements can be removed again and thus reused [1].

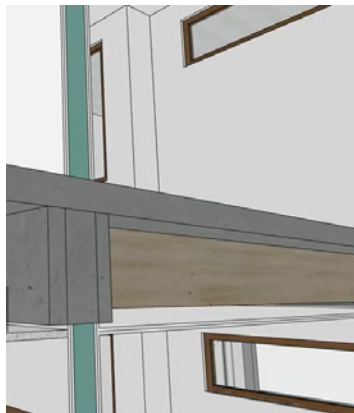


Figure 4 BIM Model Scenario 3. Wood Concrete Hybrid Construction (Provided by: Otto Wulff Bauunternehmung)

3 Discussion

The Hamburg classroom buildings employed a modular construction method centered on prefabricated components, mainly concrete and wood, within the structure's shell. These components are predominantly connected through bolts and/or stacked on top of each other during on-site assembly; some of these connections also use cast-in-place concrete to guarantee a strong bond between the slabs and the beams. To achieve a monolithic overall structure, joints between components undergo partial reinforcement and grouting in the subsequent construction phases. This monolithic construction is essential to meet static requirements, as well as fulfill fire protection and sound insulation criteria.

This construction approach significantly influences the future usability of the components. While bolted or stacked prefabricated components theoretically allow for disassembly, the monolithic structure is integral for meeting the specified static, fire protection, and sound insulation standards. In contrast to the conventional in-situ concrete slab, known as the baseline slab structure, the flexible design of the modular slabs suggests a potential extension of the building's lifetime. However, quantifying this extension depends on various factors such as the techniques employed and maintenance methods applied during the construction process.

Some of the lessons learned within this project include the consideration of avoiding grouting the bolted connections, so the elements can be disassembled and reused for future projects since they can be separated without causing damage to the elements. This applies to virtually all structural components, such as solid precast walls, prestressed concrete hollow core slabs or precast columns. However, special consideration must be taken into the static behavior of the structure.

4 Conclusion

- Optimized slab design allows for systematic dismantling, with components sorted by type. In terms of floor slabs, concrete usage is significantly reduced, amounting to only 40% when compared to traditional in-situ concrete construction methods.
- The need for joint sealing in prestressed concrete slabs is eliminated thanks to geometric interlocking. Consequently, the elements can be fully dismantled during deconstruction without the requirement for sorting.
- The adoption of concrete hybrid construction led to an increase in the building's height by over 50 cm. This, in turn, had implications for wall heights, staircase and railing lengths, and pipe lengths. To address these changes, spans had to be reduced, giving rise to conflicts with the functional and architectural objectives of the project.

Acknowledgements

CIRCuIT project partners, Otto Wulff, and e-hoch-3

References

- [1] CIRCUIT, „D6.2 Circular building concepts for concrete, hybrid concrete-wood, and volume construction,“ EU Horizon 2020, 2022.
- [2] Otto Wulff Bauunternehmung, „Flexible Konstruktionen im Hinblick auf spätere, erneute Nutzbarkeit am Beispiel Hamburger Klassenhäuser,“ Otto Wulff Bauunternehmung, Hamburg, 2020.

Contact

MSc. Ariana C. Morales Rapallo, Research Assistant

Technische Universität Hamburg/ Institute of Circular Resources Engineering and Management

+49 40 42878 2393

ariana.morales@tuhh.de

<https://www.tuhh.de/crem/willkommen>

TEIL 3

Aufbereitungs- und Sortiertechnik: Optische und mechanische Verfahren

Leitung:

Prof. Dr.-Ing. Sabine Flamme

Abtrennung von Papier aus Kunststoffgemischen: Parameterstudie mittels sensorbasiertem Prozessmonitoring zur optimierten Einstellung eines Ballistikseparators

Abstract: Ballistikseparatoren werden innerhalb der Aufbereitung von Leichtverpackungsabfällen eingesetzt, um Papier und Folien von 3D-Kunststoffen zu trennen. Dabei können verschiedene Parameter Einfluss auf die Trennung von 2D- und 3D-Komponenten besitzen. In den vorgestellten Versuchen wurden drei verschiedene Winkel der Trennfläche, fünf Umdrehungsgeschwindigkeiten der Paddel sowie zwei Arten von Paddelbelägen an einem Ballistikseparator im Industriemaßstab untersucht. Es wurden Materialgemische bestehend aus Papier- und Kunststoffabfällen erstellt. Die Änderungen wurden mittels sensorbasiertem Prozessmonitoring aufgezeichnet und anhand der Reinheiten und des Wertstoffausbringens der 2D- und 3D-Flächenströme ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass alle Parameter einen Einfluss auf die Trennung von 2D- und 3D-Komponenten besitzen, wobei die Umdrehungsgeschwindigkeit sowie die Art der Paddelbeläge als maßgebliche Faktoren identifiziert wurden. Durch die Kombination der einzelnen Parameter können optimale Einstellungen je nach Trennaufgabe bestimmt werden. Die Ergebnisse können zur Optimierung der Einstellung von Ballistikseparatoren innerhalb der Aufbereitung von Leichtverpackungsabfällen beitragen.

1 Einleitung

Obwohl die Nutzung von Sekundärfasern gegenüber dem Einsatz von Primärfasern ökologische und ökonomische Vorteile bietet (Wellenreuther et al. 2022), betrug die Altpapierrücklaufquote im Jahr 2021 76 Ma.% (DIE PAPIERINDUSTRIE e. V. 2022). Im Umkehrschluss gelangt damit über 20 Ma.-% des produzierten Papiers nicht zurück in den Wertstoffkreislauf. Ein Teil geht in gemischten Abfallströmen wie Leichtverpackungsabfällen (LVP) verloren. Im Forschungsprojekt EnEWA wird ein Recyclingprozess für Papier aus gemischten Abfallsammlungen entwickelt. In einem ersten Schritt wurde die optimierte Sortierung von Papier aus gemischten Abfallströmen untersucht. Ein Schwerpunkt wurde dabei auf die Trennung von 2D- und 3D-Komponenten mittels ballistischer Separation gelegt.

Ballistikseparatoren bestehen aus schrägen Trennflächen, die sich aus einzelnen rotierenden Längselementen (sogenannten Paddeln) zusammensetzen (Kranert 2017). Rollfähige 3D-Partikel werden aufgrund ihrer Partikeleigenschaften am unteren Ende der Paddel ausgetragen, während flächige 2D-Partikel am oberen Ende ausgeschleust werden (Kranert 2017). Bei der Sortierung von Leichtverpackungsabfällen werden Ballistikseparatoren typischerweise vor der sensorbasierten Sortierung eingesetzt, um Folien und Papiere

von 3D-Kunststoffen zu trennen (Cimpan et al. 2016; Feil et al. 2021; Knappe et al. 2021; Mastellone et al. 2017; Neubauer et al. 2020). Bisherige Untersuchungen konzentrieren sich häufig auf die Anwendbarkeit eines Ballistikseparators für einen spezifischen Stoffstrom (Garcia Lopez et al. 2019) oder betrachten den Schritt der ballistischen Trennung innerhalb einer Prozesskette (Hernández Parrodi et al. 2019; Kleinhans et al. 2021; Möllnitz et al. 2021). Dabei erfolgt häufig keine Variation der Betriebsparameter des betrachteten Ballistikseparators. In diesem Beitrag werden Untersuchungen zur optimierten Einstellung eines Ballistikseparators über die Variation von Winkel, Drehzahl und Paddelbelag vorgestellt, die durchgeführt wurden, um eine optimierte Trennung von Papier und Folien aus 3D-Kunststoffen innerhalb der LVP-Aufbereitung zu ermöglichen.

2 Material und Methoden

2.1 Probenmaterial

Für die Versuche wurden je 100 kg an Mustergemischen, angelehnt an die Zusammensetzung eines vorkonditionierten LVP-Gemischs vor der sensorbasierten Sortierung, erstellt. Als 3D-Kunststoffe wurden PP (50 kg), PET-Flaschen (11 kg), PET-Schalen (11 kg) und PS (5,5 kg) jeweils aus Produktfraktionen einer LVP-Sortieranlage genutzt. Als 2D-Material wurden LDPE-Folien (2,5 kg) sowie Papier, Pappe und Kartonagen (PPK) (20 kg) aus LVP verwendet. PE wurde nur in Form von Folien genutzt, um eine klare Zuordnung des Materials und der Partikeleigenschaften zu ermöglichen. Flüssigkartonagen (FKN) werden in LVP-Sortieranlagen für gewöhnlich in die 3D-Fraktion ausgetragen (Feil et al. 2016). Die im Mustergemisch enthaltenen FKN entstammen der Fehlsortierung in die PPK-Fraktion und haben Partikeleigenschaften, die denen der 2D-Fraktion ähneln. Entsprechend wurden FKN in diesen Versuchen als 2D-Material klassifiziert. Am 2D- und 3D-Austrag besitzen sie mit je etwa 1 a% (Flächenprozent) einen geringen Anteil.

2.2 Versuchsdurchführung und sensorbasiertes Prozessmonitoring

Die Versuche wurden im slowenischen Test und Innovationscenter der STADLER Anlagenbau GmbH (Altshausen, Deutschland) durchgeführt. Genutzt wurde ein Ballistikseparator des Typs STT2000 mit sechs Paddeln. Es wurden drei verschiedene Winkel der Trennfläche (15° , $17,5^\circ$ und 20°), fünf Umdrehungsgeschwindigkeiten der Paddel ($s_1 < s_2 < s_3 < s_4 < s_5$) und zwei Arten von Paddelbelägen untersucht. Als Paddelbeläge wurden geschlossene Beläge und Beläge mit einer Lochung von 45 mm verwendet. Das Material wurde innerhalb einer Kreislaufführung je Einstellung mehrfach über den untersuchten Ballistikseparator geführt. Bei einer Umlaufzeit von 2 Minuten und einer Gesamtmenge des Mustergemischs von 100 kg ergibt sich ein Durchsatz von ca. 3 t/h. Jeder Versuch (pro Parametereinstellung) dauerte 6 Minuten. Die Bewertung der Versuche erfolgte über ein sensorbasiertes Prozessmonitoring des 2D- und 3D-Outputstroms mittels EVK HELIOS EQ32 Hyperspektralkameras der EVK Kerschhaggl GmbH (Raaba, Österreich). Zur Klassifikation wurden neben den Nahinfrarot (NIR)-Spektren der Materialien der Mustergemische vorrangig dem Papierspektrum ähnliche NIR-Spektren angelernt. Aufgrund einer Übererkennung des Textil-Spektrums wurde dieses nachträglich dem PPK-Spektrum zugeordnet. Der Versuchsaufbau, die untersuchten Parameter sowie die angelernten NIR-Spektren sind in Abbildung 1 dargestellt.

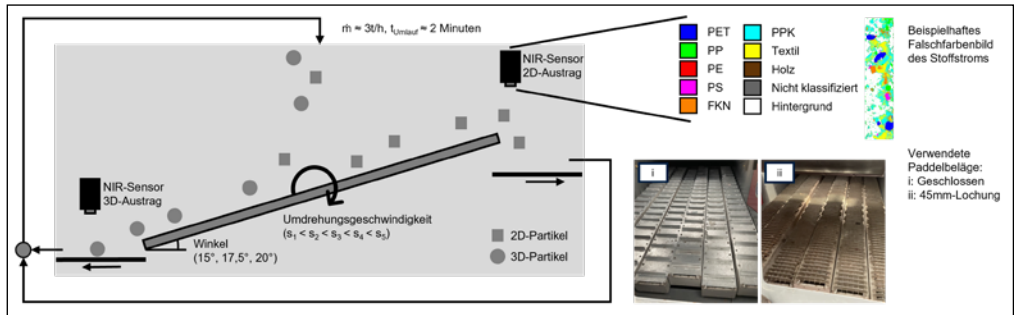


Abbildung 1: Versuchsaufbau, untersuchte Parameter und aufgezeichnete NIR-Spektren

2.3 Art der Versuchsauswertung

Je Versuch wurden die Reinheit (Purity) P (Gleichung (1) und (2)) und das Wertstoffausbringen (Yield) Y (Gleichung (3) und (4)) ermittelt. Dazu wurden jeweils die Flächenströme der 2D- bzw. 3D-Materialien im 2D- bzw. 3D-Produktstrom $\dot{A}_{2D/3D,2D/3D\text{-Produkt}}$, die Flächenströme des 2D- bzw. 3D-Produktstroms $\dot{A}_{2D/3D\text{-Produkt}}$ sowie die Gesamtflächen aller 2D- bzw. 3D-Materialien $\dot{A}_{2D/3D\text{-Total}}$ genutzt. Nicht klassifizierte Partikel wurden vernachlässigt.

$$P_{a,2D,2D\text{-Produkt}} = \frac{\dot{A}_{2D,2D\text{-Produkt}}}{\dot{A}_{2D\text{-Produkt}}} \quad (1)$$

$$P_{a,3D,3D\text{-Produkt}} = \frac{\dot{A}_{3D,3D\text{-Produkt}}}{\dot{A}_{3D\text{-Produkt}}} \quad (2)$$

$$Y_{a,2D,2D\text{-Produkt}} = \frac{\dot{A}_{2D,2D\text{-Produkt}}}{\dot{A}_{2D\text{-Total}}} \quad (3)$$

$$Y_{a,3D,3D\text{-Produkt}} = \frac{\dot{A}_{3D,3D\text{-Produkt}}}{\dot{A}_{3D\text{-Total}}} \quad (4)$$

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass alle untersuchten Parameter einen Einfluss auf das Trennergebnis der 2D- und 3D-Fractionen besitzen. Allgemein ist zu beachten, dass die dargestellten Ergebnisse auf Bilanzen der Flächenströme beruhen und damit keine Massenbilanzen darstellen.

3.1 Einfluss des Winkels der Trennfläche

Der Winkel der Trennfläche wurde zwischen 15°, 17,5° und 20° variiert. Die Reinheiten und das Wertstoffausbringen für den 2D- und 3D-Output sind in Abbildung 2 dargestellt. Zu erwarten wäre, dass ein Steigen des Winkels zu höheren Reinheiten im 2D-Output ($P_{a,2D,2D\text{-Produkt}}$) bei gleichzeitig geringerem Wertstoffausbringen ($Y_{a,2D,2D\text{-Produkt}}$) führt. Für den 3D-Output wäre ein antiproportionales Verhalten zu erwarten. Entsprechende Tendenzen sind für die 3D-Reinheit sowie die 2D- und 3D-Wertstoffausbringen zu beobachten. Die höchsten Reinheiten des 2D-Outputs ergeben sich allerdings für einen Winkel von 17,5°. Insgesamt sind hohe Schwankungsbreiten (für $Y_{a,2D,2D\text{-Produkt}}$ von bis zu 100%) zu beobachten, die auf einen geringen Einfluss des Winkels gegenüber den Parametern Drehzahl und Paddelart hindeuten. Die insgesamt geringeren

Schwankungen an Reinheit ($P_{a,3D,3D\text{-Produkt}}$) und Wertstoffausbringen ($Y_{a,3D,3D\text{-Produkt}}$) im 3D-Output können auf den höheren Anteil an 3D-Material im Input (77,5 Ma.-%) zurückgeführt werden.

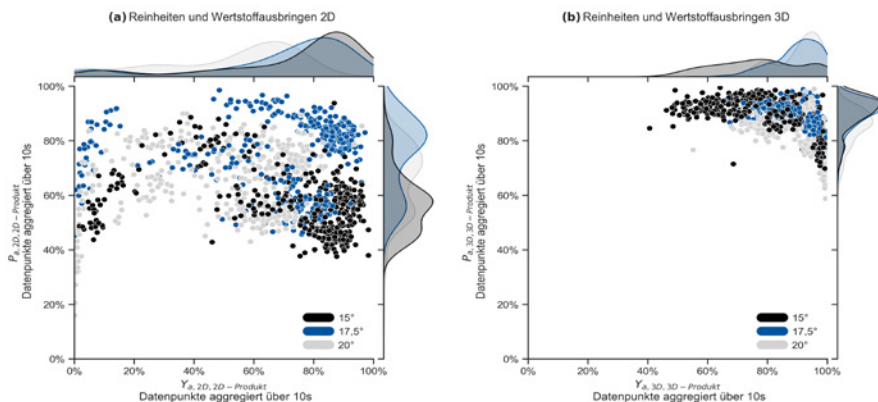


Abbildung 2: Reinheiten (P) und Wertstoffausbringen (Y) (Verteilung und Verläufe) in Abhängigkeit des Winkels der Trennfläche berechnet über die Flächenströme des 2D- und 3D-Outputs

3.2 Einfluss der Umdrehungszahl und der Art der Paddelbeläge

Abbildung 3 können die Reinheit und das Wertstoffausbringen in Abhängigkeit der Umdrehungszahl und des Paddelbelags entnommen werden. Es zeigt sich, dass die geschlossenen Paddelbeläge im Mittel sowohl für die Reinheit als auch für das Wertstoffausbringen signifikant schlechtere Ergebnisse liefern (mit $p < 0,01$ (Welsh's t-test)). Allerdings ist zu beachten, dass der Feingutanteil, der hauptsächlich über die PPK-Fraktion eingetragen wird, bei den geschlossenen Belägen in die Bilanz eingeht, wohingegen das Feingut bei den 45 mm-Belägen zum Großteil abgesiebt und nicht über die NIR-Sensoren erfasst wird. Prüfsiebungen der PPK-Fraktion ergaben, dass der Feingutanteil (< 45 mm) bei etwa 10 Ma.% liegt und damit etwa 2 Ma.% des Inputs ausmacht. Nach Berechnung verschiedener Szenarien können die beobachteten Performance-Unterschiede der Beläge nicht gänzlich über die veränderte Massenbilanz der Feingutanteile erklärt werden. Zusätzlich decken sich die Ergebnisse mit vorhandener Literatur, die zeigt, dass eine vorgeschaltete Feingutabsiebung zu einer verbesserten Performance der ballistischen Trennung führt (Möllnitz et al. 2021). Insgesamt lässt sich aus den bisherigen Ergebnissen schließen, dass Paddelbeläge mit einer 45 mm-Lochung zu einer verbesserten Performance als geschlossene Paddelbeläge führen.

Die Erhöhung der Umdrehungszahl führt zu geringeren Reinheiten im 2D-Output bei gleichzeitig gesteigertem Wertstoffausbringen der 2D-Fraktion. Die größten Unterschiede in den mittleren Anteilen ($P_{a,2D,2D\text{-Produkt}}$ und $Y_{a,2D,2D\text{-Produkt}}$) sind bei Veränderung der Drehzahl zwischen s_1 , s_2 und s_3 zu beobachten. Allerdings ergeben sich hier auch die höchsten Schwankungsbreiten (ausgenommen $Y_{a,2D,2D\text{-Produkt}}$ bei einer Umdrehungszahl von s_1). Für den 3D-Output steigen die 3D-Reinheiten mit steigender Drehzahl, wohingegen das Wertstoffausbringen in die 3D-Fraktion abnimmt. Eine Verknüpfung der Mittelwerte ergibt einen asymptotischen Verlauf, der sich in geringeren mittleren Unterschieden zwischen den Drehzahlen s_3 , s_4 und s_5 äußert und zu einer Plateau-Bildung ab einer Drehzahl von s_3 führt. Erfolgt eine Abwägung zwischen Reinheit und Wert-

stoffausbringen, ergeben sich nach den in Abbildung 3 dargestellten Daten die vorläufig besten Ergebnisse für Padelbeläge mit einer 45 mm-Lochung bei einer Drehzahl von s_3 .

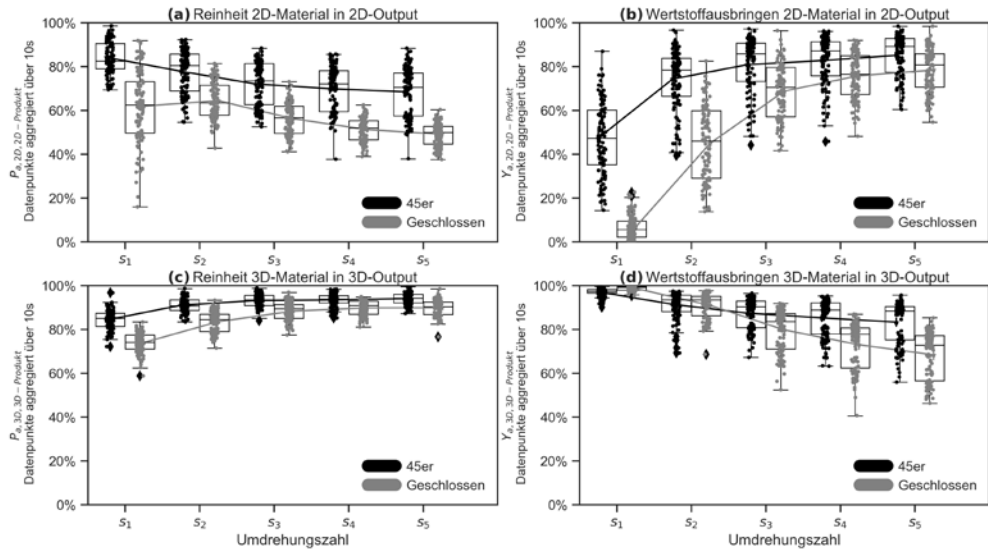


Abbildung 3: Reinheiten (P) und Wertstoffausbringen (Y) in Abhängigkeit der Umdrehungszahl und der Art der Padelbeläge berechnet über die Flächenströme des 2D- und 3D-Outputs

4 Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass alle untersuchten Parameter einen Einfluss auf die Reinheiten und das Wertstoffausbringen der 2D- und 3D-Fractionen besitzen, wobei durch die Variation der Umdrehungszahl und die Art des Belags die größten Änderungen zu verzeichnen sind. In weiteren Arbeiten wird der Einfluss von Flächengewichten, die Zusammensetzung der Mustergemische und die Art des verwendeten Papiers untersucht. Zusätzlich werden die Daten genutzt, um Machine Learning-Modelle zu trainieren und daraus ein virtuelles Prozessmodell des Ballistikseparators zu generieren. Die Ergebnisse können zur Optimierung der Einstellung von Ballistikseparatoren innerhalb der LVP-Aufbereitung beitragen.

Danksagung

Das Projekt *EnEWA* wird finanziell mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen *03EN2073B* im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms gefördert. Wir bedanken uns bei der STADLER Anlagenbau GmbH und der TOMRA Sorting GmbH für die Unterstützung während der durchgeführten Versuche.

Literatur/Quellen

- Cimpan, C., Maul, A., Wenzel, H., Pretz, T. (2016): Techno-economic assessment of central sorting at material recovery facilities – the case of lightweight packaging waste. *Journal of Cleaner Production* 112: 4387-4397.
- DIE PAPIERINDUSTRIE e. V. (2022): Leistungsbericht PAPIER 2022. Statistiken zum Leistungsbericht.
- Feil, A., Kroell, N., Pretz, T., Greiff, K. (2021): Anforderungen an eine effiziente technologische Behandlung von Post-Consumer Verpackungsmaterialien in Sortieranlagen. Möglichkeiten und Grenzen. *Müll und Abfall* 7: 362-370.
- Feil, A., van Thoden Velzen, E., Jansen, M., Vitz, P., Go, N., Pretz, T. (2016): Technical assessment of processing plants as exemplified by the sorting of beverage cartons from lightweight packaging wastes. *Waste Management* 48: 95-105.
- Garcia Lopez, C., Ni, A., Hernández Parrodi, J., Küppers, B., Raulf, K., Pretz, T. (2019): Characterization of landfill mining material after ballistic separation to evaluate material and energy recovery potential. *Detritus* 08: 5-23.
- Hernández Parrodi, J., Raulf, K., Vollprecht, D., Pretz, T., Pomberger, R. (2019): Case study on enhanced landfill mining at Mont-Saint-Guibert Landfill in Belgium: Mechanical processing of fine fractions for material and energy recovery. *Detritus* 08: 62-78.
- Kleinhans, K., Hallemans, M., Huysveld, S., Thomassen, G., Ragaert, K., van Geem, K., Roosen, M., Mys, N., Dewulf, J., De Meester, S. (2021): Development and application of a predictive modelling approach for household packaging waste flows in sorting facilities. *Waste Management* 120: 290-302.
- Knappe, F., Reinhardt, J., Kauertz, B., Oetjen-Dehne, R., Buschow, N., Ritthoff, M., Wilts, H., Lehmann, M. (2021): Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. *Texte* 92/2021.
- Kranert, M. (Hrsg.) (2017): Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Planung – Recht – Verfahren. 5. Aufl. Wiesbaden, Heidelberg (Springer Vieweg): 832 S.
- Mastellone, M., Cremiato, R., Zaccariello, L., Lotito, R. (2017): Evaluation of performance indicators applied to a material recovery facility fed by mixed packaging waste. *Waste Management* 64: 3-11.
- Möllnitz, S., Küppers, B., Curtis, A., Khodier, K., Sarc, R. (2021): Influence of pre-screening on down-stream processing for the production of plastic enriched fractions for recycling from mixed commercial and municipal waste. *Waste Management* 119: 365-373.
- Neubauer, C., Stoiff, B., Tesar, M., Thaler, P. (2020): Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich. Wien.
- Wellenreuther, F., Detzel, A., Krüger, M., Busch, M. (2022): Updated life-cycle assessment of graphic and tissue paper. *Texte* 123/2022.

Kontakt

Alena Maria Spies, M.Sc. (wissenschaftliche Mitarbeiterin)
Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe, RWTH Aachen University
Tel.-Nr. +49 241 80-99354
E-Mail: alena.spies@ants.rwth-aachen.de
Homepage: www.ants.rwth-aachen.de

Modellierung eines Ballistikseparators mittels sensorbasiertem Prozessmonitoring und Machine-Learning

Abstract: Ballistikseparatoren spielen eine zentrale Rolle in der Vorkonditionierung von Abfallsortieranlagen, indem sie effizient zwischen flächigen (2D) und sphärischen (3D) Partikeln separieren. Diese Vorkonditionierung beeinflusst maßgeblich nachfolgende Prozessschritte und damit die Effizienz einer gesamten Anlage. Trotz der Bedeutung der Ballistikseparatoren fehlt bisher ein tiefgreifendes quantitatives Verständnis ihres Separationsverhaltens. In dieser Arbeit wurde als Machbarkeitsuntersuchung ein Prozessmodell eines Ballistikseparators der Firma STADLER Anlagenbau GmbH entwickelt, das die ausgebrachten Ziel- und Nicht-Zielmaterialien vorhersagt. Hierfür wurden die Daten aus dem sensorbasierten Prozessmonitoring einer Parameterstudie, basierend auf 30 unabhängigen Experimenten, genutzt, um Machine-Learning-Modelle zu trainieren. Die Ergebnisse bieten Perspektiven für eine optimierte Anlagenauslegung und eine dynamische Anlagenregelung, die zu verbesserten Trennungsergebnissen führen kann.

1 Einleitung

Die Einhaltung der von der Europäischen Union für 2030 festgelegten Recyclingquoten für Verpackungen ist aus ökologischer Sicht entscheidend, da sie zur Verringerung der Umweltbelastung beitragen können. Durch das Recycling von Leichtkunststoffverpackungen (LVP) und Papier, Pappe und Karton (PPK) mit den Zielen von mindestens 55 bzw. 85 Ma.-% wird nicht nur Abfall reduziert, sondern auch der Ressourcenverbrauch und die Treibhausgasemissionen gesenkt (Europäische Kommission, 2015, 2020). Das Forschungsprojekt EnEWA zielt darauf ab, optimierte Recyclingprozesse für PPK aus gemischten Abfallsammlungen zu entwickeln, um die Altpapierrücklaufquote zu erhöhen und festzustellen, welcher Beitrag zur Reduktion von Umweltwirkungen dadurch erzielt werden kann (ANTS, 2023). Der Ballistikseparator kann durch eine verbesserte PPK- und Folienabtrennung im LVP-Strom wesentlich zur Einhaltung beider geforderten Recyclingquoten der EU beitragen. In der Literatur fehlt jedoch ein quantitatives Verständnis des Ausbringverhaltens von Ballistikseparatoren in Bezug auf variierbare Prozessparameter. Auf einer schiefen Ebene rotieren gegeneinander parallel angeordnete Paddelsegmente, die zur Sortierung der Partikel beitragen. Abhängig von den physikalischen Eigenschaften und der Geometrie „rollt“ ein Partikel nach unten in das 3D-Produkt oder wird nach oben in das 2D-Produkt ausgetragen. Zusätzlich kann ein integriertes Sieb die Trennung einer Fein-Fraktion ermöglichen (Kranert, 2017; Letcher, 2020). Bei der Parameterstudie am Ballistikseparator wurden drei zentrale, direkt einstellbare Parameter identifiziert, die entscheidend für das Wertstoffausbringen (Y) und die Reinheit (P) des Zielmaterials in einer Produktfraktion sind. Diese Parameter umfassen den Neigungswinkel (α) der schiefen Ebene, die Rotationsgeschwindigkeit der Paddelsegmente (s) und die

Beschaffenheit der Paddeloberflächen (l). Obwohl das erste Funktionsprinzip von einem Aggregat mit ballistischen Separationsverhalten bereits seit 1978 patentiert ist (Forslund, 1978), gibt es keine formale, zeitlich aufgelöste Beschreibung des Separationserfolgs in Abhängigkeit der genannten variierbaren Parameter in einem Prozessmodell. Ein solches Modell, das die Abhängigkeit von verschiedenen Parametern berücksichtigt, könnte das Separationsverhalten für einen gegebenen Inputstrom vorhersagen. Damit könnte sowohl die Anlagenauslegung als auch der Betrieb verbessert und eine Optimierung von Produktausbeute und Reinheit ermöglicht werden. Vergleichbare Modelle für sensorbasierte Sortierer sind bereits dokumentiert (Friedrich et al., 2023; Kroell et al., 2024). Das Ziel dieses Beitrags ist es ähnliche Modelle für jede Konfiguration des Ballistikseparators, bestehend aus Neigungswinkel α und Paddelbelag l , zu entwickeln. Diese sollen die Transferkoeffizienten (TKs) für das 2D- und 3D-Material in das 2D-Produkt vorhersagen.

2 Material und Methode

2.1 Material, Versuchsdurchführung und Prozessmonitoring

Für die Parameterstudie wurden LVP-Mustergemische zusammengestellt, die eine Mischung vor der sensorbasierten Sortierung repräsentieren. Eine genaue Beschreibung der Zusammensetzung des 100 kg schweren Versuchsmaterials findet sich in (Spies et al., 2024).

Da der primäre Zweck des Ballistikseparators in der Trennung von 2D- und 3D-Material besteht und die nachfolgende Modellierung sich auf den Austrag am 2D-Produkt konzentriert, wurden Flüssigkeitskartonagen (FKN), LDPE-Folien (PE) und PPK als Zielmaterial (2D) definiert. Folglich besteht das Nicht-Zielmaterial (3D) aus der Differenz des Gesamtmaterials und dem Zielmaterial, was in diesen Versuchen als Polypropylen (PP), PET-Schalen, PET-Flaschen und Polystyrol (PS) definiert wurde. Die Begründung für die Wahl dieses Zielmaterials findet sich in Spies et al. (2024).

Im Rahmen der Untersuchungen wurde das Material im Kreislauf über einen Ballistikseparator des Typs STT2000 der STADLER Anlagenbau GmbH gefahren. Dabei konnten die möglichen zu variierenden Parameter ($\alpha \in \{15^\circ, 17.5^\circ, 20^\circ\}$; $s \in \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 | s_1 < s_2 < s_3 < s_4 < s_5\}$; $l \in \{\text{Geschlossen}, 45\text{er}\}$) systematisch am Separator angepasst werden, um den Ballistikseparator in alle relevanten Systemzustände zu versetzen. Bei der Durchführung der einzelnen Experimente wurden jeweils zwei Parameter konstant gehalten, während der dritte Parameter variiert wurde, sodass insgesamt 30 unterschiedliche Versuchsanordnungen analysiert wurden. Während der Parameterstudie erfolgte das Stoffstrommonitoring mittels Inline-Nahinfrarot Sensoren (NIR) des Typs EVK HELIOS EQ32 der EVK DI Kerschhaggl GmbH. Diese NIR-Sensoren waren am Förderband des Inputs vom Ballistikseparator, am 2D-Produkt-Förderband und an der 3D-Produkt-Rutsche angebracht. Die sich daraus ergebenden Daten wurden im Weiteren verwendet und werden in Abb. 1 dargestellt. Die obere Reihe der Diagramme stellt die Versuche mit dem geschlossenen Paddelbelag dar, während die untere Reihe die Versuche mit einem Paddelbelag von einer Sieblochung von 45 mm zeigt. Hierbei sind die Versuche von links nach rechts in aufsteigender Reihenfolge nach dem angewandten Neigungswinkel angeordnet. Die roten vertikalen Linien in den Diagrammen markieren jeweils den Übergang zu einer höheren Rotationsgeschwindigkeit. Eine detaillierte Analyse des Prozessverhaltens der hier zeitlich aufgelösten Daten findet sich in Spies et al. (2024).

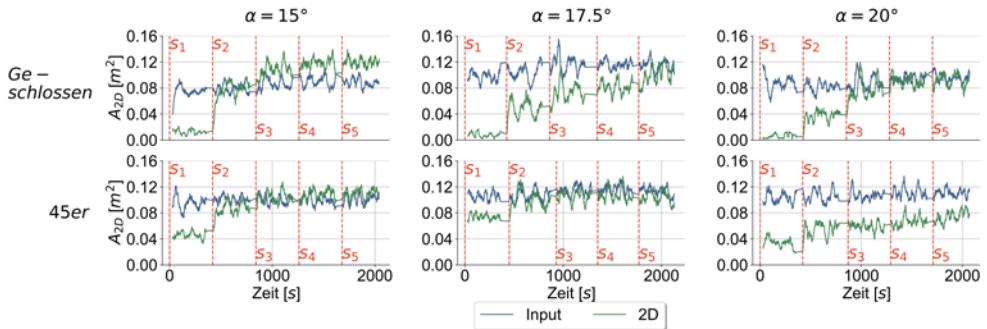


Abbildung 1: Flächendurchsatz des 2D-Materials pro Sekunde mit gleitendem Mittelwert über 30s im Input und 2D-Produkt, aufgezeichnet und klassifiziert mit der EVK HELIOS EQ32 (EVK, 2023).

2.2 Training der Machine-Learning-Modelle

Der vorherzusagende $TK_{a,i}$ beschreibt dabei, wie sich der Flächenstrom einer Materialklasse i zwischen den Produktfraktionen aufteilt (Brunner & Rechberger, 2016). Dieser Koeffizient wurde bereits zur Vorhersage des Sortierverhaltens eines sensorbasierten Sortierers in Kroell et al. (2024) verwendet. Beim Ballistikseparator beschreibt der $TK_{a,i}$ den Anteil der Materialklasse i , der in das 2D-Produkt ausgetragen wird. Die aufgenommenen Daten wurden dabei auf 10 s Basis aggregiert, um Ausreißer zu minimieren. Das Modell basiert vereinfachend auf der Annahme annähernder Flächenerhaltung vom Input zu den Produktfraktionen, eine Annahme, die zukünftig weiter untersucht und validiert werden muss.

Für die Vorhersage der TKs wurde die Random Forest Regression (*RFR*) für eine erste Machbarkeitsuntersuchung gewählt (Breiman, 2001). Diese Methode zeigt in einem Vergleich nach Kroell et al. (2022) eine Überlegenheit gegenüber anderen Machine-Learning Methoden für diesen Forschungsbereich. Zudem zeigt sich basierend auf einem Vergleich nach Grinsztajn et al. (2022), dass Tree-based Ensemble Modelle für tabellarische Datensätze unter 10.000 Datenpunkten effektiver sind als Deep-Learning-Techniken.

Die *RFR* erhält dabei als Merkmale die Zeit (t), die Material Specific Occupation Density vom 2D- oder entsprechenden 3D-Material im Input ($MSOD_{i,Input}$) (Schlögl et al., 2022) und die Rotationsgeschwindigkeit s , um die zeitabhängigen $TK_{a,i}$ -Werte zu bestimmen (Formel 1). Die TKs wurden dabei sowohl für das 2D- und 3D-Material bestimmt als auch für alle Konfigurationen des Ballistikseparators, wodurch sich zwölf Modelle ergeben.

$$TK_{a,i}(s) = \frac{\dot{A}_{i,2D-Produkt}}{\dot{A}_{i,Input}} \approx \frac{\dot{A}_{i,2D-Produkt}}{\dot{A}_{2D,2D-Produkt} + \dot{A}_{2D,3D-Produkt}} = RFR_i(t, MSOD_{i,Input}, s) \quad (1)$$

Für die robuste Modellvalidierung wurde ein Train-Test-Split verwendet, bei dem die Rotationsgeschwindigkeiten s_1 bis s_4 für das Training (80%) und s_5 für die Testdaten (20%) genutzt wurden.

3 Ergebnisse und Diskussion

In Abb. 2a ist visualisiert, wie sich die gewählten Merkmale über die Zeit verhalten und wo genau der Train-Test-Split vollzogen wurde. In Abb. 2b wird das daraus beispielhafte Modell für den $TK_{\alpha,2D}$ vom Ballistikseparator ($\alpha = 17.5^\circ$, $l = 45er$) über der Zeit ersichtlich.

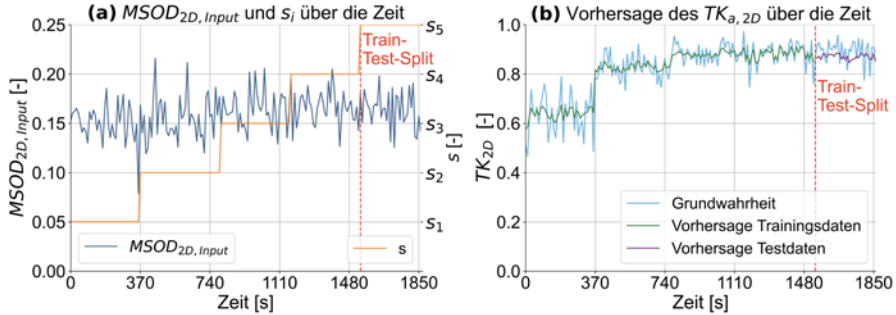


Abbildung 2: RFR_{2D} des $TK_{\alpha,2D}$ für den Ballistikseparator mit der Konfiguration ($\alpha = 17.5^\circ$, $l = 45er$)

Die zwölf trainierten Modelle wurden eingesetzt, um die TKs des 2D- und 3D-Materials im 2D-Produkt vorherzusagen und die Reinheit $P_{\alpha,2D,2D-Produkt}$ auf den Testdaten (s_s) zu bestimmen (Formel 2).

$$P_{\alpha,2D,2D-Produkt} \approx \frac{TK_{\alpha,2D} \cdot \dot{A}_{2D,Input}}{TK_{\alpha,2D} \cdot \dot{A}_{2D,Input} + TK_{\alpha,3D} \cdot \dot{A}_{3D,Input}} \quad (2)$$

In Abb. 3a zeigen sich die prognostizierten Reinheiten $P_{\alpha,2D,2D-Produkt}$ für verschiedene Konfigurationen am Ballistikseparator. Generell können die Modelle den Zusammenhang abbilden, dass ein 45er Paddelbelag zu besseren Reinheiten im 2D-Produkt führt (Spies et al., 2024). Hierfür konnte ein Bestimmtheitsmaß (R^2) von 0.64 erreicht werden, was auf eine moderate Korrelation zwischen den prognostizierten und den tatsächlichen Werten hinweist.

In den Abb. 3b und c sind die TKs für die verschiedenen Konfigurationen dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Modelle dazu neigen, Vorhersagen zu treffen, bei denen die Varianz der prognostizierten TKs signifikant geringer ist als die der tatsächlichen TKs . Eine Erklärung für dieses Verhalten ist, dass es aus Sicht des Trainingsprozesses risikoärmer ist, ein Modell zu entwickeln, das Vorhersagen nahe am Mittelwert der Trainingsdaten trifft. In der Folge tendieren die Modelle dazu, konservativere, weniger variable Vorhersagen zu generieren, ein Umstand, der sich in einer geringeren Varianz der vorhergesagten TKs im Vergleich zu den wahren TKs äußert.

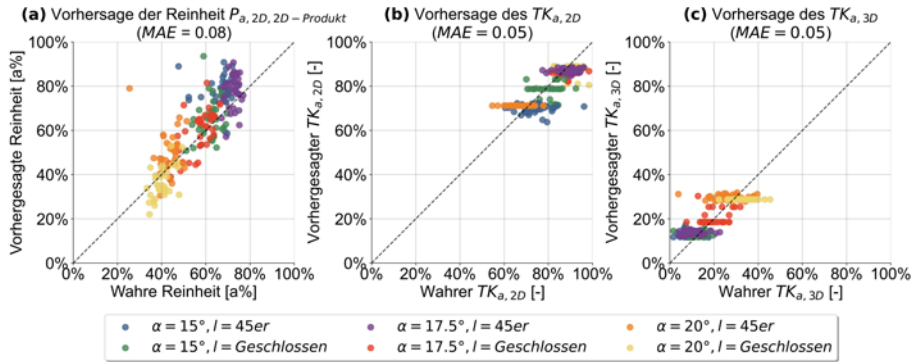


Abbildung 3: Vorhersage von (a) $P_{a,2D,2D}$ -Produkt (b) $TK_{a,2D}$ (c) $TK_{a,3D}$

4 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend wurde demonstriert, dass es möglich ist, mittels sensorbasiertem Prozessmonitoring und etablierten Machine-Learning-Modellen, die flächenbezogene Reinheit (MAE = 0.08) und TKs des 2D- und 3D-Materials (MAE = 0.05) eines Ballistikseparators vorherzusagen. Es ist jedoch anzumerken, dass die erzielte Genauigkeit noch deutlich unter der von sensorbasierten Sortierprozessen ($R^2=0.98$) liegt (Kroll et al., 2024). Dies deutet auf die Notwendigkeit hin, spezialisiertere Modelle einzusetzen. Ziel ist es, den Einfluss der Prozessparameter auf Aggregate, die Materialien nach unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften separieren, mit höherer Genauigkeit zu berücksichtigen. Insbesondere die Entwicklung von Grey-Box-Modellen, wie sie in anderen Forschungsbereichen entwickelt wurden, erscheint als vielversprechende Möglichkeit. Diese Modelle integrieren empirische Daten mit theoretischem Prozesswissen, wie bspw. der Massen- oder Flächenerhaltung, und könnten somit die Vorhersagegenauigkeit, Generalisierbarkeit und Interpretierbarkeit verbessern (Schweidtmann et al., 2024). Die Entwicklung und Integration solcher Prozessmodelle in verschiedene Aggregate der Aufbereitungstechnik könnte zu Steigerungen in Effizienz und Zuverlässigkeit führen, indem eine umfassendere Optimierung der Anlagenauslegung und eine zielgerichtete Regelung im Betrieb ermöglicht wird.

Danksagung

Das Projekt *EnEWA* wird finanziell mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen *03EN2073B* im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms gefördert. Wir bedanken uns bei der STADLER Anlagenbau GmbH und TOMRA Sorting GmbH für die Unterstützung während der durchgeführten Versuche.

Literatur/Quellen

- ANTS. (2023). EnEWA. Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe. <https://www.ants.rwth-aachen.de/cms/IAR/Forschung/Aktuelle-Forschungsprojekte/~topbp/EnEWA/>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Europäische Kommission. (2015). Closing the loop: An EU action plan for the Circular Economy COM/2015/0614 final. <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>
- Europäische Kommission. (2020). Packaging and packaging waste: SUMMARY OF: Directive 94/62/EC on packaging and packaging waste. Europäische Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM%3AI21207>
- EVK. (2023, 4. September). EVK SQALAR - EVK. <https://www.evk.biz/en/products-services/data-analysis-tools/evk-sqalar/>
- Forslund, S. E. (1978). Verfahren und Vorrichtung zur Unterteilung eines Gemisches aus Teilen oder Bruchstücken aus verschiedenen Materialien und von verschiedenen Größen in zwei oder mehrere Fraktionen (DE2803684A1). <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=DE000002803684C2>
- Friedrich, K., Kuhn, N., Pomberger, R. & Koinig, G. (2023). Feasibility Study for Finding Mathematical Approaches to Describe the Optimal Operation Point of Sensor-Based Sorting Machines for Plastic Waste. *Polymers*, 15(21), 4266. <https://doi.org/10.3390/polym15214266>
- Grinsztajn, L., Oyallon, E. & Varoquaux, G. (2022). Why do tree-based models still outperform deep-learning on tabular data? <http://arxiv.org/pdf/2207.08815.pdf>
- Kranert, M. (Hrsg.). (2017). Springer eBook Collection. Einführung in die Kreislaufwirtschaft: Planung – Recht – Verfahren (5. Aufl. 2017). Springer Vieweg. <http://extras.springer.com/2018/978-3-8348-1837-9> <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2257-4>
- Kroell, N., Chen, X., Greiff, K. & Feil, A. (2022). Optical Sensors and Machine-Learning Algorithms in Sensor-Based Material Flow Characterization for Mechanical Recycling Processes: A Systematic Literature Review. 0956-053X, 149, 259–290. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.05.015>
- Kroell, N., Maghroumi, A., Dietl, T., Chen, X., Küppers, B., Scherling, T., Feil, A. & Greiff, K. (2024). Towards digital twins of waste sorting plants: Developing data-driven process models of industrial-scale sensor-based sorting units by combining machine-learning with near-infrared-based process monitoring. *Resources, Conservation and Recycling*, 200, 107257. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107257>
- Letcher, T. (2020). Plastic waste and recycling: Environmental impact, societal issues, prevention, and solutions. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01939-8>
- Brunner, P.H., & Rechberger, H. (2016). Handbook of Material Flow Analysis: For Environmental, Resource, and Waste Engineers, Second Edition (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315313450>
- Schlögl, S., Kamleitner, J., Kroell, N., Chen, X., (2022). *Vorträge-Konferenzband zur 16. Recy & DepoTech Konferenz [Konferenzbeitrag]*. Implementierung von Sensor-based Material flow Monitoring in einer Kunststoffsortieranlage.
- Spies, A. M., Scherling, T., Ludes, A., Kroell, N., Küppers, B., Kaufeld, S., Raulf, K. & Greiff, K. (2024). Abtrennung von Papier aus Kunststoffgemischen: Parameterstudie mittels kontinuierlicher Stoffstromüberwachung zur optimierten Einstellung eines Ballistikseparators. In Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V. (Hrsg.), Bockreis, Faulstich et al. (Hg.) – 13. DGAW-Wissenschaftskongress Abfall- Und Ressourcenwirtschaft. (Erstveröffentlichung 2024)

Schweidtmann, A. M., Zhang, D., & Von Stosch, M. (2024). A review and perspective on hybrid modelling methodologies. *Digital Chemical Engineering*, 10, 100136. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100136>

Kontakt

M. Sc., Tabea Scherling, wissenschaftliche Mitarbeiterin

RWTH Aachen University / Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe

Tel.-Nr.: +49 241 8022771

E-Mail: tabea.scherling@ants.rwth-aachen.de

Homepage: www.ants.rwth-aachen.de

Charakterisierung eines mobilen Ballistik-Separators: Methodisches Vorgehen, großtechnische Versuchsdurchführung und statistische Auswertung

Abstract: Um die ambitionierten Recyclingziele der EU zu erreichen, soll sich die Abfallwirtschaft in den nächsten Jahren zu einer effizienten, digitalisierten und dynamischen Wirtschaft weiterentwickeln. Dies bringt hinsichtlich des heterogenen Materialstroms – gemischter Siedlungs- und Gewerbeabfall, welcher variabel in Form, Größe und Zusammensetzung ist –, Herausforderungen mit sich. Eine optimierte Betriebsweise von Abfallbehandlungsmaschinen könnte zu einer Qualitätssteigerung des Produktstroms einer Abfallbehandlungsanlage führen und dabei helfen die Recyclingziele zu erreichen. Zur Leistungsmessung dieser Maschinen und Ermittlung der Optimierungspotenziale können großtechnische Versuche unter realen Bedingungen, welche unter anderem durch die Verwendung von realen Materialien (gemischten Abfällen) gewährleistet sind, herangezogen werden. Um Materialeinflüsse auf verschiedene Maschineneinstellungen möglichst gering zu halten, wurde für diese Studie ein Materialbatch hergestellt. Im Fokus dieser Arbeit steht ein ballistischer Separator, welcher in einer Parameterstudie untersucht werden soll. Mithilfe eines dafür ausgearbeiteten statistischen Versuchsplans soll die Umsetzung großtechnischer Versuche als Ergebnis optimale Einstellungen des Ballistikseparators hinsichtlich unterschiedlicher Fragestellungen bringen.

1 Einleitung

Resultierend aus dem ständig wachsenden Abfallvolumen und dem Trend zur verstärkten Verwertung hat sich die Abfallwirtschaft in den letzten Jahrzehnten von einer reinen Entsorgungsbranche zu einer verarbeitenden Industrie mit Fokus auf sekundäre Rohstoffe und Energie entwickelt (Sarc et al., 2019). Nachhaltiges, verbessertes Recycling und energetische Verwertung von Siedlungs-, Gewerbe- und Verpackungsabfällen gehören zu den obersten Prioritäten der Europäischen Union. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen der Europäischen Union, z.B. das Paket zur Kreislaufwirtschaft, sehen bis zum Jahr 2035 unter anderem eine Recyclingrate von 65% der Siedlungsabfälle vor (Europäische Kommission, 2018).

Die Heterogenität gemischter Abfälle in Zusammensetzung und Korngröße bringt Herausforderungen in der Behandlung mit sich, z.B. wird die Beschreibung des Stoffstroms und dadurch die Modellierung von möglichen Optimierungsprozessen erschwert. Im Weiteren erfordert die Inhomogenität gemischter Abfälle bei der Durchführung von Versuchen eine Verarbeitung großer Mengen an Material, um die Variabilität des Inputstroms in Bezug auf Zusammensetzung und Korngröße zu berücksichtigen. Um eine effiziente

Versuchsdurchführung zu ermöglichen, wurde die Idee der Verwendung eines Materialbatches (bekannter Zusammensetzung und Korngrößenverteilung) geboren, um somit eine Beschreibung der Performance des ballistischen Separators effizient und unter realen Bedingungen (mit gemischtem Gewerbeabfall) zu ermöglichen.

Um eine optimierte Betriebsweise einer Abfallbehandlungsanlage bzw. der dort eingesetzten mechanischen Aufbereitungsmaschinen zu ermöglichen, müssen die wichtigsten Maschinenparameter und deren Einflüsse auf das zu behandelnde Material und dadurch auf nachfolgende Maschinen bekannt sein. Der in dieser Arbeit im Fokus stehende Ballistikseparator wird in der Abfallwirtschaft eingesetzt, um Materialien hinsichtlich ihres ungleichmäßigen ballistischen Verhaltens (d.h. Partikelform) zu trennen. Das Trennprinzip des ballistischen Separators beruht auf Stoffeigenschaften wie Gewicht, Form, Größe und Elastizität und dem dadurch resultierenden unterschiedlichen Bewegungsverhalten des Materials auf den bewegten Maschinenteilen, den sogenannten „Paddeln“. Die Paddel haben zusätzlich eine Lochung, somit wird auch eine Siebung des Materials erwirkt. Dabei entstehen drei Fraktionen: eine 2-dimensionale Fraktion (2D, wie z.B. Papier, Kunststofffolien), eine 3-dimensionale Fraktion (3D, wie z.B. Dosen, Holz, Flaschen) und eine Siebfraktion (Feingut) (Martens und Goldmann, 2015). Durch Änderungen der Maschineneinstellungen des Ballistikseparators (z.B. Drehzahl und Winkel der Paddel) kann die Trennwirkung beeinflusst und an benötigte Trennqualitäten angepasst werden. Mithilfe einer Parameterstudie soll durch methodisches Vorgehen und die Durchführung großtechnischer Versuche eine optimale Einstellung des Ballistikseparators hinsichtlich unterschiedlicher Fragestellungen untersucht werden, z.B. maximaler Durchsatz bei minimalen Qualitätsverlusten (d.h. Reinheit der jeweiligen 2D- bzw. 3D-Fraktion). Durch die Charakterisierung der Maschine und die Ermittlung der Leistungsfähigkeit sollen gezielte Verbesserungen zur Effizienzsteigerung ermöglicht werden. Weiters soll sichergestellt werden, dass die Maschine und im späteren die gesamte Anlage die erforderlichen Qualitätsstandards (z.B. optimale Trennung der Fraktionen) erfüllen.

2 Methodik

Eine grobe Darstellung der Herangehensweise an die Charakterisierung eines ballistischen Separators ist in Abbildung 1 gegeben. Wobei in dieser Arbeit besonders auf die Herstellung des Batchmaterials als Teil des methodischen Vorgehens eingegangen wird.

2.1 Methodisches Vorgehen

Da es sich in dieser Arbeit um die Umsetzung großtechnischer Versuche handelt, werden Maschinen verwendet, die dem Maßstab jener in realen Anlagen entsprechen. Es muss eine intensive und detaillierte Planung der Versuche erfolgen. Diese inkludiert die Auswahl eines geeigneten Versuchsmaterials, die Planung der Koordination von Personen, Maschinen und Sensorik sowie die Erstellung eines statistischen Versuchsplans, um Anzahl, Reihenfolge und Parametereinstellungen der Versuche zu ermitteln. Als Versuchsmaterial wird gemischter Gewerbeabfall verwendet, welcher aus Vorversuchen gewonnen und durch Probenahme, Sieb- und Sortieranalyse charakterisiert wurde. Die Herstellung des Materialbatches gilt als wesentlicher Teil des methodischen Vorgehens und wird im Folgenden näher beschrieben.

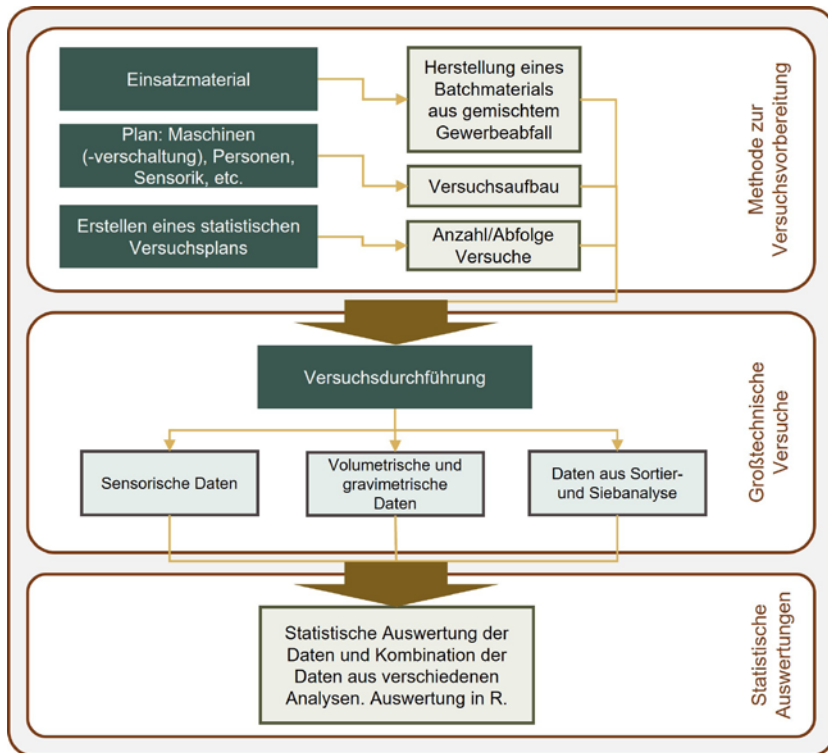


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Charakterisierung eines ballistischen Separators

2.1.1 Herstellung des Materialbatch

Mit der Prämisse, die Heterogenität des gemischten Gewerbeabfalls abzudecken und daher aus einer größeren Menge (ca. 10 Tonnen gemischter Gewerbeabfall) eine Teilmenge zu gewinnen, welche die gesamte Menge möglichst repräsentieren soll, wurde ein Versuchsplan zur Gewinnung eines Materialbatches umgesetzt. Ziel war es, eine Gesamtmasse von 1500kg an Material zu erzeugen, welche eine durch Beprobung bekannte Materialzusammensetzung und Korngrößenverteilung hat. Der Feinanteil (Korngröße <60mm), wird von dieser Materialmenge entfernt (mittels Absiebung durch den ballistischen Separator selbst), da für weitere Versuche das Feingut nicht betrachtet wird bzw. das Absieben die Handhabung erleichtert. Demzufolge sollte eine Menge des Materialbatches ohne Feingut von ca. 600kg entstehen; Annahme 40% des Materials sind >60mm (Khodier et al., 2020). Diese Menge ist für weitere Versuche einerseits ausreichend groß, um eine sinnvolle Versuchsdauer zu sichern und andererseits klein genug, um eine komfortable Handhabung zu ermöglichen. Zur Erreichung der Masse des Batchs wird 20x 26s Material aufgefangen, wobei davor und danach jeweils 2s beprobt wird (vergl. Abbildung 2). Die gewonnenen Inkremente (insgesamt 20 Stück) resultieren in einer Gesamtprobe mit der Masse von ca. 380kg. Der gewonnene Materialbatch wird bis zur Versuchsdurchführung zur Charakterisierung des ballistischen Separators in einem Container zwischengelagert.



Abbildung 2: Zeitliche Abfolge der Versuchsdurchführung, mit Probenahmezeiten (PN) und der Zeitspanne zur Gewinnung des Materialbatches (BATCH)

2.1.2 Planung Einsatz und Koordination Maschine, Personen und Sensorik

Erste Planungen der Versuche fanden bereits im Jahr 2022 statt, um Maschinen- und Sensorverfügbarkeiten sicherzustellen. Die detailliertere Planung, in welcher auch intensiv Projektpartner involviert sind, erfolgte ab Anfang 2023, dort wurden Maschinen-, Personal- und Sensorunterstützung und die Vernetzung der Maschinen sowie der dazugehörigen Infrastruktur besprochen.

2.1.3 Statistischer Versuchsplan

Da verschiedene Einstellungen am Ballistikseparator (z.B. Drehzahl und Winkel der Paddel) untersucht werden sollen und dies eine möglichst effiziente Versuchsdurchführung erfordert, wurde ein statistischer Versuchsplan mittels Design-Expert durchgeführt. Nach diesem Versuchsplan sollen 25 Versuche mit unterschiedlichsten Einstellungen in einer definierten Reihenfolge durchgeführt werden.

2.2 Großtechnische Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau beinhaltet folgende Maschinen: ballistischer Separator, jenem ist am 3D-Austragsband eine Maschine nachgeschaltet, welche Volumenstrom und Massenstrom misst. Nachfolgend gelangt das Material in das Digital-Waste-Research-Lab (DWRL) – näher beschrieben in Kandlbauer et al. (2023) –, in welchem diverse Sensorik zur Materialcharakterisierung vorhanden ist. Der Austrag des 2D-Bandes wird aufgefangen, verwogen und sensorisch vermessen, das Feingut (falls nicht alles durch Absiebung entfernt) wird verwogen.

2.3 Statistische Auswertung & Ausblick

Für die Beurteilung der Performance des ballistischen Separators werden folgende Daten herangezogen: Daten aus volumetrisch, gravimetrisch und sensorischen Messungen sowie Daten aus Sieb- und Sortieranalysen. Daraus wird z.B. mittels R (einer Programmiersprache für statistische Berechnungen und Grafiken) die Auswertung der Daten durchgeführt, womit eine optimierte Betriebsweise des ballistischen Separators gefunden werden soll.

Danksagung

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

Literatur/Quellen

- Europäische Kommission, 2018. Kreislaufwirtschaft: Neue Vorschriften – EU übernimmt globale Vorreiterrolle in Abfallbewirtschaftung und Recycling. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_18_3846.
- Kandlbauer, L., Sarc, R., Pomberger, R., 2023. Großtechnische experimentelle Forschung im Digital Waste Research Lab und Digitale Abfallanalytik und -behandlung. Österr Wasser- und Abfallw. <https://doi.org/10.1007/s00506-023-00999-1>.
- Khodier, K., Viczek, S.A., Curtis, A., Aldrian, A., O’Leary, P., Lehner, M., Sarc, R., 2020. Sampling and analysis of coarsely shredded mixed commercial waste. Part I: procedure, particle size and sorting analysis. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 17, 959–972. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02526-w>.
- Martens, H., Goldmann, D., 2015. Manuelle und mechanische Verfahrenstechniken zur Aufbereitung von Abfällen und zur Schadstoffentfrachtung, in: Martens, H., Goldmann, D. (Eds.), *Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis*, 2nd ed. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, pp. 27–68.
- Sarc, R., Seidler, I.M., Kandlbauer, L., Lorber, K.E., Pomberger, R., 2019. Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry - Update 2019. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 37, 885–897. <https://doi.org/10.1177/0734242X19862600>.

Kontakt

Dipl.-Ing., Tatjana Lasch, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes

Tel.-Nr. 03842 402 5141

E-Mail: tatjana.lasch@unileoben.ac.at

Homepage: <https://www.vtiu-unileoben.at>

Methoden zur Optimierung der Sortierung von Kunststoffverpackungsfolien

Abstract: Die Verbesserung der Sortierbarkeit von Kunststoffverpackungsfolienabfällen (PPFW) ist von entscheidender Bedeutung für die Steigerung der Recyclingquote in Österreich, da sie 150.000 t der jährlich produzierten 300.000 t Kunststoffverpackungsabfälle ausmachen. In dieser Arbeit wird eine Adaption für Nahinfrarotsortierer gezeigt, die die Spektralqualität von Folienverpackungen so weit verbessert, um den Einsatz von Klassifikationsmodellen zu ermöglichen. Diese Modelle erreichen durch Feature Selection inline-taugliche Inferenzzeiten und Klassifikationsgenauigkeiten von 85%. Die gezeigten Ergebnisse erlauben die Verbesserung des Recyclings von Kunststoffverpackungsfolien mit minimalem Eingriff in bestehende Hardware und ermöglichen so eine Erstellung einer reinen Monolayerfolienfraktion für das mechanische Recycling sowie einer reinen Mehrschichtfraktion als Feedstock für derzeit in der Entwicklung befindliche Methoden des chemischen Recyclings. Dies kann die Kreislaufwirtschaft von Kunststoffen verbessern, CO₂ Emissionen reduzieren und Ressourcen nutzen, die bisher thermisch verwertet wurden.

1 Einleitung

In Österreich fallen jährlich etwa 149.000 t an Kunststofffolien als Verpackungsabfall an. Dies entspricht etwa 50% der jährlich in Verkehr gesetzten Kunststoffverpackungen (van Eygen, 2018). Von diesen werden nur etwa 18% stofflich als Regranulat wiederverwertet und der Rest thermisch verwertet. Die für die Nutzungszeit gewünschten Packmitteleigenschaften werden durch geringste Schichtdicke, Komposit-Aufbau und Materialkombinationen erreicht. Diese Eigenschaften erlauben die Erfüllung einer Vielzahl an Aufgaben, wie Produktschutz, Gasimpermeabilität, Bedruckbarkeit und Handhabbarkeit in einer kompakten Verpackung bei gleichzeitig idealem Produkt- zu Verpackungsmasseverhältnis. Gleichzeitig stellen diese Eigenschaften im Recycling am Ende der Lebensdauer eine Herausforderung dar. So führt die geringe Schichtdicke während der Nahinfrarotsortierung zu geringer Spektralqualität und einem schlechten Signal-Rausch-Verhältnis, während die Vielzahl an möglichen Polymerkombinationen den Einsatz neuer Klassifikationsmodelle erfordern. Einführend wurden die Einflüsse einer verbesserten Sammlung, Sortierung und Wiederverwendung von Folienverpackungen im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse (LCA) abgeschätzt. Weiters wurden flexible Verpackungen aus der getrennten Sammlung in Österreich mittels Fourier-Transformations-Infrarot (FTIR) auf ihre Materialkombinationen untersucht. Anschließend wurde die Messgeometrie des institutseigenen Nahinfrarotsortieraggregats angepasst und mit diesem Spektralaufnahmen der Verpackungen angefertigt. Um die notwendige Inferenzzeit während eines Inline-Klassifikationsprozesses zu erreichen, wurden die Spektraldaten auf ihre Relevanz und Redundanz hin untersucht und auf Basis dieser Evaluierung nach ihrer Vorhersagekraft gereiht.

2 Methodik

2.1 Sensorgestützter Sortierstand im Industriemaßstab

Das in dieser Studie verwendete Nahinfrarotsortieraggregat ist ein Rutschensortierer. Dieses Aggregat ermöglicht den Zugriff auf den von der NIR-Smart-Kamera erstellten Datenstrom via GigeCam / GenICam Schnittstelle. Bei der NIR-Kamera handelt es sich um eine EVK G2 Hyperspectral Imaging-Kamera, die eine Spektralerfassung in einem Spektralbereich von 900 nm bis 1700 nm in einer Auflösung von 312 Pixeln über die Arbeitsbreite von 50 cm und 220 Spektralpunkten über den Spektralbereich ermöglicht.

2.2 Probenklassifikation mittels FTIR

Um eine Grundlage für die Modellerstellung zu generieren, wurden die einzelnen Folienverpackungsobjekte mittels FTIR klassifiziert. Die Objekte wurden hierfür nach ihren Hauptbestandteilen eingeteilt. Haftvermittler und Folienkomponenten geringer Dicke, wie etwa EVOH-Anteile, wurden für die Erstellung der Einteilung nicht berücksichtigt. Die Heterogenität der Mehrschichtfraktion spiegelt sich in der hohen Anzahl an verwendeten Proben wider. Die so klassifizierten Proben wurden in Einschichtfolien und Mehrschichtfolien eingeteilt und als Datengrundlage für die Erstellung des Klassifikationsmodells verwendet.

2.3 Ersatz der üblichen Reflektionsmessungen durch Transflekction

Existierende Untersuchungen haben gezeigt, dass die spektrale Qualität von Folienverpackungen bei der Aufzeichnung in Reflektion nicht für die Klassifizierung durch NIRS geeignet ist. Dieses Problem kann gelöst werden, indem die Messgeometrie auf Transflekction geändert wird (*Chen et al., 2020; Koinig et al., 2022a*). Daher wurde ein Reflektor implementiert, der einen zweiten Durchgang der Strahlung ermöglicht und den Verlust durch Transmission minimiert. Der Reflektor besteht aus Kupfer, da dieses eine hohe Reflektivität im NIR-Spektralbereich aufweist, gleichzeitig aber keinen spektralen Fingerabdruck besitzt. (*Cui, 2011*). Abbildung 1 zeigt das Prinzip der Transflekctionsmessung von Folienverpackungen.

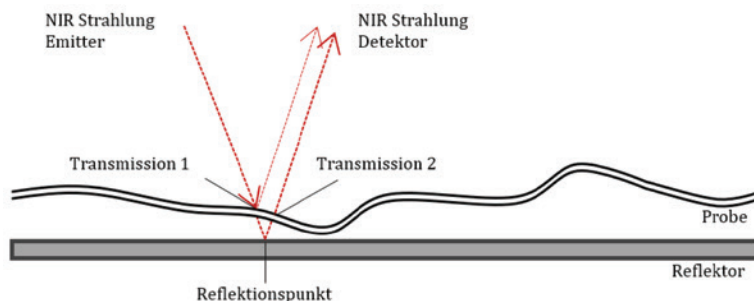


Abbildung 1: Transflekction

2.4 Klassifizierung mit Methoden des Maschinellen Lernens

Die erhöhte spektrale Qualität wurde als Grundlage für die Erstellung von Klassifikationsmodellen genutzt. Diese Modelle treffen die Vorhersage unabhängig von der tatsächlichen Materialzusammensetzung, um einschichtige von mehrschichtigen Filmen unterscheiden können. Dies wirkt der Notwendigkeit entgegen, große Spektraldatenbanken zu erstellen, um die immense Anzahl möglicher Kombinationen der Schichtzusammensetzung abzudecken. Alle für diese Arbeit notwendigen Berechnungen wurden in Matlab, Version 9.13.0.2105380 (R2022b) Update 2, mit konventioneller Hardware durchgeführt. Alle Berechnungen wurden auf der CPU durchgeführt. Die CPU dieser Workstation ist ein Intel Core i5-4570 mit einer Taktung von 3,20 GHz. Diese Hardwareeinschränkungen machten es notwendig, durch Variablenauswahl die Inline-Anwendung des erstellten Modells auf begrenzter Hardware zu ermöglichen.

2.4.1 Feature Selektion mittels MRMR und PCA und Erstellung eines Klassifikationsmodelles

Es wurden verschiedene Klassifikatoren erstellt und hinsichtlich ihrer Inferenzlatenz und Vorhersagegenauigkeit verglichen. Davon wurde ein flaches neuronales Netzwerk zur weiteren Analyse ausgewählt (*Koinig et al., 2022b*). Um die Inferenzzeit auf das notwendige Maß zu verringern, wurde neben einer einfachen Architektur eine Auswertung der 220 Spektraldatenpunkte auf ihre Vorhersagegenauigkeit durchgeführt. Im ersten Schritt wurden die Spektraldaten mittels PCA und MRMR auf ihren Beitrag zur Klassifikation hin untersucht. Um die resultierende Genauigkeit und Inferenzzeit mit einer reduzierten Anzahl von Eingabeparametern zu messen, wurde der Trainings- und Testschritt mit jeder Anzahl von Eingabeparametern wiederholt und zur weiteren Auswertung aufgezeichnet. Bei der Erstellung dieser Modelle wurde eine Aufteilung von 80 % Trainingsdaten und 20 % Testdaten verwendet (*Nguyen et al., 2021*). Um die Robustheit des Modells auf neue, unbekannte und live aufgezeichnete Daten zu ermitteln, wurden die Validierungsversuche direkt von der NIR-Kamera über die GigeCam Schnittstelle an den Rechner übermittelt und live als klassifizierte Bilder ausgegeben.

3 Resultate

3.1 Ergebnisse der LCA

In der diesen Arbeiten vorangegangenen LCA wurde ein Einsparungspotential des während der Produktion erzeugten CO₂-eq für die funktionelle Einheit von 1000 kg Folienverpackungen von etwa 34% ermittelt. Dieser Berechnung liegt die Annahme zugrunde, dass die gegebenen Ziele für die Recyclingquoten bis 2025 in dieser Fraktion erreicht werden. Dies entspricht einem Netto-Einsparungspotential der funktionellen Einheit von 1100 kg CO₂-eq. Werden die gegebenen Ziele bis 2030 erreicht, erhöht sich dieses Einsparungspotential auf 40% (1300 kg CO₂-eq).

3.2 Verbesserte Spektralqualität

Abbildung 2 zeigt einen Vergleich der Spektralqualität einer konventionellen PE-Verpackungsfolie gemessen in Transfektion (links) und Reflektion (rechts). Die Darstellung zeigt die Mittelwertspektren des Objektes sowie den Schwankungsbereich der zugrundeliegenden Spektren. Es ist ersichtlich, dass das Spektrum in Transfektion weitaus stärker ausgeprägte charakteristische Peaks in den relevanten Spektralbereichen besitzt. Weiters ist die Signal-to-Noise Ratio des Signals verbessert und es werden kleine Unterschiede sicht-

und verwendbar. Hierdurch lassen sich kleine spektrale Unterschiede, wie sie etwa durch den Übergang zwischen den optisch unterschiedlichen Medien in Mehrschichtfolien entstehen, nutzen.

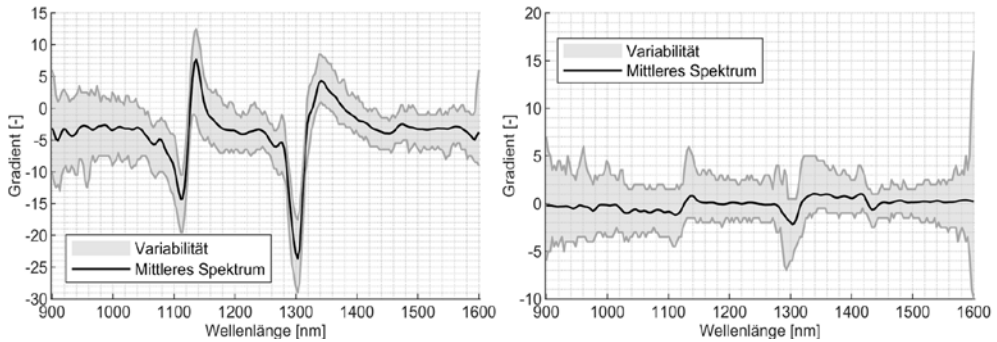


Abbildung 2: Verbesserte Spektralqualität durch Transfektion

3.3 Reduktion der Inferenzzeit und Inline Klassifikation Vorhersagegenauigkeit

Die Reduktion der Inputparameter gemäß des Rankings mittels MRMR reduzierte die Anzahl an notwendigen Datenpunkten von 220 auf 83. Diese Auswahl zeigte sich nach Auswertung der Inferenzzeit und Vorhersagegenauigkeit als Idealwert. In diesem Fall konnte eine Vorhersagegenauigkeit von etwa 85% erreicht werden, während die Inferenzzeit um etwa 2/3 reduziert werden konnte. Die Anwendung des erstellten Klassifikationsmodells direkt am Nahinfrarotsortieraggregat bestätigte diese errechneten Werte. Abbildung 3 zeigt klassifizierte Bilder sowie die dazugehörigen Partikel. Als Mehrschichtfolie identifizierte Objekte werden in Rot, Einschichtfolien in Grün dargestellt.

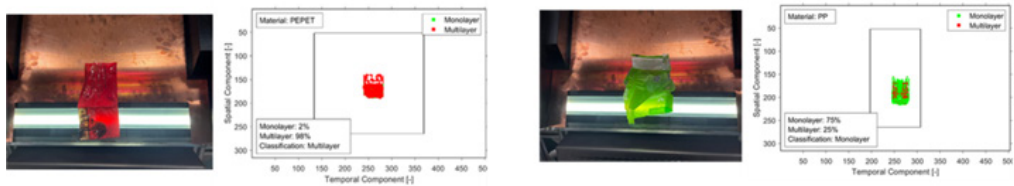


Abbildung 3: Klassifizierte Bilder der Inline-Klassifikation

Danksagung

Das Projekt *Flex4Loop* wird durch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert.

Literatur/Quellen

- Chen, X., Kroell, N., Feil, A., & Pretz, T. (2020). Determination of the composition of multilayer plastic packaging with NIR spectroscopy. In *Detritus* (Issue 13, pp. 62–66). Eurowaste SRL. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.14027>
- Cui, Y.X., 2011. Study and Development of near-Infrared Reflective and Absorptive Materials for Energy Saving Application. Carlton University, Ottawa, Ontario. ISBN: 978-0-494-87749-4. Doctoral thesis.
- Koinig, G., Friedrich, K., Rutrecht, B., Oreski, G., Barretta, C., & Vollprecht, D. (2022a). Influence of reflective materials, emitter intensity and foil thickness on the variability of near-infrared spectra of 2D plastic packaging materials. In *Waste Management* (Vol. 144, pp. 543–551). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.019>
- Koinig, G., Kuhn, N., Barretta, C., Friedrich, K., & Vollprecht, D. (2022b). Evaluation of Improvements in the Separation of Monolayer and Multi-layer Films via Measurements in Transfection and Application of Machine Learning Approaches. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 19, p. 3926). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym14193926>
- Nguyen, Q. H., Ly, H.-B., Ho, L. S., Al-Ansari, N., Le, H. V., Tran, V. Q., Prakash, I., & Pham, B. T. (2021). Influence of Data Splitting on Performance of Machine Learning Models in Prediction of Shear Strength of Soil. In Y.-S. Shen (Ed.), *Mathematical Problems in Engineering* (Vol. 2021, pp. 1–15). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2021/4832864>
- Van Eygen, E., Laner, D., & Fellner, J. (2018). Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in Austria. *Waste Management* (New York, N.Y.), 72, 55–64. doi:10.1016/j.wasman.2017.11.040

Kontakt

Dr. Mont., Gerald Koinig, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel: +43 3842 / 402-5143

E-Mail: gerald.koinig@unileoben.ac.at

Homepage: <https://www.avaw-unileoben.at/>

Entwicklung eines Systems zur automatischen Sortierung von Lithium-Ionen-Batterien anhand ihres Kathodenaktivmaterials

Abstract: Auf der Suche nach nachhaltigen Energiespeicherlösungen und Umweltschutz ist die Verwertung von Altbatterien zu einem wichtigen Thema geworden. Batterien, insbesondere Lithium-Ionen-Batterien (LIB), werden in einer Vielzahl von Geräten verwendet und sind ein wesentlicher Bestandteil des alltäglichen Lebens. Durch die wachsende Bedeutung von Batteriespeichern besteht ein dringender Bedarf an nachhaltigen Recyclingverfahren, um die Materialien effizient zurückzugewinnen, Umweltauswirkungen minimieren und die Kreislaufwirtschaft unterstützen zu können. Während die derzeitigen LIB-Recyclingverfahren nur für einzelne Kathodenaktivmaterialien ausgelegt sind, existieren aktuell jedoch keine Verfahren oder Anwendungen zur Vor-Sortierung der LIB, weshalb entsprechende Verfahren entwickelt werden müssen. Hierfür können z. B. Röntgentransmission, Röntgenfluoreszenz oder optische Verfahren eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um den Markt für LIBs, die geschätzten Rücklaufmengen und den Stand der Technik der Sortier- und Recyclingverfahren zu analysieren. Zusätzlich wurde eine Inputanalyse für Geräte-LIBs durchgeführt, um mögliche Sortierstrategien zu erarbeiten.

1 Einleitung

Bei der Suche nach nachhaltigen Energiespeicherlösungen sowie der Reduktion der Umweltbelastung ist die Entsorgung von Altbatterien zu einer immer wichtigeren Herausforderung geworden. Batterien treiben eine wachsende Zahl von Geräten an, von tragbarer Elektronik bis hin zu Elektrofahrzeugen. Mit dem europäischen Grünen Deal werden die EU-Mitgliedstaaten dazu verpflichtet, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen (Europäische Kommission 2019). Zur Erreichung dieser Ziele setzen viele Staaten (wie z. B. die der Bundesrepublik Deutschland) auf einen steigenden Einsatz von Batteriespeichertechnologien. Mit dieser zunehmenden Abhängigkeit geht jedoch auch die Notwendigkeit nachhaltiger Recyclingkonzepte einher, welche wertvolle Materialien zurückgewinnen, die Umweltbelastung reduzieren und die Kreislaufwirtschaft unterstützen können. Die mangelnde Versorgungssicherheit bei wichtigen Rohstoffen wie Lithium und Kobalt für die Herstellung von LIB und die ökologischen und sozialen Auswirkungen des Abbaus dieser Rohstoffe führten zu einer Aktualisierung der europäischen Batteriegesetzgebung durch die EU (BattV 2023). Die aktualisierte EU-Batterierichtlinie 2023/1542 zielt nicht nur auf die kritischen Rohstoffe mit steigenden Quoten für das Materialrecycling ab, sondern setzt auch Standards für die Verwendung von Rezyklaten bei der Herstellung neuer LIB (BattV 2023). Die Recyclingprozesse, die zur Erreichung dieser angepassten Recyclingziele notwendig sind, verwenden derzeit nur Monochargen einzelner, individueller Kathodenaktivmaterialien (KAM). Allerdings gibt es derzeit keine Kennzeichnung für das KAM jeder einzelnen LIB-Zelle, und

die Sortierung erfolgt nur für einzelne Batterietypen, wie LIB, Blei, Alkali-Mangan usw. Eine entsprechend notwendige Sortierung nach KAM wird derzeit nicht vorgenommen.

2 Stand der Technik: Sensorbasierte Sortierung

Sensorbasierte Sortiertechnologien (SBS) bieten Lösungen für präzise und effiziente Trennverfahren in der Abfallwirtschaft. Diese Technologien verwenden diverse Sensoren, um Materialien anhand spezifischer Merkmale wie Zusammensetzung, Dichte und Form zu analysieren und zu kategorisieren. Bei der Röntgentransmissionstechnologie (XRT) werden Röntgenstrahlen bei einer bestimmten Wellenlänge emittiert, welche mit der Partikelmasse interagieren (Neubert, Wotruba 2017). Der Grad der Absorption liefert Einblicke in die Materialdichte und -zusammensetzung (Sterkens et al. 2021). XRT-Sortiersysteme werden hauptsächlich für die Trennung von schweren und leichten Metalle wie Aluminium und Kupfer eingesetzt (Robben et al. 2020). Moderne XRT-Sortiersysteme weisen häufig „Dual-Energy-Systeme“ auf, die Röntgenstrahlen auf zwei Energieebenen emittieren, um das Sortieren unabhängig von der Objektstärke zu verbessern (Luo et al. 2022). Die Röntgenfluoreszenztechnologie (XRF) nutzt den photoelektrischen Effekt zur Charakterisierung von Elementen in einzelnen Objekten (Weiss 2011). Der Prozess beinhaltet die Bestrahlung von Objekten mit Röntgenstrahlen, und die resultierende Fluoreszenzstrahlung wird analysiert, um die chemische Zusammensetzung zu bestimmen (Luo et al. 2022). Allerdings ist die XRF-Sortierung auf Oberflächenanalyse beschränkt und somit weniger effektiv für Objekte aus Materialverbundstoffen (Knapp et al. 2014). Die optische Sortierung ist in visuelle Sortierung (VIS), Nahinfrarot-Sortierung (NIR) und 3D-Lasertriangulation (3D-LT) unterteilt (Knapp et al. 2014). Bei der VIS-Sortierung werden Objekte basierend auf Farbe, Transparenz und Helligkeit im sichtbaren Lichtspektrum differenziert. Die NIR-Sortierung hingegen verwendet das Nahinfrarotspektrum, um elementspezifische Merkmale auf der Oberfläche des Objekts zu identifizieren. Die Prompt-Gamma-Neutronen-Aktivierungsanalyse (PGNAA) zeichnet sich durch die Verwendung eines Neutronenstrahls aus, um den Kern von Elementen in einer Probe zu bestrahlen (Luo et al. 2022). Die resultierende neutronenempfangende Reaktion sendet Gammastrahlung aus, was eine hohe Genauigkeit und kontinuierliche Messung ermöglicht und sie für die Prozesskontrolle im Bergbau geeignet macht (Kurth 2020).

3 Methodik

Um die notwendigen Maßnahmen für EoL-Prozesse zu bestimmen und Strategien zur Schließung von Lücken in den heutigen EoL-Prozessketten zu entwickeln, wurden der tatsächliche Aufbau und die Materialzusammensetzung von Elektrowerkzeug-, Handy-, Tablet-, Laptop- und Leichtmobilitätsbatterien untersucht. Dazu wurden an fünf unterschiedlichen Tagen bei zwei Entsorgungsfachbetrieben insgesamt 79 Elektrowerkzeuggatterien (PT-LIB), 5 Leichtmobilitätsbatterien (LMT-LIB) sowie 97 Handy-, Tablet und Laptopbatterien (HL-LIB) manuell analysiert und charakterisiert. Die PT- und LMT-LIB wurden dafür manuell demontiert und in die Kategorien Zellen, Gehäuse, Batteriemanagementsystem (BMS) sowie Schrauben sortiert. Anschließend wurden die Einzelfractionen verworfen und zu einer Massenbilanz addiert. Durch die Bauweise im Pouch-Zellformat wurden die HL-LIB ausschließlich verworfen und die geometrischen Größen dokumentiert. Zusätzlich wurden für alle Batterien die Herstellerinformationen, inkl. Spannung, Kapazität, Leistung und Seriennummer aufgenommen.

4 Inputanalyse post-consumer Lithium-Ionen-Batterien

82 % der PT-LIB enthielten entweder 4, 5, 8 oder 10 einzelne 18650-Zellen mit einem durchschnittlichen Gewicht von 44,79 g pro Zelle. Der Median der PT-LIB enthielt 230 g 18650-Zellen, was 5,1 Zellen pro Akkupack ergibt. Die Mindestanzahl der Zellen in PT-LIB betrug 4, wobei 50 % entweder 4 oder 5 Zellen enthielten. Insgesamt variiert die Anzahl der verwendeten Zellen pro Pack sehr viel stärker als bei anderen Packkomponenten. Dies muss bei weiteren Sortierstrategien berücksichtigt werden. PT-LIB werden mit einer Polymerhülle gebaut, meistens auch mit einem inneren Polymergehäuse für die Stabilität der Zellen während des Transports. Die verwendeten Polymere sind alle technische Polymere wie u. a. PA6, PA66, ABS, PC und HDPE. Im Durchschnitt wurden pro Akkupack 4 Stahlschrauben mit einem Einzelgewicht von je 1 g verwendet. Das restliche verwendete Material ist Aluminium, Kupferkabel und Leiterplatten für das BMS. Die Masse des BMS, des Polymergehäuses und der Schrauben ist bei allen untersuchten Paketen ähnlich. LMT-LIB bestehen, ähnlich wie PT-LIB, aus zwei verschiedenen Gehäusen, einem Innen- und einem Außengehäuse. Der Unterschied besteht darin, dass die LMT-LIB-Gehäusehälften meist aus Aluminium bestehen und nur das Innengehäuse aus technischen Polymeren gefertigt ist. Für die Stabilität wurde in einigen LMT-LIB-Akkupacks Silikon verwendet. Die durchschnittliche Anzahl der in LMT-LIB verwendeten Zellen betrug 40, wobei die Zellenformate 21700 und 18650 verwendet wurden. Wie bei PT-LIB gibt es bei LMT-LIB die größten Unterschiede in der Anzahl der verwendeten Zellen pro Packung, was bei der Untersuchung verschiedener Sortierstrategien berücksichtigt werden muss. Auch das Gehäusematerial variiert bei verschiedenen LMT-LIB. Währenddessen haben HL-LIB nicht nur hohe Leistungsanforderungen, sondern auch hohe geometrische Anforderungen aufgrund des Einbaus in die mobilen Endgeräte. Bei der Einführung von Laptops wurden LIB zunächst in Form von Modulen mit 18650-Zellen verwendet, während bei neueren Modellen hauptsächlich dünne Pouch-Zellen verwendet werden. LIB für Handys und Tablets haben hohe geometrische Anforderungen, vor allem in Bezug auf die Dicke der Zellen. Aufgrund des ähnlichen Designs und der Größe der heutigen Smartphones/Handys haben die rückläufigen Handy-LIB eine ähnliche Größe, während die Laptop-LIB eine hohe geometrische Varianz aufweisen.

5 Schlussfolgerungen

Eine optische Sortierung anhand der Seriennummer und/oder der Zellspannung kann für alle Zell- und Packtypen möglich sein. Dabei sind die größten Herausforderungen die Aktualität und Verfügbarkeit der für die Sortierung notwendigen Datenbank sowie der Zustand der Zellen bzw. Packs. Möglicherweise können die LIB aufgrund ihres äußeren Zustands optisch nicht eindeutig identifiziert und sortiert werden. Um die äußeren Einflüsse minimieren zu können, kann eine Sortierung mittels XRT auf der Grundlage unterschiedlicher, atomarer Dichte der KAM erfolgen. Auch diese Technologie ist für alle Zell- bzw. Packformate umsetzbar. Eine Herausforderung stellen hier die geringen, theoretischen Dichteunterschiede dar. Sowohl XRF, als auch PGNA sind Analysemethoden der Oberfläche, wodurch zylindrische Zellen (wie z. B. die 18650-Zellen aus PT-LIB) als auch LIB-Packs nicht durch diese Technologien nach KAM unterschieden und sortiert werden können. Die dicke Aluminium-, Polymer- bzw. Stahlhülle verhindert ein Eindringen der Röntgen- bzw. Prompt-Gamma-Strahlung. Somit würde ausschließlich das Gehäusematerial identifiziert werden. Da bei Pouch-Zellen nur dünne Zelloberflächen aus Aluminium-Polymer-Verbindungen verwendet werden, kann die XRF-Technologie hier anwendbar sein. Die Röntgenstrahlung kann durch die dünne Schicht der Aluminium-Polymer-Verbindung hindurch strahlen und die spezifische Fluoreszenzstrahlung der schwarzen Masse reflektieren.

6 Zusammenfassung

Die steigende Nachfrage nach LIB in Europa und weltweit führt in den nächsten 15 bis 25 Jahren zu einem exponentiellen Wachstum der EoL-LIB. Die aktualisierte EU-Batterierichtlinie verlangt höhere Rückgewinnungsraten für Materialien wie Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan und Kupfer. Außerdem wird ein verbindlicher Anteil an Recyclingmaterial in der Produktion eingeführt. Aktuelle EoL-Strategien für Altbatterien umfassen Sammelsysteme und Sortieranlagen mit meist manuellen und halbautomatischen Verfahren, um die Altbatterien nach Batterietypen (AIMn, NiMH, LIB usw.) zu sortieren. Eine Sortierung von LIB anhand der verwendeten KAM findet bislang nicht statt. Um Sortierstrategien für ausgediente PT-, LMT- und HL-LIB zu entwickeln, wurden 79 PT-, 5 LMT- sowie 97 HL-LIB analysiert. Darüber hinaus wurden der Stand der Technik der SBS erörtert und mögliche Sortierstrategien für jeden Zell-/Packtyp vorgestellt. Um die möglichen Sortierstrategien bewerten zu können, müssen weitergehende Untersuchungen durchgeführt werden. Die nächsten Schritte dazu umfassen Machbarkeitsstudien zur Unterscheidung von LIB anhand der verschiedenen verwendeten KAM.

Literatur/Quellen

- Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG: Verordnung (EU) 2023/1542, 2023.
- Europäische Kommission, Mitteilung der Kommission: Der europäische Grüne Deal. COM(2019) 640 final, Brüssel, 2019. Online Verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640&qid=1704709442062> (zuletzt aufgerufen am 08.01.2024).
- Knapp, H.; Neubert, K.; Schropp, C.; Wotruba, H. Viable Applications of Sensor-Based Sorting for the Processing of Mineral Resources. *ChemBioEng Reviews* 2014, 1, 86-95, doi:10.1002/cben.201400011.
- Kurth, H. Anwendung von Echtzeit-Elementaranalyse auf Erzförderströme. *AT Mineral Processing* 2020.
- Luo, X.; He, K.; Zhang, Y.; He, P.; Zhang, Y. A review of intelligent ore sorting technology and equipment development. *Int J Miner Metall Mater* 2022, 29, 1647-1655, doi:10.1007/s12613-022-2477-5.
- Neubert, K.; Wotruba, H. Investigations on the Detectability of Rare-Earth Minerals Using Dual-Energy X-ray Transmission Sorting. *J. Sustain. Metall.* 2017, 3, 3-12, doi:10.1007/s40831-016-0069-1.
- Robben, C.; Condori, P.; Pinto, A.; Machaca, R.; Takala, A. X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine. *Minerals Engineering* 2020, 145, 105870, doi:10.1016/j.mineng.2019.105870.
- Sterkens, W.; Diaz-Romero, D.; Goedemé, T.; Dewulf, W.; Peeters, J.R. Detection and recognition of batteries on X-Ray images of waste electrical and electronic equipment using deep learning. *Resources, Conservation and Recycling* 2021, 168, 105246, doi:10.1016/j.resconrec.2020.105246.
- Weiss, M. Resource Recycling in Waste Management with X-ray Fluorescence. Diplomarbeit; Montanuniversität Leoben, Leoben, 2011.

Kontakt

M. Sc. Moritz Petzold, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Fachhochschule Münster, IWARU – Arbeitsgruppe Ressourcen

Tel.-Nr.: 0251-83-65255

E-Mail: m.petzold@fh-muenster.de, Homepage: www.fh-muenster.de/iwaru

TEIL 4

Thermische Verfahren I

Leitung:

Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker

Erfolgreiche Demonstration des einjährigen Messprogramms gemäß § 3 (5) der 1. BImSchV mit Laub-Holz-Pellets als „sonstiger nachwachsender Rohstoff“

Abstract: *In der Vollzugsempfehlung des Bund-/Länder Arbeitskreises für Immissionsschutz (LAI) aus dem Jahr 2017 wurde für den Anwendungsbereich der 1. BImSchV ein einjähriges Messprogramm für sogenannte „sonstige nachwachsende Rohstoffe“ gemäß § 3 (1) Nr. 13 konkretisiert. Im vorliegenden Beitrag wird der Zulassungsprozess exemplarisch für Laub-Holz-Pellets dieses einjährigen Messprogramms an einer geeigneten Biomassefeuerungsanlage durchgeführt. Es konnte erstmalig unter Prüf- und Praxisbedingungen demonstriert werden, dass die Emissionsgrenzwerte der 1. BImSchV sowie die genehmigungsrechtlichen Vorgaben des LAI für Laub-Holz-Pellets mit der eingesetzten Feuerungsanlage unter 100 kW Feuerungswärmeleistung in Kombination mit einem geeigneten Gewebefiltersystem im Vollastbetrieb eingehalten werden können. Auf dieser Basis kann erstmalig ein „sonstiger nachwachsender Rohstoff“ gemäß § 3 (1) Nr. 13 zusätzlich zu den bestehenden Regelbrennstoffen zugelassen werden.*

1 Einleitung

Beim Ausbau der erneuerbaren Wärmeenergie fehlt es derzeit an alternativen Brennstoffen, die neben Holz fossile Brennstoffe kostengünstig ersetzen können. Gleichzeitig führt die Weiterentwicklung der Bioökonomie zu einer steigenden Nachfrage nach hochwertiger und homogener Biomasse, welche die Nachfrage allmählich auf ein breites Spektrum biogener Rohstoffe ausweitet [1]. Dazu gehört auch der verstärkte Einsatz von Holz als Baumaterial, nicht nur in Rundholzqualität, sondern zunehmend auch z.B. in Brettschichtholz oder Holz-Polymer-Verbundwerkstoffen, sodass die Verfügbarkeit von Holz als Festbrennstoff in Zukunft zwangsläufig abnehmen wird. Um diese Lücke zu schließen, können Stoffe wie Parklaub, Grasschnitt oder andere urbane biogene Reststoffe zur Brennstoffproduktion genutzt werden [2,3].

Laub als ein Vertreter dieser nicht-holzartigen Biomassen wird aktuell in den meisten Städten und Kommunen in einfachen, offenen Kompostierungsanlagen mit hohen Emissionen an Treibhausgasen wie Methan und Lachgas entsorgt. Als Rohmaterial für die Biogasproduktion (hoher Ligningehalt) [2] und die Torfersatzherstellung (niedriger pH-Wert) [5] ist es meist ungeeignet. Die bundesweit durchschnittliche saisonale Laubmenge liegt bei ca. 8 kg Laub pro Einwohner bzw. 15 t Laub pro km² Siedlungsfläche [6]. Aufgrund der unterschiedlichen Sammlung und Datenerhebung schwankt das Aufkommen bundesweit stark, kann aber im Schnitt mit ca. 0,6 Mio. t/a basierend auf der Einwohnerzahl bzw. ca. 0,7 Mio. t/a bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche ausgegangen werden [7]. Unbehandelt weisen

biogene Rohmaterialien dieser Art eine Reihe emissions- und verbrennungskritischer Eigenschaften (z.B.: erhöhter CO, NO_x, Gesamtstaubwert) auf und können beim Einsatz in einer nicht geeigneten Verbrennungstechnologie potenziell hohe Emissionen an gasförmigen und partikelgebundenen Emissionen aufweisen [8]. Ausschlaggebend für die umweltgerechte energetische Nutzung derartiger Brennstoffe kann auch eine vorgelagerte Brennstoffaufbereitung sein. Diese könnte dann auch eine gegebenenfalls vorliegende Abfalleigenschaft beenden und zur Bereitstellung normkonformer Brennstoffprodukte nach ISO 172256:2021 [9] mit möglichst niedrigen kritischen Brennstoffinhaltsstoffen führen.

Brennstoffe für die Regelbrennstoffgruppe nach § 3 (1) Nr. 13 der 1. BImSchV können zugleich nur in Verbindung mit einem spezifischen Kesseltyp oder dessen Kesselbaureihe unter Prüfstands- sowie Praxisbedingungen in einem einjährigen Messprogramm zugelassen werden.

Das an die Typprüfung anschließende einjährige Messprogramm muss unter Praxisbedingungen mindestens 1250 Volllaststunden mit einem aus einer einmalig hergestellten Charge Brennstoff umfassen. Innerhalb dieses Messprogramms sind kontinuierlich wiederkehrende Messungen einer nach DIN EN 3035:2021 [10] akkreditierten Messstelle erforderlich. Dabei müssen für die anschließende Begutachtung folgende Emissionsgrenzwerte (normiert auf trockenes Rauchgas bei Normtemperatur und -druck und bezogen auf 13 Vol.% O₂) eingehalten werden [11].

- Gesamtstaub: 0,02 g/m³,
- Kohlenstoffmonoxid (CO): 0,4 g/m³,
- polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD/F): 0,1 ng/m³,
- Benzo[a]pyren (B(a)P), Leitsubstanz für PAK: 0,01 mg/m³.

Gemäß den LAI – Handlungsempfehlungen wird dabei für den Grenzwert von PCDD/F immer der Wert incl. dl-PCB und Toxizitätsäquivalent nach WHO 2005 angegeben.

2 Methodik

Als Rohmaterial wurde unbehandeltes Parklaub und Sägemehl verwendet, um eine Brennstoffcharge in ausreichender Menge für eine Typprüfung und das einjährige Messprogramm zu erzeugen. Das unbehandelte Parklaub wurde im Rahmen der Bewirtschaftung von öffentlichen Flächen und der kommunalen Grünpflege in Süddeutschland (in und um München) im Herbst und Winter 2020 gesammelt und bis zur Weiterverarbeitung im Haufwerk siliert. Insgesamt wurden circa 80 t unbehandeltes Parklaub für die Brennstoffherstellung verwendet. Außerdem wurden 25 t Sägespäne, die sowohl Kiefern- als auch Fichtenholz enthielten, zum Mischen zugekauft. Das Sägemehl hatte einen Feuchte- und Aschegehalt von 10,3 Ma.-% Trockenmasse bzw. 0,3 Ma.-% Trockenmasse.

Der gesamte Brennstoffherstellungsprozess sowie dessen Analytik wurde bereits umfangreich beschrieben und veröffentlicht [3]. Die Brennstoffcharge hatte insgesamt einen Umfang von 51 t, kann im Mischungsverhältnis von 55 Ma.-% Parklaub und 45 Ma.-% Sägemehl die Grenzwerte der ISO 17225-6:2021 [9], Güte B einhalten.

Für die Typprüfung als auch das anschließende einjährige Messprogramm unter Praxisbedingungen ist der Aufbau der Kessel- und Abscheidetechnik identisch. Verwendet wurde ein Kessel der Firma A.P. Bio-

energietechnik GmbH, Typ Ökotherm Compact C1L-80 (siehe Abbildung 1) mit einer Nennwärmeleistung von 80 kW im Volllastbetrieb für den Brennstoff Laub-Holz-Pellets. Abgasseitig ist ein bauaufsichtlich zugelassener Gewebe-Feinstaubabscheider der Firma Hellmich GmbH, Typ HET-B 500-10 mit automatischer, pneumatischer Abreinigung nachgeschaltet. Die Typprüfung wurde nach EN 303-5:2021 [10] durchgeführt und mit folgenden Durchschnittswerten für CO mit 0,02 g/m³, NO_x mit 0,2 g/m³, Gesamtstaub mit 0,001 g/m³ und PCDD/F + dl-PCB mit 0,002 ng/m³ bestanden. Über ein Jahr sind vier Messkampagnen aus jeweils drei Volllastmessungen verteilt. Alle Emissionswerte (auch die der bereits erwähnten Typprüfung) werden auf im Normzustand befindliches, trockenes Abgas mit 13 Vol.% O₂ bezogen.

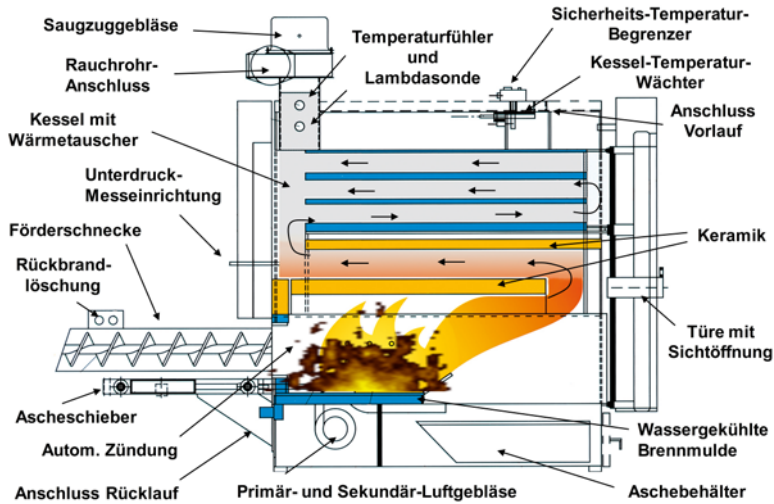


Abbildung 1: Schema der eingesetzten Feuerungsanlage Ökotherm Compact C1L-80;
Erstellt von A. P. Bioenergietechnik GmbH [12]

Die Stickoxid-Emissionen (NO_x) wurden nach DIN EN 14792:2017 [13], die Emissionen des gesamten organischen Kohlenstoffgehalts (Gesamt-C) als Propanäquivalent gemäß DIN EN 12619:2013 [14] sowie die Kohlenstoffmonoxid-Emissionen (CO) nach DIN EN 15058:2017 [15] kontinuierlich nach dem Filter nach Vorgabe von EN 303-5:2021 [10] ermittelt. Die Ermittlung des Gesamtstaubgehaltes im Rauchgas wurde diskontinuierlich nach DIN EN 132841:2018 [16] bzw. VDI 2066-1:2006 [17] durch isokinetische Teilstromentnahme aus dem Abgasvolumenstrom mit gravimetrischer Ermittlung der Staubmasse durchgeführt. Für die Ermittlung der Emissionskonzentrationen von polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen sowie dioxinähnlichen polychlorierten Biphenyl-Verbindungen (kurz: PCDD/F + dl-PCB) im Rauchgas wurden Messungen über einen Probenahmezeitraum von sechs Stunden nach den Vorgaben der DIN EN 1948-1:2006 [25] durchgeführt. Die Bestimmung der Benzo[a]pyren-Konzentration (B(a)P) erfolgte auf Basis der VDI 3874:2006 [18].

3. Ergebnisse aus dem einjährigen Messprogramm beim Einsatz von Laub-Holz-Pellets

Die gemittelten CO- und Gesamtstaub-Konzentrationen im Rauchgas der Praxisanlage der vier Messkampagnen des einjährigen Messprogramms sind in Tabelle 1 in Übersicht dargestellt. Weiterhin sind die gemittelten PCDD/F- und B(a)P-Konzentrationen in Tabelle 2 beschrieben.

Tabelle 1: Zusammenstellung der gemittelten Messergebnisse der CO- und Gesamtstaub-Konzentrationen aller Messkampagnen (Volllast) des einjährigen Messprogramms an der Praxisanlage; jeweils maximaler Messwert abzüglich erweiterter Messunsicherheit (Up) mit $p = 0,95$

Emissionsparameter	Grenzwert	Messkampagne	Volllast 1	Volllast 2	Volllast 3
Gesamtstaub in g/m_N^3	0,02	1	0,004	0,02	0,01
		2	0,01	0,01	0,02
		3	0,01	0,01	0,02
		4	0,01	0,02	0,01
Kohlenstoffmonoxid in g/m_N^3	0,4	1	0,02	0,20	0,03
		2	0,00	0,10	0,04
		3	0,01	0,03	0,02
		4	0,10	0,03	0,10

Die CO-Emissionen liegen im Durchschnitt während der ersten Messkampagne bei $41,4 \text{ mg/m}^3$ (Standardabweichung $49,4 \text{ mg/m}^3$, max. Messunsicherheit $29,3 \text{ mg/m}^3$, Anzahl der Volllastmessungen = 9), der zweiten Messkampagne bei $44,2 \text{ mg/m}^3$ (Standardabweichung $30,7 \text{ mg/m}^3$, max. Messunsicherheit $30,3 \text{ mg/m}^3$, n = 9), der dritten Messkampagne bei $34,4 \text{ mg/m}^3$ (Standardabweichung $10,6 \text{ mg/m}^3$, max. Messunsicherheit $28,9 \text{ mg/m}^3$, n = 9) und der vierten Messkampagne bei $43,6 \text{ mg/m}^3$ (Standardabweichung $22,4 \text{ mg/m}^3$, max. Messunsicherheit $32,3 \text{ mg/m}^3$, n = 9).

Die Gesamtstaubkonzentration im Abgas nach dem Gewebefiltersystem liegt im Durchschnitt während der ersten Messkampagne bei $7,1 \text{ mg/m}^3$ (Standardabweichung $6,4 \text{ mg/m}^3$, max. Messunsicherheit $0,6 \text{ mg/m}^3$, n = 9), der zweiten Messkampagne bei $10,0 \text{ mg/m}^3$ (Standardabweichung $5,6 \text{ mg/m}^3$, max. Messunsicherheit $0,7 \text{ mg/m}^3$, n = 9), der dritten Messkampagne bei $12,3 \text{ mg/m}^3$ (Standardabweichung $4,8 \text{ mg/m}^3$, max. Messunsicherheit $1,2 \text{ mg/m}^3$, n = 9) und der vierten Messkampagne bei $10,1 \text{ mg/m}^3$ (Standardabweichung $3,2 \text{ mg/m}^3$, max. Messunsicherheit $1,3 \text{ mg/m}^3$, n = 9).

Die Emissionsgrenzwerte für PCDD/F + dl PCB sowie Benzo[a]pyren gelten gemäß LAI – Handlungsempfehlungen als eingehalten, wenn der Messwert ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit den Grenzwert nicht überschreitet. Die durchschnittlich gemessenen Werte liegen ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit für PCDD/F + dl PCB um das Zehnfache unter dem Grenzwert. Die gemessene Konzentration für PAK liegt sogar durchschnittlich um das Tausendfache unter dem Grenzwert. Würde die erweiterte Messunsicherheit noch zum Abzug gebracht, so läge die durchschnittliche Konzentration für PCDD/F + dl PCB und Benzo[a]pyren im Abgas sogar meist nahe Null.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Messergebnisse der PCDD/F-, und B(a)P-Konzentrationen (6 Stunden-Mittelwerte) aller Messkampagnen (Volllast) des einjährigen Messprogramms an der Praxisanlage ohne Einbeziehung von Kongeneren unterhalb der Bestimmungsgrenze (BG); jeweils maximaler Messwert ohne Berücksichtigung der Messunsicherheit (Up) mit $p = 0,95$

Emissionsparameter	Grenzwert	Messkampagne	Volllast 1	Volllast 2	Volllast 3
PCDD/F + dl-PCB in ng WHO-TEQ/m _N ³	0,1	1	0,02	0,01	0,005
		2	0,01	0,01	0,01
		3	0,01	0,01	0,01
		4	0,01	0,004	0,004
Benzo[a]pyren in mg/m _N ³	0,01	1	4*10 ⁻⁶	3*10 ⁻⁶	<3*10 ⁻⁶ (BG)
		2	2*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁶	<3*10 ⁻⁶ (BG)
		3	1*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁵	<1*10 ⁻⁵ (BG)
		4	<5*10 ⁻⁶ (BG)	<1*10 ⁻⁵ (BG)	<4*10 ⁻⁶ (BG)

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit der Demonstration des einjährigen Messprogramms unter Praxisbedingungen (> 3700 Volllaststunden) konnte in vier Messkampagnen nachgewiesen werden, dass keine höheren Emissionen an PCDD/F + dl PCB sowie B(a)P im Vergleich zu den Grenzwerten für die üblichen Brennstoffe (Holz) auftreten. Weiterhin konnte die Einhaltung der Grenzwerte der 1.BImSchV für CO- und Gesamtstaub-Emissionen für jede Volllastmessung aller Messkampagnen des einjährigen Messprogramms demonstriert werden. Das einjährige Messprogramm wurde für den Brennstoff Laub-Holz-Pellets erfolgreich durchgeführt. Der Einsatz des homogenen und normkonformen Brennstoffes Laub-Holz-Pellet in Kombination mit dem Einsatz eines geeigneten Kessels mit Gewebefiltersystem wurde damit erstmalig nachgewiesen. Auf dieser Basis erfolgt aktuell die behördliche Zulassung. Diese Kombination aus Brennstoff und beschriebener Verbrennungstechnik ist nach erfolgreicher behördlicher Zulassung ohne zusätzliche Prüfung einer Immissionsschutzbehörde deutschlandweit im Rahmen der 1. BImSchV einsetzbar.

Danksagung

Das Projekt MoBiFuels (Förderkennzeichen: 03KB136) wurde durch den Projektträger Jülich (PtJ) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) auf der Grundlage eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur/Quellen

- [1] Karras T, Brosowski A, Thrän D. A Review on Supply Costs and Prices of Residual Biomass in Techno-Economic Models for Europe. Sustainability 2022;14(12):7473. <https://doi.org/10.3390/su14127473>.

- [2] Khalsa J, Döhling F, Berger F. Foliage and Grass as Fuel Pellets—Small Scale Combustion of Washed and Mechanically Leached Biomass. *Energies* 2016;9(5):361. <https://doi.org/10.3390/en9050361>.
- [3] Adam R, Pollex A, Zeng T, Kirsten C, Röver L, Berger F et al. Systematic homogenization of heterogeneous biomass batches – Industrial-scale production of solid biofuels in two case studies. *Biomass and Bioenergy* 2023;173:106808. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106808>.
- [4] Astrid Arthen, Micaela Ritscher. Siedlungsabfallbilanz 2021 Freistaat Sachsen. Dresden; 2023.
- [5] Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (BZL) in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Kultursubstrate im Gartenbau. Bad Oeynhausen; 2022.
- [6] Stahl E. Systematische Ermittlung von Emissionsdaten bei der thermischen Umsetzung unterschiedlicher Laubabfallfraktionen (SET-Laub): Schlussbericht. Oberhausen; 2021.
- [7] Fina S, Hamacher H, Rönsch J, Scholz B. Flächenmonitoring und Flächenverbrauch im internationalen Vergleich: Methoden und Daten. Abschlussbericht. Dortmund; 2023.
- [8] Carvalho L, Wopienka E, Pointner C, Lundgren J, Verma VK, Haslinger W et al. Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. *Applied Energy* 2013;104:286–96. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.058>.
- [9] International Organization for Standardization. ISO 17225-6: Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 6: Graded non-woody pellets. Berlin: Beuth Verlag; 2021. <https://doi.org/10.31030/3252493>.
- [10] European Committee for Standardization. DIN EN 303-5: Heating boilers - Part 5: Heating boilers for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 kW - Terminology, requirements, testing and marking. Berlin: Beuth Verlag; 2021.
- [11] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz. Auslegungsfragen /Vollzugsempfehlungen / Hinweise zur Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV): LAI Auslegungsfragen; 2017.
- [12] Adam R, Zeng T, Ulbricht T, Kirsten C, Schneider P, Dobler U et al. Erfolgreiche Demonstration des Prüfbrennstoffkonzeptes zum Einsatz nicht-holzartiger Festbrennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV. *Müll und Abfall* 2020(7). <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2020.07.06>.
- [13] European Committee for Standardization. DIN EN 14792: Stationary source emissions - Determination of mass concentration of nitrogen oxides - Standard reference method: chemiluminescence. Berlin: Beuth Verlag; 2017.
- [14] European Committee for Standardization. DIN EN 12619: Stationary source emissions - Determination of the mass concentration of total gaseous organic carbon - Continuous flame ionisation detector method. Berlin: Beuth Verlag; 2013.
- [15] European Committee for Standardization. DIN EN 15058: Stationary source emissions - Determination of the mass concentration of carbon monoxide - Standard reference method: non-dispersive infrared spectrometry. Berlin: Beuth Verlag; 2017.
- [16] European Committee for Standardization. DIN EN 13284-1: Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust - Part 1: Manual gravimetric method. Berlin: Beuth Verlag; 2018.
- [17] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 2066: Particulate matter measurement - Dust measurement in flowing gases - Gravimetric determination of dust load. Berlin: Beuth Verlag; 2021.
- [18] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 3874: Stationary source emissions - Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) - GC/MC method. Berlin: Beuth Verlag; 2012.

Kontakt

M. Sc., LL. M., Roman Adam, wissenschaftlicher Mitarbeiter

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH / Fachbereich: Thermo-chemische Konversionen

Tel.-Nr. +49-341-2434-550, E-Mail: roman.adam@dbfz.de, Homepage: www.dbfz.de

Modellierung des Ascheschmelzverhaltens als Grundlage für den Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe in Biomassefeuerungen

Abstract: Das verstärkte Interesse an der energetischen Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe erfordert weitergehende Untersuchungen zu hochwertigen energetischen Verwertungsoptionen, die vor dem Hintergrund einer vorrangigen Kreislaufführung vor allem die am Ende einer kaskadischen Nutzung anfallenden Materialströme in den Fokus setzt. Beim Einsatz solcher sekundären biogenen Rest- und Abfallstoffe in Biomassefeuerungen können aufgrund von kritischen Aschebildnern Verschlackungsprobleme entstehen. In dieser Forschungsarbeit wurden daher an ausgewählten Biomassen verschiedene Laboranalysen zum Ascheschmelzverhalten durchgeführt, um die Transformationsprozesse der aschebildenden Elemente und Verbindungen darstellen zu können. In Ergänzung zu den Laboranalysen wurden Verbrennungsversuche im Pilotmaßstab und Schlackeanalysen an einem mittelgroßen Biomasseheizkraftwerk durchgeführt. Auf Basis dieser Ergebnisse soll ein Berechnungsmodell zur Vorhersage der Reaktionen und des Verbleibs der Aschebildner entwickelt werden. Durch das Modell soll eine praxisnähere Bewertung des Verschlackungsrisikos sowie Rückschlüsse auf notwendige Brennstoffaufbereitungsschritte ermöglicht werden. Dieser Beitrag stellt vordergründig die Methodik zur Entwicklung eines praxisnahen Modells vor.

1 Einleitung

Auch wenn die energetische Biomassenutzung als erneuerbare Energiequelle gilt, gerät die thermische Nutzung von naturbelassenem Holz zunehmend in Kritik (Umweltbundesamt 2023). Die aktuellen politischen Ziele auf nationaler und EU-Ebene, wie z.B. des European Green Deals oder der aktuell in der Erarbeitung befindlichen nationalen Biomassestrategie, sehen daher einen vermehrten Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe für die energetische Nutzung vor. Derartige Sortimente sind allerdings besonders heterogen und enthalten Komponenten, die in thermischen Prozessen Störungen und Schäden verursachen können. Problematisch sind vor allem Chlor, Schwefel, Natrium und Kalium, die zu einem erhöhten Verschlackungsrisiko führen, wodurch sich Betrieb und Energieeffizienz der Anlagen verschlechtern (Mlonka-Medrala et al. 2020; Zevenhoven-Onderwater 2001).

Um vermehrt biogene Rest- und Abfallstoffe für die Energiebereitstellung erschließen zu können, ist daher eine Reduktion des Verschlackungsrisikos dieser potentiellen alternativen Brennstoffe notwendig. Das Ascheschmelzverhalten ist eine brennstoffspezifische Eigenschaft und kann mittels unterschiedlicher

Methoden quantifiziert werden, um das Verschlackungsrisiko in der Anlage abzuschätzen. Das Ziel in dieser Forschungsarbeit ist die Datenerhebung und statistische Analyse von Zusammenhängen zwischen laboranalytischen und praxisrelevanten Parametern zum Ascheschmelzverhalten, um eine brennstoffseitige Abschätzung des Verschlackungsrisikos vornehmen zu können. Basierend darauf können schließlich notwendige Aufbereitungsschritte identifiziert werden, damit biogene Rest- und Abfallstoffe zukünftig vermehrt in Biomassefeuerungen eingesetzt werden können.

2 Methodik

Das grundsätzliche Vorgehen in dieser Forschungsarbeit umfasst einen experimentellen Teil zur Datengenerierung und einen Teil mit statistischer Auswertung und Modellierung des Ascheschmelzverhaltens. Die Versuche wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Forschungsprojekts BioRestBrennstoff (PTJ, FKZ: 03EI5427A) durchgeführt und stellen neben ergänzenden Daten aus Voruntersuchungen sowie Literaturdaten die Datenbasis für nachfolgende Korrelationsanalysen dar.

2.1 Brennstoffe

An ausgewählten Materialströmen biogener Rest- und Abfallstoffe wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Dabei handelt es sich zum einen um ein vorwiegend holziges Material, dem Kompost-Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung und zum anderen um halmgutartige Reststoffe von Grünland, die im Rahmen unterschiedlicher Aufbereitungsmethoden vorbehandelt wurden. Erste Ergebnisse der Brennstoffaufbereitung für den Kompost-Siebüberlauf wurden bereits in (Scheff und Laner 2022) vorgestellt.

2.2 Datenerhebung

Es gibt zahlreiche Studien, die sich mit dem Ascheschmelzverhalten befassen und etablierte Untersuchungsmethoden zu diesem Thema aufzeigen (Beidaghy Dizaji et al. 2022; Mlonka-Medrala et al. 2020; Reinmüller et al. 2023). In dieser Arbeit wurden zur Untersuchung des Ascheschmelzverhaltens an der Laborasche die Methoden der Erhitzungsmikroskopie (EMI) (DIN EN ISO 21404), die simultane thermische Analyse (STA), die chemische Fraktionierung (CF) (Zevenhoven-Onderwater 2001) und Muffelofenversuche nach der Desintegrations- und Siebmethode nach (Fernández et al. 2019) angewendet. Eine Kombination mehrerer Methoden ermöglicht ein umfassenderes Verständnis der Transformationsprozesse der aschebildenden Komponenten. Die generierten Biorestbrennstoffe wurden im Rahmen von Verbrennungsversuchen im Pilotmaßstab getestet. Als Ofen wurde der Multifire von KWB Typ MF2 D 40 C4 eingesetzt. Für die Verbrennungsversuche wurde die Nennlast von 40 kW eingestellt, bei einem Brennstoffdurchsatz zwischen 7 und 11 kg/h und ausgeschaltetem Staubfilter. Nach den Verbrennungsversuchen wurde die Rostasche mittels Sieb- und Sortieranalysen charakterisiert. Durch Begehungen an einem Biomasseheizkraftwerk mit einer Größe von 20 MW während der Revisionszeit wurden Ablagerungen im Feuerraum und an den Kesselwänden beprobt. Von den entnommenen Proben wurden die Hauptelemente (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si, Ti) mittels ICP-MS bestimmt. Um die elementaren Bestandteile aus dem Brennstoff zu identifizie-

ren, die an der Bildung von Verschlackungen an den unterschiedlichen Anlagenteilen beteiligt sind, wurde eine Bilanzierung der Hauptelemente über die gesamte Anlage gemäß der Methode der Stoffflussanalyse nach (Brunner und Rechberger 2017) mit der Software STAN durchgeführt.

2.3 Modellierungsansätze

Die generierten Daten wurden in eine gemeinsame Datenbank überführt. Mit dieser Datenbank ist es nun möglich, mit Hilfe verschiedener statistischer Methoden wie Korrelations- und Regressionsanalysen Zusammenhänge zwischen Parametern zu ermitteln und für Vorhersagen zu nutzen. Die statistische Auswertung sowie die Modellierung des Ascheschmelzverhaltens sind derzeit noch in Bearbeitung. Für die Modellierung werden etablierte Ansätze wie Brennstoffindizes, Phasendiagramme und thermochemische Gleichgewichtsberechnungen angewendet (Beidaghy Dizaji et al. 2022; Vassilev et al. 2014).

3 Vorläufige Ergebnisse

In Abbildung 1 sind Ergebnisse der Erhitzungsmikroskopie (EMI) und der simultanen thermischen Analyse (STA) am Beispiel von drei holzigen Materialien dargestellt. Dabei handelt es sich um Holz aus dem Kompost-Siebüberlauf (SÜH), zerkleinertes und gelaugtes Holz aus dem Kompost-Siebüberlauf (SÜH-zl) sowie Holzhackschnitzel (HHS) als Referenz. Im Graph der EMI (Abb. 1 li) wird die Fläche des Schattenbildes vom Probekörper dargestellt, die sich bei Erhöhung der Temperatur verändert. Auffällig ist der Kurvenverlauf von SÜH, da die Fläche ab 900 °C durch ein Aufblähen des Probekörpers nochmals zunimmt. Durch die STA (Abb. 1 re) werden Gewicht und kalorische Effekte der Probe bei Temperaturerhöhung gemessen. Hier zeigen alle Kurven ab einer Temperatur zwischen 600 °C und 700 °C eine Gewichtsreduktion, was bedeutet, dass darin enthaltene Komponenten verdampfen. Die Effekte derartiger Phasenübergänge sind mit einer EMI-Untersuchung nicht unmittelbar ersichtlich. Auch in anderen Studien wie z.B. in (Mlonka-Medrala et al. 2020) wird daher hervorgehoben, wie wichtig die Anwendung und Kombination unterschiedlicher Methoden zur Untersuchung des Ascheschmelzverhaltens (siehe Kapitel 2) sind. Dies soll anhand des in Abbildung 2 dargestellten Schemas realisiert werden.

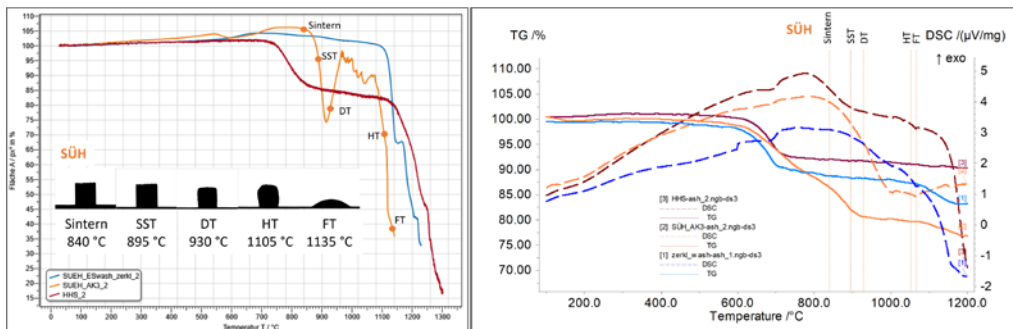


Abbildung 1: Ergebnisse aus der Erhitzungsmikroskopie (li) und der Thermogravimetrie (re)

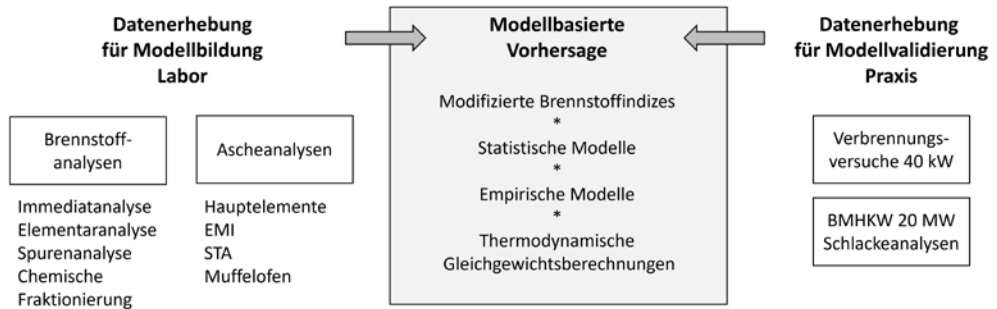


Abbildung 2: Schema der modellhaften Vorhersage der Verschlackungsneigung

4 Fazit und Ausblick

In dieser Forschungsarbeit wurden verschiedene Methoden zur Untersuchung und Bewertung des Ascheschmelzverhaltens angewendet und verglichen. Es konnte festgestellt werden, dass es für die präzise Charakterisierung des Ascheschmelzverhaltens unterschiedlicher Untersuchungsmethoden bedarf. Derzeit wird noch daran gearbeitet, die Ergebnisse aus Laboruntersuchungen, Verbrennungsversuchen und Proben aus der Praxis miteinander zu verknüpfen. Auf Basis dieser Ergebnisse soll ein Berechnungsmodell zur Vorhersage der mineralischen Komponenten entwickelt werden, welches zwischen reaktiven Komponenten, die verdampfen und in der Rauchgasstrecke Schäden verursachen können und Komponenten, die in der Rostasche verbleiben, unterscheidet. Durch das Modell sollen eine praxisnähere Bewertung des Verschlackungsrisikos sowie Rückschlüsse auf notwendige Aufbereitungsschritte der Brennstoffe ermöglicht werden. Die Erkenntnisse aus dieser Forschungsarbeit sollen weitere Bewertungsgrundlagen für die Eignung biogener Rest- und Abfallstoffe für die energetische Biomassennutzung in Biomassefeuerungen liefern. Für einen zukünftig verstärkten Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe in Verbrennungsprozessen ist es entscheidend, die komplexen Wechselwirkungen der aschebildenden Komponenten und deren Auswirkungen auf das Ascheschmelzverhalten zu verstehen, damit dieser Einsatz anlagenschonend und energieeffizient erfolgen kann.

Danksagung

Das Projekt *BioRestBrennstoff* (PTJ, FKZ: 03EI5427A) wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms im Förderbereich „3.7 Energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe“ gefördert.

Literatur/Quellen

- Beidaghy Dizaji, Hossein; Zeng, Thomas; Enke, Dirk (2022): New fuel indexes to predict ash behavior for biogenic silica production. In: *Fuel* 310, S. 122345. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122345.
- DIN EN ISO 21404, 2020: Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Asche-Schmelzverhaltens.
- Brunner, Paul H.; Rechberger, Helmut (2017): Handbook of material flow analysis. For environmental, resource, and waste engineers. Second edition. Boca Raton, London, New York: CRC Press Taylor & Francis Group. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4771740>.
- Fernández, Miguel J.; Mediavilla, Irene; Barro, Ruth; Borjabad, Elena; Ramos, Raquel; Carrasco, Juan E. (2019): Sintering reduction of herbaceous biomass when blended with woody biomass: predictive and combustion tests. In: *Fuel* 239, S. 1115–1124. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.11.115.
- Mlonka-Medrala, Agata; Magdziarz, Aneta; Gajek, Marcin; Nowińska, Katarzyna; Nowak, Wojciech (2020): Alkali metals association in biomass and their impact on ash melting behaviour. In: *Fuel* 261, S. 116421. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116421.
- Reinmöller, Markus; Schreiner, Marcus; Laabs, Marcel; Scharm, Christoph; Yao, Zhitong; Guhl, Stefan et al. (2023): Formation and transformation of mineral phases in biomass ashes and evaluation of the feedstocks for application in high-temperature processes. In: *Renewable Energy* 210, S. 627–639. DOI: 10.1016/j.renene.2023.04.072.
- Scheff, Viktoria; Laner, David (2022): Thermische Verwertung von Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung durch stufenweise Aufbereitung und Brennstoffkonfektionierung. In: 11. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft. Unter Mitarbeit von Anke Bockreis: innsbruck university press, S. 87–91.
- Umweltbundesamt (2023): Bioenergie. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/bioenergie#bioenergie-ein-weites-und-komplexes-feld->, zuletzt aktualisiert am 07.09.2023, zuletzt geprüft am 07.09.2023.
- Vassilev, Stanislav V.; Baxter, David; Vassileva, Christina G. (2014): An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. In: *Fuel* 117, S. 152–183. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.09.024.
- Zevenhoven-Onderwater, Maria (2001): Ash-forming matter in biomass fuels. Unter Mitarbeit von Mikko Hupa. [S.l.]: [s.n.] (Report-°Abo Akademi, Process Chemistry Group, 01-03).

Kontakt

M.Sc., Viktoria Scheff, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Universität Kassel, Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik

Tel.-Nr.: +49 561 804-3984

E-Mail: scheff@uni-kassel.de

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

Performance and characterization of Sol-Gel-Derived Cornhusk Support for Low-Temperature Catalytic Methane Combustion

Abstract: *This study investigates the performance and characterization of sol-gel derived cornhusk support for low-temperature methane combustion (LTCMC) using palladium-ceria (Pd/CeO₂) catalysts. The cornhusk support was prepared using a sol-gel method and characterized using various techniques such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and N₂ physisorption. The prepared cornhusk support catalyst (Pd/CeO₂/CHSiO₂) was tested for LTCMC, and its performance was compared with a commercial catalyst (Pd/CeO₂/commercial). The results showed that the Pd/CeO₂/CHSiO₂ catalyst exhibited higher catalytic activity than the commercial catalyst at low temperatures, with a conversion of 50% at 394 °C compared with 593 °C for the Pd/CeO₂/commercial. The superior performance of the Pd/CeO₂/cornhusk catalyst was attributed to the highly dispersed Pd/CeO₂ nanoparticles on the cornhusk support, which provided a bimodal pore system and enhanced the reducibility of PdO. The findings presented herein advance our understanding of more sustainable and efficient catalyst development, with implications for mitigating greenhouse gas emissions and addressing climate change challenges.*

1 Introduction

Catalysis plays a crucial role in numerous industrial and environmental applications, providing an effective pathway to speed up chemical reactions and minimize energy consumption. Of particular interest is low-temperature catalytic methane combustion (LTCMC), a pivotal process in catalysis due to its potential to mitigate CH₄ emissions, a potent greenhouse gas. The development of efficient catalysts for LTCMC is critical for the success of this process (Baldwin & Burch, 1990; Xiao et al., 2005). Thus, the use of efficient catalysts, notably palladium (Pd) supported on cerium oxide (CeO₂), is imperative for the success of LTCMC (Narui et al., 1998; Sekizawa et al., 2000).

While Pd/CeO₂ catalysts demonstrate high effectiveness, their catalytic activity is related to the nature of the support through Pd-support dispersion and interaction (Eguchi & Arai, 2001). Traditional supports, including alumina and zeolite, exhibit certain operational deficiencies, including mass transfer limitation, poor heat conductivity and severe deactivation in the presence of water. The hydroxylation of the support causes the active sites of the Pd catalyst, PdO_x, to sinter, forming the less active sites, Pd(OH)₂. This slows the

exchange of active lattice oxygen replacement, resulting in a loss of the catalytic activity (Nomura et al., 1998).

Consequently, alternative supports such as controlled porous glass (CPG) and commercial silica have been explored. However, their energy-intensive synthesis methods pose environmental concerns limiting broad industrial applicability (Liu et al., 2019).

This study investigates the utilization of sol-gel-derived cornhusk as an environmentally friendly alternative support for Pd/CeO₂ catalysts in LTCMC. Cornhusk, an abundant agricultural waste, offers cost-effective and sustainable support. The study delves into the performance, characterization, and operational stability of Pd/CeO₂ catalysts supported on cornhusk, evaluating activity, selectivity, and stability for LTCMC. A comprehensive set of analytical techniques, including temperature-programmed reduction, X-ray diffraction, transmission electron microscopy, and EDX, is employed to assess the catalysts. The catalytic activity of the prepared catalysts was evaluated for LTCMC in a fixed-bed quartz reactor. This investigation contributes valuable insights into the potential of sol-gel-derived cornhusk as a sustainable support for Pd/CeO₂ catalysts in LTCMC.

2 Materials and Methods

2.1 Materials

Corn husks from a local farm served as a silica source for sol-gel-derived silica support. Commercial silica support (CWK Köstropur® 021012, Chemiewerk Bad Köstritz GmbH, 99.89 wt. % SiO₂) was used for comparison. Pd/CeO₂ nanoparticles were synthesized using a previously reported method in the study of (Liu et al., 2019).

2.2 Sol-Gel Derived Cornhusk Support Preparation

Cornhusk residues were combusted at 600 °C for 2 h to obtain unmodified ash with surface area = 88 m²/g and pore volume = 0.25 cm³/g. A comprehensive procedure for the preparation of the support is given in the study of (Prempeh et al., 2022). NaOH solution dissolution of the ash at 100 °C for 1 h produced a sodium silicate solution. Controlled pH and washing steps yielded silica gels. Drying at 80 °C for 24 h resulted in silica xerogel powder (SX) with improved textural properties (surface area = 384 m²/g, pore volume = 0.35 cm³/g). SX was used as the support for subsequent experiments.

2.3 Supported Catalysts Preparation

Catalysts were prepared via incipient wetness impregnation. Ce(NO₃)₃·6H₂O was impregnated into supports (cornhusk and commercial silica) at 235 °C, dried at 90 °C overnight, and calcined at 450 °C for 2 h. The CeO₂/SiO₂ mixture was then impregnated with Pd(NO₃)₂·2H₂O. Pd loading was controlled for 1 wt % in the final catalysts. Precursors were dried at 120 °C for 12 h and calcined at 500 °C for 1 h. Catalysts were denoted as Pd/CeO₂/CHSiO₂ and Pd/CeO₂/commercial for cornhusk and commercial silica impregnation, respectively.

2.4 Characterization

Various techniques were employed for characterization, including nitrogen adsorption/desorption measurements (BET method) for surface area and pore size distribution, X-ray diffraction (XRD) for crystalline phase and structure determination, scanning electron microscopy with EDX (SEM-EDX) for morphology and size distribution observation, and hydrogen temperature programmed reduction (H₂-TPR) for measuring redox properties.

2.5 Catalytic Testing

Catalytic activity for low-temperature combustion of methane (LTCMC) was evaluated in a fixed-bed quartz reactor. Tests included dry and wet conditions with reactant gas mixtures, and light-off tests involved heating the catalyst from room temperature (RT) to 600 °C (10 °C/min heating ramp) under a simulated synthetic flue gas mixture flow. CH₄ conversion was calculated accordingly as:

$$X_{CH_4}(\%) = \frac{CH_{4,t=0} - CH_{4,t}}{CH_{4,t=0}} \times 100 \quad (1)$$

3 Results

3.1 Structure and Properties of Synthesized Catalysts

The XRD patterns of both catalysts in Figure 1 displayed a series of well-defined peaks with the reflection angles at $2\theta = 28.6, 33.2, 47.6, 56.4, 59.3, 69.6, 77.1,$ and 79.3° , attributed to the reflection of the hexagonal phase of CeO₂ (111), CeO₂ (200), CeO₂ (220), CeO₂ (311), CeO₂ (222), CeO₂ (400), and CeO₂ (311) lattice planes [Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) card number no. 34-0394], respectively. This indicates that the CeO₂ nanoparticles are well-dispersed in both catalysts without significant aggregation.

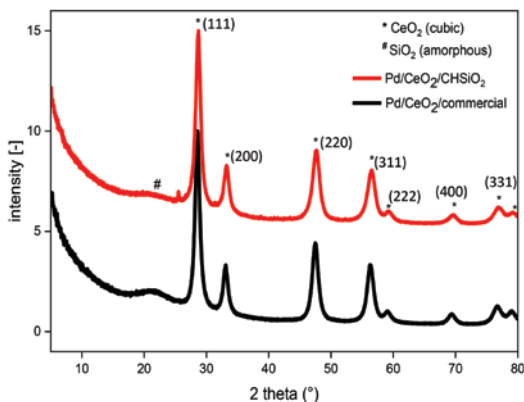


Figure 1. X-ray diffraction pattern for Pd/CeO₂/CHSiO₂ and Pd/CeO₂/commercial catalysts.

The spatial distributions of the Pd and Ce nanoparticles on the surfaces of the prepared catalysts were observed using different selected areas in the SEM/EDX diagrams, and their corresponding peaks of the various elements in EDX are shown in SEM/EDX mapping (Figure 2) showed successful impregnation of Pd and Ce species on both supports. SEM micrographs (Figure 3) revealed distinct morphological structures, with Pd/CeO₂/CHSiO₂ having non-uniform shapes and sizes compared to the more analogous Pd/CeO₂/commercial.

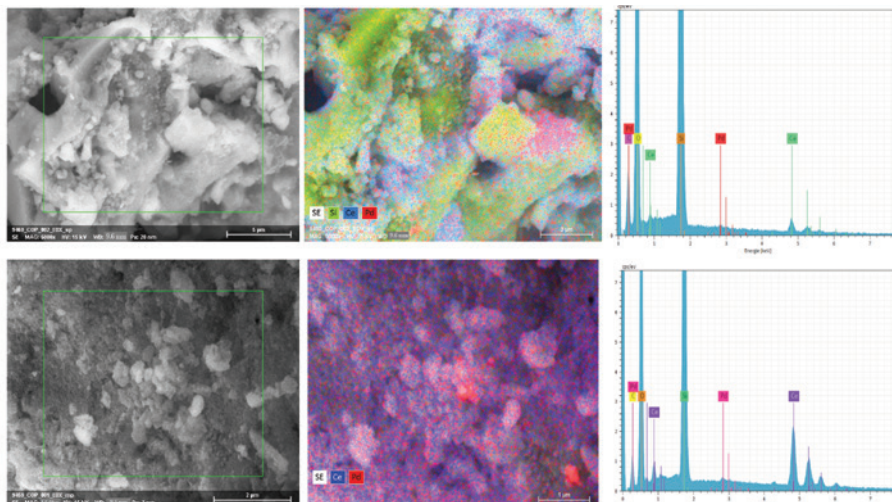


Figure 2. SEM/EDX mapping and spatial distributions of Pd and Ce nanoparticles on supports. Top row: cornhusk support; Bottom row: commercial silica supports.

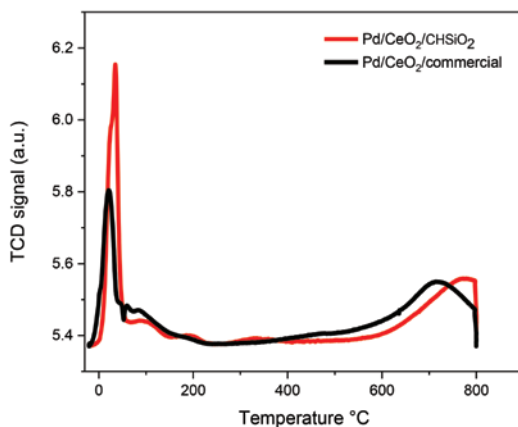


Figure 3. H₂-TPR profiles of Pd/CeO₂/CHSiO₂ and Pd/CeO₂/commercial catalysts.

H₂-TPR profiles in Figure 3 indicated that PdO and CeO₂ reduction occurred at lower temperatures for corn husk-derived support, suggesting higher reducibility of Pd/CeO₂ nanoparticles. The differences in reducibility between the two catalysts can be attributed to the different properties of the support materials. The cornhusk support used in synthesizing the Pd/CeO₂/CHSiO₂ catalyst had a slightly higher surface area (384 m²/g) with micropores compared to the commercial support (329 m²/g). Furthermore, by comparing the total amount of H₂ consumption during the duration of the measurements, Pd/CeO₂/CHSiO₂ showed 89% of H₂ consumption, which was higher than that of the Pd/CeO₂/commercial (74.1%), denoting higher reducibility compared with the Pd/CeO₂/commercial (Toso et al., 2018).

3.2 Catalytic Performances of synthesized catalysts

In the low-temperature combustion of methane (LTCCM), Pd/CeO₂/CHSiO₂ exhibited higher catalytic activity in dry conditions than Pd/CeO₂/commercial, with a temperature corresponding to 50% conversion of CH₄, T_{50%} value of 394 °C compared to 593 °C for the commercial catalyst (Figure 4a). Arrhenius plots in Figure 4b demonstrated a lower activation energy ($E_a = 130$ KJ/mol) for the corn husk-derived catalyst compared to the commercial catalyst ($E_a = 137$ KJ/mol), indicating higher efficiency at lower temperatures.

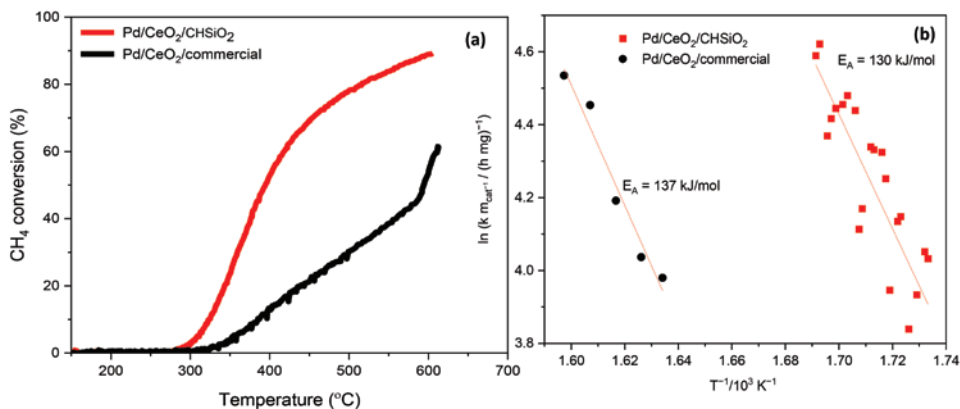


Figure 4. (a) Light-off curves for CH₄ combustion in stoichiometric conditions in dry conditions; (b) Arrhenius plots over Pd/CeO₂/CHSiO₂ and Pd/CeO₂/commercial catalysts at 600 °C.

4 Discussion

The results suggest corn husk-derived support as a viable alternative for the anchoring of Pd/CeO₂ catalysts in LTCCM. Higher reducibility of Pd/CeO₂ nanoparticles on corn husk likely contributes to enhanced catalytic activity. Lower activation energy implies higher efficiency at lower temperatures, desirable for practical applications. The unique pore structure and surface chemistry of corn husk-derived support may have provided more active sites for the catalytic reaction. Thus, the sol-gel method used for cornhusk support preparation contributed to its uniform and well-dispersed nature, enhancing catalytic activity compared to the commercial support. Additionally, H₂-TPR analysis revealed that Pd/CeO₂/CHSiO₂ exhibited lower reduction temperature and higher reduction peak area, indicating stronger bonding between the active phase and

support material, reducing sintering during the reaction (Hoffmann et al., 2015). These findings highlight the importance of both support material and preparation method in catalyst performance.

5 Conclusions

This study explored Sol-gel derived cornhusk support for low-temperature methane combustion (LTCCM). Results indicated the cornhusk-derived support's promising performance, comparable or superior to commercial supports for Pd/CeO₂ catalysts in LTCCM. Characterization techniques (XRD, BET, SEM/EXD, and H₂-TPR) confirmed the successful synthesis of highly dispersed Pd/CeO₂ nanoparticles on the cornhusk support. The cornhusk catalyst's superior LTCCM performance is attributed to its unique properties: high surface area, porosity, and thermal stability. Lower activation energy, revealed by the Arrhenius plot, suggests an enhanced CH₄ combustion reaction facilitated by the Pd/CeO₂ catalyst on cornhusk support. This study provides valuable insights into cornhusk-derived supports for LTCCM, showcasing the potential of agricultural waste materials for sustainable and cost-effective catalyst synthesis, contributing to waste reduction. Further investigations are warranted to comprehend mechanisms behind observed differences in catalytic activity and stability, optimizing preparation methods for enhanced performance.

References

- Baldwin, T. R. & Burch, R. (1990) „Catalytic combustion of methane over supported palladium catalysts“, *Applied Catalysis*, Vol. 66, No. 1, S. 337–358.
- Eguchi, K. & Arai, H. (2001) „Low temperature oxidation of methane over Pd-based catalysts—effect of support oxide on the combustion activity“, *Applied Catalysis A: General*, Vol. 222, 1-2, S. 359–367.
- Hoffmann, M., Kreft, S., Georgi, G., Fulda, G., Pohl, M.-M., Seeburg, D., Berger-Karin, C., Kondratenko, E. V. & Wohlrab, S. (2015) „Improved catalytic methane combustion of Pd/CeO₂ catalysts via porous glass integration“, *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 179, S. 313–320.
- Liu, D., Seeburg, D., Kreft, S., Bindig, R., Hartmann, I., Schneider, D., Enke, D. & Wohlrab, S. (2019) „Rice Husk Derived Porous Silica as Support for Pd and CeO₂ for Low Temperature Catalytic Methane Combustion“, *Catalysts*, Vol. 9, No. 1, S. 26.
- Narui, K., Furuta, K., Yata, H., Nishida, A., Kohtoku, Y. & Matsuzaki, T. (1998) „Catalytic activity of PdO/ZrO₂ catalyst for methane combustion“, *Catalysis Today*, Vol. 45, 1-4, S. 173–178.
- Nomura, K., Noro, K., Nakamura, Y., Yazawa, Y., Yoshida, H., Satsuma, A. & Hattori, T. (1998) „Pd–Pt bimetallic catalyst supported on SAPO-5 for catalytic combustion of diluted methane in the presence of water vapor“, *Catalysis Letters*, Vol. 53, ¾, S. 167–169.
- Prempeh, C. O., Formann, S., Hartmann, I. & Nelles, M. (2022) „An improved method for the production of biogenic silica from cornhusk using sol–gel polymeric route“, *Biomass Conversion and Biorefinery*, Vol. 4, No. 11, S. 107.
- Sekizawa, K., Widjaja, H., Maeda, S., Ozawa, Y. & Eguchi, K. (2000) „Low temperature oxidation of methane over Pd/SnO₂ catalyst“, *Applied Catalysis A: General*, Vol. 200, 1-2, S. 211–217.
- Toso, A., Colussi, S., Padigapaty, S., Leitenburg, C. de & Trovarelli, A. (2018) „High stability and activity of solution combustion synthesized Pd-based catalysts for methane combustion in presence of water“, *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 230, S. 237–245.

Xiao, L., Sun, K., Xu, X. & Li, X. (2005) „Low-temperature catalytic combustion of methane over Pd/CeO₂ prepared by deposition–precipitation method“, *Catalysis Communications*, Vol. 6, No. 12, S. 796–801.

Contact

Clement Owusu Prempeh

Department of Thermochemical Conversion, DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum
Gemeinnützige GmbH, Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig, Germany

Department of Agriculture and Environmental Science, University of Rostock,
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock, Germany

clement.owusuprempeh@dbfz.de (C.O.P.); Tel.: +49-(0)341-2434-523

Ingo Hartmann

Steffi Formann, steffi.formann@dbfz.de (S.F.)

Manfred Eiden, manfred.eiden@dbfz.de (M.E.)

Department of Thermochemical Conversion, DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum
Gemeinnützige GmbH, Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig, Germany

Katja Neubauer, katja.neubauer@catalysis.de (K.N.)

Hanan Atia, hanan.atia@catalysis.de (H.A.)

Alexander Wotzka, alexander.wotzka@catalysis.de (A.W.)

Sebastian Wohlrab, sebastian.wohrlab@catalysis.de (S.W.)

Leibniz-Institute for Catalysis e.V. (LIKAT), Albert-Einstein-Str. 29a, 18059 Rostock, Germany

Michael Nelles

Department of Thermochemical Conversion, DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum
Gemeinnützige GmbH, Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig, Germany

Department of Agriculture and Environmental Science, University of Rostock,
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock, Germany

michael.nelles@dbfz.de (M.N.)

TEIL 5

Thermische Verfahren II

Leitung:

Prof. Dr.-Ing. Mario Mocker

Gewinnung von Wertstoffen durch industrielle Aufbereitung von Rost- und Bettasche aus der Müllverbrennung

Abstract: Das Recycling von Müllverbrennungsaschen kann einen wichtigen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leisten. Neben der Rückgewinnung von Metallen aus den Aschen ist hierzu auch die Verwertung der Mineralikfraktion empfehlenswert. Moderne, industrielle Ascheaufbereitung soll in diesem Zusammenhang einerseits ermöglichen, möglichst viele Metalle aus der Asche rückzugewinnen und zudem eine metallarme Mineralikfraktion zu erzeugen, welche im Bauwesen eingesetzt werden kann. Um die Potentiale einer solchen industriellen Aufbereitungsanlage in Österreich zu untersuchen, wurde ein Versuch mit einer Rostasche aus der Rostfeuerung und einer Bettasche aus einer Wirbelschichtfeuerung für Abfälle durchgeführt. Bei diesem wurde festgestellt, dass im Praxisbetrieb kein Glas aus der Rostasche abgetrennt werden kann, wohingegen etwa ein Drittel der Bettasche als Glasfraktion anfiel. Bei der Aufbereitung der Rostasche fallen etwa zwei Drittel des Inputs als Mineralikfraktion an. Die Mineralikfraktion der Rostasche wies jedoch höhere Schwermetallgehalte als die Mineralik der Bettasche auf, wodurch deren Verwertung erschwert wird. Im Falle beider Aschen konnten Aluminium und magnetische Metalle >4 mm zu mehr als 95% in Outputfraktionen der Aufbereitungsanlage angereichert werden, aus denen eine Rückgewinnung dieser Materialien möglich ist.

1 Einleitung

Aufgrund der Relevanz der Müllverbrennung für die Abfallwirtschaft stellt das Recycling von Müllverbrennungsaschen einen wichtigen Beitrag zur Schaffung einer Kreislaufwirtschaft dar. Neben der weitgehend üblichen Praxis der Metallrückgewinnung aus den Aschen ist auch die Nutzung der überwiegend anfallenden Mineralikfraktion hierfür ausschlaggebend (Šyc et al., 2020). Die Mineralikfraktion kann potentiell beispielsweise im Bauwesen eingesetzt werden (u. A. im Straßenbau oder der Betonerzeugung) (Astrup et al., 2016; Verbinnen et al., 2017). Hierfür sind in Österreich jedoch Umweltparameter vorgegeben, welche nur durch umfassende Aufbereitung der Asche erreicht werden können (BMK, 2023). Im Zuge eines industriellen Aufbereitungsversuchs mit einer Müllverbrennungsasche aus der Rostfeuerung (Rostasche) und einer aus der Wirbelschichtfeuerung (Bettasche) sollte untersucht werden, ob diese Grenzwerte eingehalten werden können und ob Unterschiede zwischen Rost- und Bettaschen bestehen. Zudem sollte das Rückgewinnungspotential von magnetischen Eisenmetallen und Aluminium >4 mm ermittelt werden, da für diese Metalle Recyclingziele im Kreislaufwirtschaftspaket der EU festgelegt sind (EU, 2018). Außerdem wurde untersucht, welche Mengen an Glas im Zuge der industriellen Aufbereitung aus der Bettasche abgetrennt werden können.

Diese Arbeit soll dazu beitragen, Potentiale und Grenzen der Ascheaufbereitung in der industriellen Praxis zu erkennen. Durch die Betrachtung der beiden Aschetypen soll zudem ermöglicht werden, die Verbrennungstechnologien Rost- und Wirbelschichtfeuerung für Siedlungsabfälle in weiterer Folge ganzheitlich vergleichen zu können.

2 Methodik

Um die Aufbereitung einer Rost- und einer Bettasche vergleichen und beurteilen zu können, wurden jeweils etwa 200 Tonnen einer Rost- und einer Bettasche in einer industriellen Ascheaufbereitungsanlage in Österreich aufbereitet. Die Aufbereitungsanlage entspricht dem aktuellsten Stand der Technik und zielt darauf ab mittels mehrstufiger, nasser Aufbereitung möglichst viele Metalle aus der Asche zurückzugewinnen. Dabei soll eine metallarme Mineralikfraktion, welche potentiell recycelt werden kann, entstehen. Zusätzlich verfügt die Anlage über einen Glasabscheider, um insbesondere aus Bettaschen Glas rückzugewinnen zu können.

Im Zuge des Aufbereitungsversuchs wurden alle Outputströme der Anlage beprobt und gewogen, wobei großer Wert auf die Repräsentativität der Probenahme gelegt wurde. Alle Outputs wurden mittels manueller Sortierung charakterisiert, um deren Zusammensetzung auf Materialebene >4 mm ermitteln zu können. Zudem wurde eine Wassergehaltsbestimmung aller Outputströme durchgeführt. Aus den erhaltenen Daten wurde je eine Materialflussanalyse für die gesamte Asche sowie für die Aschebestandteile magnetisches Eisen, Aluminium und Glas >4 mm erstellt. Daraus konnten einerseits Unterschiede zwischen Rost- und Bettasche als auch die Rückgewinnungsraten für die betrachteten Aschebestandteile ermittelt werden.

Die Mineralikfraktionen beider Aschen wurden einer Alterung für drei Monate unterzogen und anschließend nach Vorgabe der österreichischen Deponieverordnung chemisch analysiert (DVO, 2008). Dabei wurden Gesamt- und Eluatgehalte, welche laut Bundesabfallwirtschaftsplan für eine Verwertung relevant sind, ermittelt (BMK, 2023).

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Materialflussanalyse der Aschen sind in Tabelle 1 dargestellt. Hierbei wurden die einzelnen Outputströme der Aufbereitungsanlage in verschiedene Kategorien unterteilt, wobei zwischen Mineralikfraktion 0-8 mm, Glasfraktion >9 mm, metallreichen Fraktionen sowie Fraktionen zur Beseitigung unterschieden wurde. Aluminium und magnetische Metalle, welche in metallreichen Fraktionen anfallen, können potentiell einem Recycling zugeführt werden, wobei gegebenenfalls weitere Aufbereitungsschritte erforderlich sind.

Der frappanteste Unterschied zwischen den beiden Aschen, welcher aus den Ergebnissen der Materialflussanalyse ersichtlich wird, ist der hohe Anteil an Glasfraktion, welcher bei der Bettasche gewonnen werden konnte. Hingegen war eine Abtrennung des Glases im Falle der Rostasche nicht industriell umsetzbar. Dies ist unter anderem auf deutlich geringere Mengen an Glas in der Rostasche zurückzuführen, wie bereits in Voruntersuchungen festgestellt wurde (Blasenbauer et al., 2023).

Tabelle 1: Ergebnis der Materialflussanalyse der Rost- und Bettasche

	Anteil der Rostasche nach Aufbereitung	Anteil der Bettasche nach Aufbereitung
Mineralikfraktion 0-8 mm	67,9%	33,6%
Glasfraktion >9 mm	-	35,0%
Metallreiche Fraktionen	21,2%	26,3%
Fraktionen zur Beseitigung	11,0%	5,1%
Summe	100%	100%

Im Falle der Mineralikfraktion 0-8 mm wurde festgestellt, dass diese etwa zwei Drittel der Rostasche und somit doppelt so viel wie im Falle der Bettasche ausmacht. Jedoch weist die Mineralikfraktion der Rostasche höhere Schwermetallgehalte auf, wodurch eine Verwertung tendenziell schwieriger umgesetzt werden kann. Dieser Umstand wurde ebenfalls bereits in einer Voruntersuchung im Technikumsmaßstab ermittelt (Mühl et al., 2023). Einzelne Grenzwertüberschreitungen im Falle von Chlorid und dem Restmetallgehalt an Nichteisenmetallen >4 mm in der untersuchten Mineralik verhindern eine Anwendung im Straßenbau und der Betonproduktion. Die Mineralik der Bettasche hingegen konnte nach einer Alterung alle Grenzwerte laut Bundesabfallwirtschaftsplan 2023 einhalten (BMK, 2023).

Die Anreicherung der Metalle magnetisches Eisen und Aluminium >4 mm in einer der metallreichen Fraktionen war bei beiden Aschen mit über 95% fast vollständig. Dieser Wert entspricht nicht der tatsächlichen Recyclingrate für Aluminium und magnetisches Eisen >4 mm, da Verluste bei einer erforderlichen weiteren Aufbereitung bzw. Recyclingverluste berücksichtigt werden müssen. Jedoch liegen diese Werte im Literaturvergleich sehr hoch und deuten auf eine sehr erfolgreiche Aufbereitung hin (Allegrini et al., 2014; Bunge, 2018).

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 Brantner Österreich GmbH, Linz Service GmbH, Wien Energie GmbH, und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H. sowie bei unserem strategischen Partner, der Magistratsabteilung Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien (MA 48).

Literatur/Quellen

- Allegrini, E., Maresca, A., Olsson, M.E., Holtze, M.S., Boldrin, A., Astrup, T.F. (2014): Quantification of the resource recovery potential of municipal solid waste incineration bottom ashes. *Waste management* 34, 1627–1636.
- Astrup, T., Muntoni, A., Poletini, A., Pomi, R., van Gerven, T., van Zomeren, A. (2016): Treatment and Reuse of Incineration Bottom Ash, in: *Environmental Materials and Waste*. Elsevier, pp. 607–645.
- Blasenbauer, D., Huber, F., Mühl, J., Fellner, J., Lederer, J. (2023): Comparing the quantity and quality of glass, metals, and minerals present in waste incineration bottom ashes from a fluidized bed and a grate incinerator. *Waste management* 161, 142–155.
- BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2023): *Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023, Teil 1*. Wien.
- Bunge, R. (2018): Recovery of Metals from Waste Incineration Bottom Ash, in: Holm, O., Thomé-Kozmien-sky, E. (Eds.), *Removal, treatment and utilisation of waste incineration bottom ash*. Thomé-Kozmien-sky Verlag GmbH, Nietwerder, pp. 63–143.
- DVO - Deponieverordnung (2008): *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien: DVO 2008*.
- EU - Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (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*.
- Mühl, J., Skutan, S., Stockinger, G., Blasenbauer, D., Lederer, J. (2023): Glass recovery and production of manufactured aggregate from MSWI bottom ashes from fluidized bed and grate incineration by means of enhanced treatment. *Waste Management* 168, 321–333.
- Šyc, M., Simon, F.G., Hykš, J., Braga, R., Biganzoli, L., Costa, G., Funari, V., Grosso, M. (2020): Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments. *Journal of hazardous materials* 393, 122433.
- Verbinnen, B., Billen, P., van Caneghem, J., Vandecasteele, C. (2017): *Recycling of MSWI Bottom Ash: A Review of Chemical Barriers, Engineering Applications and Treatment Technologies*. *Waste Biomass Valor* 8, 1453–1466.

Kontakt

DI Julia Mühl, wissenschaftliche Mitarbeiterin

CD Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, TU Wien

Getreidemarkt 9/166.1

A-1060 Wien

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

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

Stoffflussanalyse der Elemente Blei und Cadmium bei der Nassaufbereitung einer Müllverbrennungsrostasche: Eine Fallstudie aus Österreich

Abstract: Die Rückgewinnung von Ressourcen aus Müllverbrennungsrostasche ist ein wichtiger Bestandteil der Kreislaufwirtschaftsstrategie. In Österreich erreicht eine mehrstufige Nassaufbereitungsanlage für Müllverbrennungsrost- und -bettsaschen eine hervorragende Rückgewinnung von Metallen in groben und feinen Partikelgrößenfraktionen. Dabei entstehen mehr als 10 Outputströme, wovon in einigen Wertstoffe angereichert werden und diese dadurch einem Recycling zugeführt werden können, und einige, die als Senke für Schwermetalle dienen und deponiert werden. Um die Verteilung ausgewählter Schwermetalle auf die Outputströme besser zu verstehen, wurden alle Outputströme bei einem Aufbereitungsversuch über 8 Stunden beprobt. Aus den Primärproben wurden repräsentative Laborproben durch Teilen erhalten. Feinkörnige Metallfraktionen (< 4mm) sowie mineralische Materialien wurden mit Brecher und Mühlen zu Laborproben aufbereitet. Schwer zerkleinerbare Partikel >4mm wurden händisch nach Metallen und Gütern (z.B. Münzen, Batterien, Spulen) sortiert und Literaturdaten für deren chemische Zusammensetzung verwendet. Mit einer Stoffflussanalyse konnte die Verteilung von Blei und Cadmium über die Outputströme bestimmt werden. Die Ergebnisse zeigten, dass Pb überwiegend in Nichteisenmetallen und in gewissem Maße in der mineralischen Fraktion angereichert wird. Cd wird gleichermaßen in Nichteisenmetalle und die mineralische Fraktion aufgeteilt. Ein Vergleich mit einer in der Literatur beschriebenen Modellierung der Stoffströme in der gleichen Aufbereitungsanlage zeigte, dass ein höherer Anteil an Wertstoffen in Outputströmen angereichert wird als im Modell berechnet, sowie, dass sich die Transferkoeffizienten für Pb und Cd in die mineralische Fraktion aufgrund der verbesserten Verarbeitung geringer darstellen.

1 Einleitung

Bei der energetischen Abfallverwertung entsteht ein kontinuierlicher Massenstrom an Müllverbrennungsrostaschen, wobei in Anlage mit Rostfeuerung 20-25 Gew-% des Inputs an Rostasche und in Anlagen mit Wirbelschichtfeuerung 10-15 Gew-% des Inputs an Bettasche anfallen [1]. Diese Rückstände werden in der Regel aufbereitet, um wertvolle Ressourcen, insbesondere Eisen- und Nichteisenmetalle >4 mm zurückzugewinnen [2]. Nach dieser Aufbereitung werden die mineralischen Restfraktionen in einigen Ländern,

wie Dänemark oder den Niederlanden, im Straßenbau verwendet [3]. Die Aschenaufbereitung entwickelt sich derzeit dahingehend, dass einerseits Metalle aus der Feinfraktion gewonnen werden und in einigen Ländern, darunter auch Österreich, dass die mineralische Fraktion zukünftig als Gesteinskörnung in Beton genutzt werden kann [1]. Hierzu müssen sowohl die nationalen Umweltauflagen, welche in Österreich im Bundesabfallwirtschaftsplan festgeschrieben sind, als auch die Anforderungen der Betonindustrie erfüllt werden [4], [5]. Um die Aufbereitung von Rost- und Bettaschen hinsichtlich ihrer Fähigkeit zu beurteilen, Schwermetalle in Senken (Metalle für Recycling oder Deponiefractionen) zu konzentrieren und eine Anreicherung in der mineralischen Fraktion zu erzielen, wird die Durchführung einer Stoffflussanalyse empfohlen [6]. In dieser Studie wurden die Stoffflüsse der umweltrelevanten Schwermetalle Pb und Cd bei einer Nassaufbereitung untersucht.

2 Methodik

In einem Großversuch wurden 200 Tonnen Rostasche in einer Nassaufbereitungsanlage in Österreich behandelt. Eine detailliertere Beschreibung der Aufbereitungsanlage erfolgte bereits durch [7]. Für alle Outputströme wurden die Gesamtmassen bestimmt und Proben zur Bestimmung des Wassergehalts und der chemischen Zusammensetzung entnommen. Von Eisen- und Nichteisenmetallen >50 mm wurden nur die Massenströme ermittelt. Die Eisen- und Nichteisenmetalle mit einer Partikelgröße von 4–50 mm wurden von Hand sortiert und gewogen. Der Cd- und Pb-Gehalt in diesen Strömen wurde durch Literaturdaten abgeschätzt [8]. Fraktionen aus unverbrannten Materialien wurden wegen ihren vernachlässigbaren Massenstroms nicht in der Auswertung berücksichtigt. Alle anderen Ausgangsströme wurden nach intensiver Probenvorbereitung mittels Totalaufschluss und ICP-OES analysiert. Durch die Ermittlung der Konzentrationen aller Outputströme sowie der Massenverteilung konnten Transferkoeffizienten für Pb und Cd berechnet sowie auf die Gesamtkonzentration in der Rostasche rückgeschlossen werden. Die Berechnung der Gesamtkonzentration über die Outputs einer Aufbereitungsanlage wurde bereits von [9] empfohlen, da aufgrund der hohen Heterogenität des Ausgangsmaterials eine repräsentative Beprobung für die etwas homogeneren Ausgangsströme einfacher durchzuführen ist.

3 Resultate

Es wurde festgestellt, dass die Massenflüsse der Metalle >4 mm ca. 8 % der Gesamtmasse bezogen auf den Input (Trockenmasse) ausmachen, während 91 % der Gesamtmasse durch die Laboranalysen repräsentiert sind. Weniger als 1 % entfällt auf den Massenstrom an unverbranntem Material. Für Pb konnten folgende Transferkoeffizienten auf Basis 100% im Input ermittelt werden:

- 49 % in die mineralische Fraktion
- 24 % in Rückstände für die Deponierung
- 15 % in Metalle Güter >4mm
- 12 % in Metalle Feinfraktion

Das bedeutet, dass 27 % des Pb in Outputströmen angereichert werden, die an Recycler abgegeben werden können, wobei Recyclingverluste zu erwarten sind. Da derzeit die mineralische Fraktion ebenfalls deponiert wird, gelangen 73% des in der Rostasche enthaltenen Pb direkt auf die Deponie.

Für Cd verteilen sich 100 Gew-% im Input wie folgt:

- 57 % in die mineralische Fraktion
- 36 & in Rückstände für die Deponierung
- 1% in Metalle Güter >4mm
- 6 % in Metalle Feinfraktion

Das bedeutet, dass 7 % des Cd in Metallrecyclinganlagen landen und etwa 93 % auf Deponien gelangen.

Bildet man die Summe der massengewichteten Konzentrationen, die für jeden Output ermittelt wurden, erhält man die rückgerechnete Inputkonzentration der unaufbereitete Rostasche. Dies ergab für Pb 1050 mg/kg TS und für Cd 7,8 mg/kg TS. Ein Vergleich mit Literaturdaten von [10] (Rostasche von Anlage A, gleiche Müllverbrennungsanlage wie in dieser Studie) zeigt ähnliche Ergebnisse für Pb (1100± 390 mg/kg TS), jedoch wurde ein etwas höherer mittlerer Wert für Cd (4,6 ± 2,7 mg/kg TS) in der vorliegenden Studie festgestellt.

4 Schlussfolgerung

Beim Vergleich mit den von Huber modellierten Transferkoeffizienten (Anlage B, gleiche Nassaufbereitungsanlage wie in dieser Studie) sind einige Unterschiede erkennbar [11]. Wichtig zu beachten ist, dass Huber die Aufbereitungsanlage vor deren Erweiterung, wie in [12] beschrieben, für die Modellierung herangezogen hat, während diese Studie auf dem erweiterten Prozess, welcher durch Mühl beschrieben wurde, basiert [7].

Von Huber wurde ermittelt, dass 3 % Pb in Fraktionen vorliegt, die als Recyclingfraktionen abgegeben werden können, während in der vorliegenden Studie 27 % des Pb diesen Fraktionen zugeordnet wurde. Für Cd stehen 25 % modelliert 7 % real gegebenüber. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass insbesondere metallreiche Outputströme in der Regel einem Reinigungsschritt unterzogen werden müssen, bevor diese an eine Metallhütte abgegeben werden können, was den Recyclingmassenanteil in der Regel verringert. Dies wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Die verbesserte Aufbereitung zielt auch darauf ab, die Qualität der mineralischen Fraktion zu verbessern, die potentiell als Zuschlagstoff in Beton verwendet werden kann. Während Huber für Pb einen Transferkoeffizienten von 86 % in die mineralische Fraktion errechnet hat, zeigt diese Studie basierend auf realen Probenahmen, dass dies 49 % ausmacht. Laut Modell von Huber (2020) wird Cd zu 62 % in die mineralische Fraktion überführt, im Gegensatz zu 57 % in dieser Studie.

Eine detaillierte Analyse der Outputströme einer Aufbereitungsanlage für Rost- und Bettaschen hilft zu verstehen, in welchen Outputs die Elemente Pb und Cd vorwiegend angereichert werden. Der Vergleich mit modellierten Daten zeigte, dass Primärdaten aus Probenahmen ein vollständiges Bild des Prozesses zeichnen. Es zeigte sich auch, dass die jüngste Verbesserung der Anlage den Anteil an Materialien erhöhte, die recycelt werden können. Während das Recycling von Metallfraktionen hauptsächlich monetär und marktgetrieben ist (qualitätsabhängige Schrottpreise etc.), müssen bei der mineralischen Fraktion die Grenzwerte gemäß des Bundesabfallwirtschaftsplans eingehalten werden, um diese als industriell

hergestellte Gesteinskörnung in Beton nutzen zu können [4]. Eine aktuelle Studie von Blasenbauer et al. zeigt, dass der Eluat- und Gesamtgehalt an Pb und Cd in feineren Korngrößen erhöht ist [13]. Daraus abgeleitet könnte ein Absieben der Feinfraktion zukünftig einen weiteren Behandlungsschritt darstellen, um für die mineralische Grobfraktion einen Einsatz als Gesteinskörnung im Beton zu ermöglichen.

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 Brantner Österreich GmbH, Linz Service GmbH, Wien Energie GmbH, und Wopfinger Transportbeton Ges.m.b.H. sowie bei unserem strategischen Partner, der Magistratsabteilung Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien (MA 48).

Literatur/Quellen

- [1] J. Mühl, S. Skutan, G. Stockinger, D. Blasenbauer, und J. Lederer, „Glass recovery and production of manufactured aggregate from MSWI bottom ashes from fluidized bed and grate incineration by means of enhanced treatment“, *Waste Management*, Bd. 168, S. 321–333, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.wasman.2023.05.048.
- [2] M. Šyc u. a., „Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments“, *Journal of Hazardous Materials*, Bd. 393, S. 122433, Juli 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122433.
- [3] D. Blasenbauer u. a., „Legal situation and current practice of waste incineration bottom ash utilisation in Europe“, *Waste Management*, Bd. 102, S. 868–883, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2019.11.031.
- [4] „Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023 Teil 1“, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien, 2023.
- [5] „ÖNorm B4710 Beton- Teil1: Festlegung, Herstellung und Konformitätsnachweis“.
- [6] N. Stanisavljevic und P. Brunner, „Combination of material flow analysis and substance flow analysis: A powerful approach for decision support in waste management“, *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, Bd. 32, Aug. 2014, doi: 10.1177/0734242X14543552.
- [7] J. Mühl, „Treatment of MSWI Bottom Ash from Grate Incineration and Fluidized Bed Combustion: A Comparison“, in *Proceedings Sardinia 2023*, Sardinia: CISA Publisher, 2023.
- [8] C. Riber, C. Petersen, und T. H. Christensen, „Chemical composition of material fractions in Danish household waste“, *Waste Management*, Bd. 29, Nr. 4, S. 1251–1257, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.09.013.
- [9] L. S. Morf u. a., „Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste – Sources and fate in a Swiss incineration plant“, *Waste Management*, Bd. 33, Nr. 3, S. 634–644, März 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2012.09.010.

- [10] F. Huber, D. Blasenbauer, P. Aschenbrenner, und J. Fellner, „Chemical composition and leachability of differently sized material fractions of municipal solid waste incineration bottom ash“, *Waste Management*, Bd. 95, S. 593–603, Juli 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.06.047.
- [11] F. Huber, „Modelling of material recovery from waste incineration bottom ash“, *Waste Management*, Bd. 105, S. 61–72, März 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.01.034.
- [12] K. Pfandl u. a., „X-ray fluorescence sorting of non-ferrous metal fractions from municipal solid waste incineration bottom ash processing depending on particle surface properties“, *Waste management & research*, Bd. 38, Nr. 2, S. 111–121, Feb. 2020, doi: 10.1177/0734242X19879225.
- [13] D. Blasenbauer, F. Huber, J. Mühl, J. Fellner, und J. Lederer, „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*, Bd. 161, S. 142–155, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.wasman.2023.02.021.

Kontakt

DI Simon Hofer, wissenschaftlicher Mitarbeiter

CD-Labor für Recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, TU Wien

Getreidemarkt 9/166.1

A-1060 Wien

E-Mail: simon.hofer@tuwien.ac.at

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

One-Step Activation of Residual Wood for Activated Carbon Production – A Contribution to the Circular Economy

Abstract: Conventional activated carbon production uses hard coal or lignite as a raw material. Alternative feedstocks are required to reduce the ecological footprint of AC and wood-based materials have been found promising. In 2017, a meta-analysis revealed that the EU-28-nations' waste wood amounted to 42.7 to 57.7 million tonnes per year. In Austria, only 19 % of waste wood is recycled, with the chipboard industry accounting for the majority. The majority of the remaining waste wood, which is often contaminated with organic and inorganic substances such as wood preservatives or colorants, is thermally utilized. Therefore, the use of such wood-based materials could be a potential strategy to for AC. This study examined a thermochemical one-step activation process in a fluidised-bed reactor at temperatures of 750, 800, and 850 °C. CO₂ and H₂O were used as activation agents for 5, 12.5, and 20 minutes at the mentioned temperatures. Nitrogen ad/desorption isotherms, which were analysed using the BET-method, showed high specific surface areas (> 800 m² g⁻¹) with up to 70 % micropore share. The produced AC could be used in environmental applications such as wastewater treatment.

1 Introduction

The pollution of surface and groundwater resources with organic micropollutants (OMPs) from anthropogenic sources is the negative impact of urbanisation and industrialisation (Pathania et al. 2017). Negative effects on human health are not completely ruled out, but it is now known for a long time that hormones like oestrogen has a long-term effect on the reproduction of fish population (Kienle et al. 2015). On top of that even the state of the art wastewater treatment plants (WWTP) cannot or are only partly able to remove these pollutants (Clara et al. 2005), therefore, WWTPs are the main pathway for pharmaceuticals and other micro pollutants, like pesticides or heavy metals to enter the environment (Kasprzyk-Hordern et al. 2009). In order to remove these impurities from contaminated water, there are several treatment methods like advanced oxidation, bio sorption, membrane filtration and the two common ones, ozonation and adsorption (Crini und Lichtfouse 2019). The adsorptive ability of activated carbon (AC) is tested and approved for micropollutant removal in wastewater treatment (Back et al. 2020). Recently, researchers have focused on easily available, low-cost and renewable materials for AC production, like rice and coffee husks (Tchuifon et al. 2015), olive kernels (El Ouahedy et al. 2020), and coconut shell (Cheng et al. 2021), or organic waste (Thithai et al. 2021). Wood-based materials are widely available in Central and Northern Europe – logging in the EU amounts to 510 mio. m³ per year (Eurostat 2021) – and Hagemann et al. 2020 postulated from a Swiss perspective that wood-based materials should be considered as a possible strategy to avoid the large environmental footprint of conventional AC production. Waste management in Austria is typically centralised,

resulting in highly heterogeneous WW mixtures in terms of quality and age. According to the Austrian Waste Management Agency (Neubauer 2020), the amount of WW produced in 2019 was 1.2 tonnes annually and for the EU-28 countries 42.7 to 57.7 mio. tons in 2017 (Cornelia Vogler et al. 2020). The material recycling (Fehrenbach et al. 2017) of waste wood in Austria amounts to only 19 %, the product of which is used exclusively in the particleboard industry. This study focused on the use of RW as a potential resource for the production of AC via a one-step (1S) activation with CO₂ and H₂O in a fluidised bed reactor.

2 Materials & Methods

2.1 Production of activated carbons

The fine fraction of WW (< 30 mm) provided from a local supplier, was firstly milled (Pulverisette 19, Fritsch GmbH) to a particle size range of 3.5 to 9.5 mm and dried at 105 °C for 24 h for the subsequent activation processes. The activation was carried out in a batch laboratory-scale fluidised bed reactor (David Gurtner 2021), was filled with 7 g of RW and was sealed at the top and bottom with metal frites (Tridelta Siper GmbH) made out of stainless steel 1.4404 with a pore diameter of 14 µm. The loaded reactor with the heating coil was placed in a muffle furnace (B150, Nabertherm GmbH). In the heating/cooling phase N₂ perfused the reactor at a rate of 0.5 l min⁻¹ until the activation temperature of 750, 800, and 850 °C with a heating rate of 10 °C min⁻¹, was reached. For the activation time of 5, 12.5, and 20 min, the gas flow was switched to CO₂/H₂O with a gas flow of 2 l min⁻¹.

2.2 Characterisation of activated carbons

Physisorption (3Flex, Micromeritics) was applied to determine the structural properties of the AC samples using the gas N₂. For every sample, an amount of 100 to 150 mg was degassed (VacPrep 061, Micromeritics) at 200 °C overnight prior to analysis. Full N₂ adsorption/desorption isotherms were collected at 77 K with 60–80 data points at 10 s equilibration time. From the N₂ isotherms, the specific surface areas (S_{BET}) using the BET method and meeting the Rouquerol criteria (Rouquerol et al. 2007)) were determined. The 2D-heterogeneous surfaces-NLDFT-kernel (Jagiello et al. 2015) was applied to calculate the pore size distribution (PSD) from N₂ considering the spectrum from micropores to macropores.

3 Results

The results of the thermo-chemical activation with the activation agent CO₂ and H₂O are displayed in 2D contour plots in *Figure 1*. With a rising temperature from 750 to 850 °C, the resulting specific surface area (S_{BET}) also increased. Higher residence times also promoted S_{BET}. The highest achieved S_{BET} of 620 m²g⁻¹ was at 850 °C and 12.5 min.

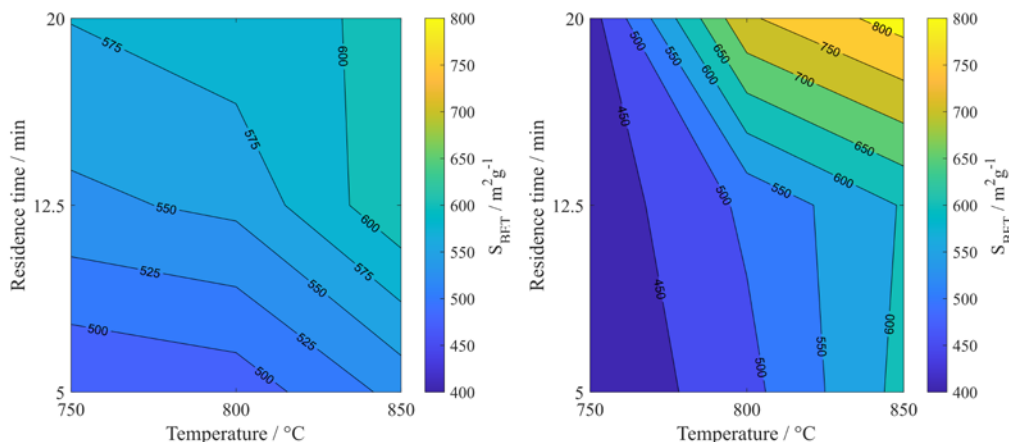


Figure 1: 2D contour plot of CO₂ (left) and H₂O (right) activation

H₂O activation was carried out with the same parameters as for CO₂, resulting in 2D contour plots (Figure 1). The obtained S_{BET} also increased with temperature and residence time, which resulted in a S_{BET} of 822 m²g⁻¹ at 850 °C and 20 min.

From the previous shown results, it became evident that H₂O activation created a significantly higher S_{BET} than CO₂ activation. Looking at the PSD, there is an opposite trend. CO₂ activation created a very a high share of micropores of nearly 70 %, which are relevant for adsorption performance, compared to 35 % of the H₂O activation. Adsorption also needs mesopores as pathways for the adsorptive to enter the micropores. Therefore, mesopores should not be neglected.

4 Conclusion

The results above demonstrate the potential for producing AC through thermo-chemical 1S activation, resulting in a high S_{BET} for OMP adsorption. This method is both cost-effective and environmentally friendly. However, capturing contaminants of RW will require additional exhaust gas treatment. Using RW as feedstock can also contribute to the circular economy and reduce greenhouse gas emissions compared to conventional AC production methods. Future experiments will focus on the adsorption performance of AC from OMPs.

Acknowledgement

The financial support by the Austrian Federal Ministry of Labour and Economy, the National Foundation for Research, Technology and Development and the Christian Doppler Research Association is gratefully acknowledged.

References

- Back, Jan O.; Hupfaut, Benjamin; Rößler, Annette; Penner, Simon; Rupprich, Marco (2020): Adsorptive removal of micropollutants from wastewater with floating-fixed-bed gasification char. In: *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8 (3), S. 103757. DOI: 10.1016/j.jece.2020.103757.
- Cheng, Hairong; Ye, Guangzheng; Wang, Xiaohong; Su, Chunjing; Zhang, Weixia; Yao, Fan et al. (2021): Micro-mesoporous carbon fabricated by Phanerochaete chrysosporium pretreatment coupling with chemical activation: Promoting effect and toluene adsorption performance. In: *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (2), S. 105054. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105054.
- Clara, M.; Strenn, B.; Gans, O.; Martinez, E.; Kreuzinger, N.; Kroiss, H. (2005): Removal of selected pharmaceuticals, fragrances and endocrine disrupting compounds in a membrane bioreactor and conventional wastewater treatment plants. In: *Water research* 39 (19), S. 4797–4807. DOI: 10.1016/j.watres.2005.09.015.
- Cornelia Vogler; Bernhard Wern; Michael Porzig; Eva Hauser; Hermann Guss; Prof. Frank Baur (2020): Altholz – Quo vadis? Abschlussbericht. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - BMWi (2020). Saarbrücken. Online verfügbar unter https://www.energetische-biomassennutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB134_AHqV_Abschlussbericht_steag_izes_20200701_end.pdf.
- Crini, Grégorio; Lichtfouse, Eric (2019): Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. In: *Environ Chem Lett* 17 (1), S. 145–155. DOI: 10.1007/s10311-018-0785-9.
- David Gurtner (2021): Thermochemical activation optimization for high porous powdered carbon production from gasification residues. Master Thesis. MCI | The Entrepreneurial University, Innsbruck. Environmental, Process and Energy Engineering.
- El Ouahedy, Nadia; Zbair, Mohamed; Ojala, Satu; Brahmi, Rachid; Pirault-Roy, Laurence (2020): Porous carbon materials derived from olive kernels: application in adsorption of organic pollutants. In: *Environmental science and pollution research international* 27 (24), S. 29967–29982. DOI: 10.1007/s11356-020-09268-0.
- Eurostat (2021): Holzeinschlag in der Europäischen Union nach Ländern im Jahr 2020 [Logging in the European Union by country in 2020]. Hg. v. Eurostat.
- Fehrenbach, Horst; Köppen, Susanne; Kauertz, Benedikt; Detzel, Andreas; Wellenreuther, Frank; Breitmayer, Elke et al. (2017): BIOMASSEKASKADEN [BIOMASS CASCADES]. Mehr Ressourceneffizienz durch Mehr Ressourceneffizienz durch Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis Theorie zur Praxis [More resource efficiency through More resource efficiency through cascade use of biomass - from theory to practice Theory to practice]. Hg. v. Umweltbundesamt (53).
- Hagemann, Nikolas; Schmidt, Hans-Peter; Kägi, Ralf; Böhler, Marc; Sigmund, Gabriel; Maccagnan, Andreas et al. (2020): Wood-based activated biochar to eliminate organic micropollutants from biologically treated wastewater. In: *The Science of the total environment* 730, S. 138417. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138417.
- Jagiello, Jacek; Ania, Conchi; Parra, Jose B.; Cook, Cameron (2015): Dual gas analysis of microporous carbons using 2D-NLDFT heterogeneous surface model and combined adsorption data of N₂ and CO₂. In: *Carbon* 91, S. 330–337. DOI: 10.1016/j.carbon.2015.05.004.
- Kasprzyk-Hordern, Barbara; Dinsdale, Richard M.; Guwy, Alan J. (2009): The removal of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs during wastewater treatment and its impact on the quality of receiving waters. In: *Water research* 43 (2), S. 363–380. DOI: 10.1016/j.watres.2008.10.047.

- Kienle, C.; Kase, R.; Schärer, M.; Werner, I. (2015): Anwendung von Biotests zur Evaluation der Wirkung und Elimination von Mikroverunreinigungen. In: *Aqua & Gas* (95), S. 18–26.
- Neubauer, Christian (2020): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2021: Tech. rep. In: *Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: Abteilung 3*.
- Pathania, Deepak; Sharma, Shikha; Singh, Pardeep (2017): Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from *Ficus carica* bast. In: *Arabian Journal of Chemistry* 10, S1445-S1451. DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.04.021.
- Rouquerol, J.; Llewellyn, P.; Rouquerol, F. (2007): Is the bet equation applicable to microporous adsorbents? In: *Characterization of Porous Solids VII - Proceedings of the 7th International Symposium on the Characterization of Porous Solids (COPS-VII)*, Aix-en-Provence, France, 26-28 May 2005, Bd. 160: Elsevier (Studies in Surface Science and Catalysis), S. 49–56.
- Tchuifon, T.D.R.; Anagho, S. G.; Nche, G. N.; Ketcha, J. M. (2015): Adsorption of salicylic and sulfosalicylic acid onto powdered activated carbon prepared from rice and coffee husks. In: *International Journal of Current Engineering and Technology* (5), S. 1641–1652.
- Thithai, Vilaysit; Jin, Xuanjun; Ajaz Ahmed, Muhammed; Choi, Joon-Weon (2021): Physicochemical Properties of Activated Carbons Produced from Coffee Waste and Empty Fruit Bunch by Chemical Activation Method. In: *Energies* 14 (11), S. 3002. DOI: 10.3390/en14113002.

Contact

Dominik Bosch, MSc, Doctoral Student

Josef Ressel Centre for the production of powdered activated carbon from municipal residues, MCI–The Entrepreneurial School, Universitätsstraße 15, 6020 Innsbruck, Austria

Tel-Nr. +43 512 2070 3252

E-Mail: dominik.bosch@mci.edu

TEIL 6

Biologische Verfahren

Leitung:

Prof. Dr. Michael Nelles

Increasing the Efficiency of Mechanical-Biological Residual Waste Treatment through the Fermentation of the Liquid after Pressing the Organic Fractions

Abstract: *The recent research and studies on the European Union (EU) level proves the huge mass of organic fractions landed and collected in the residual waste bin. The not segregated biowaste contributes to climate relevant greenhouse gas emissions both in regions where no separate collection of organic waste is in force, and during the transition phase from mixed waste to separate collection system. Therefore, the valorization of this waste stream remains a challenging topic faced by responsible authorities. To tackle this, generally, three practices are implemented in EU member states, namely: 1) landfilling of untreated mixed Municipal Solid Waste (MSW), 2) thermal recovery, and 3) Mechanical-Biological Treatment (MBT). The commonly employed treatment method for residual waste at the MBT plants is aerobic treatment that aims only in stabilizing the inert, through which the energy content in the waste is released in form of heat, in order to fulfill the disposal criterion in the respective region that mitigates its environmental impact after landfilling. The present study evaluates an alternative process to tackle and valorize the organics in the residual waste to generate biogas. The employed method is a multi-reactor Wet Anerobic digestion (WAD). In this context, an MBT plant with an integrated WAD and a throughput capacity of 50,000 tons residual waste per year in Germany was assessed as a pilot project case study. The operational data and weekly substrate analyses were conducted for the study period of 30 months in regular operation model.*

1 Introduction

The total quantity of MSW produced by the EU27 is 209 million tons (Mt), from which 122 Mt is residual waste. This is equivalent to 77 Mt of organic waste collected in residual waste bin which is either landfilled or delivered to thermal treatment facilities (Umweltbundesamt, 2023). Despite the EU regulation for obligatory separate collection of biowaste from 1. January 2024 and longstanding history of waste segregation in Germany, 5,6 Mt of organic waste collected with residual waste in 2021 (Statistisches Bundesamt, 2022). The research studies an alternative method to tackle and valorize this organic stream in residual waste. Despite the environmental and economic advantages which are in line with the German Bioeconomy Strategy of 2012, the novelty of the method is its high level of technical flexibility to be integrated into existing MBT plants or be part of a new project. The Integration of WAD into the MBT plant of this study was estimated to cover 80% of the plant energy demand.

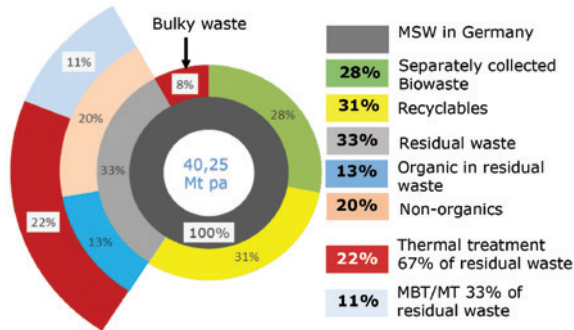


Figure 1: Composition and disposal of MSW in 2021 In Germany (source: Umweltbundesamt, 2023)

The WAD comprised of two main components: a) Screw Press (SP) and b) five 45 m³ and one 435 m³ reactors. After the pretreatment and sieving of the residual waste, the fine organic fractions smaller than 60mm (FF<60mm) are mixed with liquid digestate (GR), which is recirculated from the WAD, and fed to a SP type AS 625 of Bellmer-Kufferath. The pressing technique generates organic-rich press water (PW) with high Dissolved Organic Carbon (DOC) concentration and ultimate biogas generation potential, that fed to the multi-reactor WAD. The PW takes 18 days of Hydraulic Retention Time (HRT) to flow through six WAD reactors to degrade about 75% of the DOC. The later is converted to biogas that is treated and utilized to produce renewable energy through a Combined Heat and Power (CHP) unit. On the other hand, the Press Cake (PC) from the SP is treated aerobically. The research aims to optimize the performance of the SP operational set up in order to enhancing press water properties. The impact of the WAD on the aerobic treatment of PC to produce stabilized MBT Inert were also evaluated.

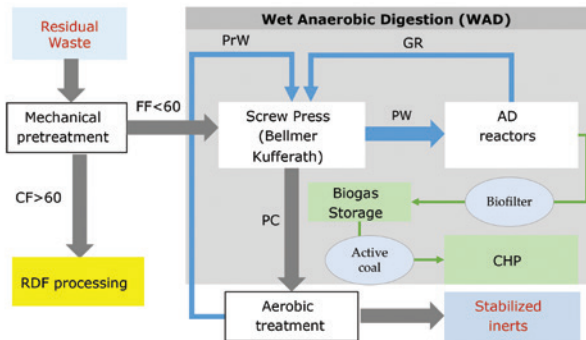


Figure 2: Operational model of WAD and MBT plant of this study

2 Methodologies – Research Program for Process Monitoring and Data Collection

The research program dealt with data collection from different aspects and every step of the MBT plant as it is summarized in table 1. Due to the seasonal and regional variation of the residual waste in composition, waste sorting analysis campaigns were carried out in summer and winter for the average organic content according to the saxony method in Germany (Saxony LAGA, 2008). Besides the Impact of the biowaste, the operation of the SP has the significant influence on the PW quality such as: a) press pressure, b) press speed, c) press basket opening size, d) digestate/FF<60 ratio, e) hydrolysis time between digestate and FF<60 before pressing technique and f) feeding amount of FF<60+GR to the SP (tons/h). In total, 23 and 22 trials were conducted on site and in laboratory, respectively, to optimize the SP operation performance in which the SP was operated under different conditions by changing only one variable and fixing the other parameters so that the result trace back to the cause.

Table 1: Methodologies implemented for evaluation of the MBT plant of the study

MBT treatment step	On site and laboratory experiments and analysis
Characteristics of waste and PC	<ul style="list-style-type: none"> • Sorting and sieving analysis in different seasons. • Laboratory analysis for physiochemical characteristics.
Performance of SP	<ul style="list-style-type: none"> • On site experiment with various set up parameters of SP. • Laboratory scale tests.
Substrate properties in WAD reactors	<ul style="list-style-type: none"> • Weekly sampling from six reactors and PW for 30 months. • Laboratory analysis for characterization incl. biogas potential test (GB21).
Quality of sand removed from WAD reactors	<ul style="list-style-type: none"> • Recording of the sand mass removed from WAD reactors. • Particle size distribution and composition of sand from each WAD reactor.
Biogas quantity and composition	<ul style="list-style-type: none"> • Biogas volume and quality capture through an online system. • Daily manual biogas composition at different treatment stage.
Aerobic treatment of inert	<ul style="list-style-type: none"> • laboratory analysis for quality control before disposal.
Drying process of Refused Derived Fuel (RDF)	<ul style="list-style-type: none"> • On site experiments to optimize the utilization of heat from CHP to dry RDF produced from residual waste coarse fractions>60mm.
Mass, water and energy balance	<ul style="list-style-type: none"> • Mass balance for the MBT plant before/after the integration of the WAD. • Water and energy balance for the MBT plant.

A regular weekly sampling schedule from each WAD reactor was followed and analyzed for TS, oTS, pH, EC, VFA/TIC, DOC, NH₄-N, TNb and irregularly for TC, TOC, and GB21 in laboratory. Despite the low mass of the deposited sediment in the reactors, the sand was used for wet sieve analysis and composition in order to achieve the effective press basket openings e.g., 5 mm. The efficiency of the WAD was evaluated by calculating the DOC degradation in each step throughout the reactors. Moreover, the treatment of biogas to eliminate H₂S and its utilization at CHP unit to generate heat and electricity was continuously controlled.

3 Results and Discussions

The manual sorting analysis showed the share of organic in the residual waste is 25% in the study area, of which kitchen waste, that has a high biogas generation potential, is the major part with more than 70%. This is clearly lower below the average value across Germany with 39,3% (Dornbusch et al., 2020). The drying of FF<60 that is separated from the residual waste at 105 °C and 550 °C has shown 42% and 25% of moisture

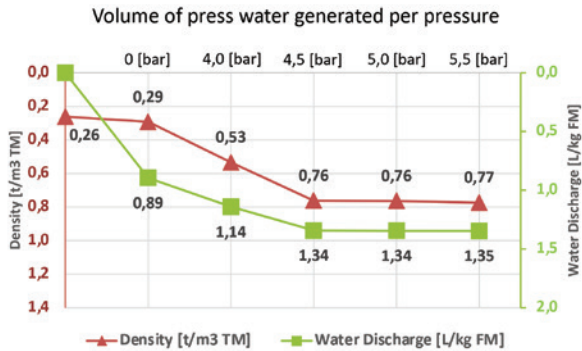


Figure 3: Correlation between press pressure and generation of PW

content and oTS, respectively. The on site trial campaigns at the MBT plant and laboratory tests confirmed that the maximum amount of DOC washed out from FF<60 to the PW can be achieved by pressing the mix of FF<60 and digestate with 4,5 bars. Any pressure beyond that did not result in winning more DOC and is not economically viable due to intensive energy demand as illustrated in figure 3. Given a constant press pressure, Increasing the digestate/FF<60mm ratio from 0,8 to 1,0 m3/Mg resulted in improving the biogas generation from 400 to 500 l(N)/kg oTS in PW. Regardless of the previous two variables, replacing the press basket around the SP from 8 to 5 mm showed no significant impact on the total biogas volume produced at WAD reactors. However, the bigger openings led to a slightly higher mass of minerals in the PW and thus obliges more frequent desludging of the WAD reactors. The mass of the sand removed decreased from the primary (1,2 Mg TS/week) towards the secondary reactor (0,15 MG TS/week).

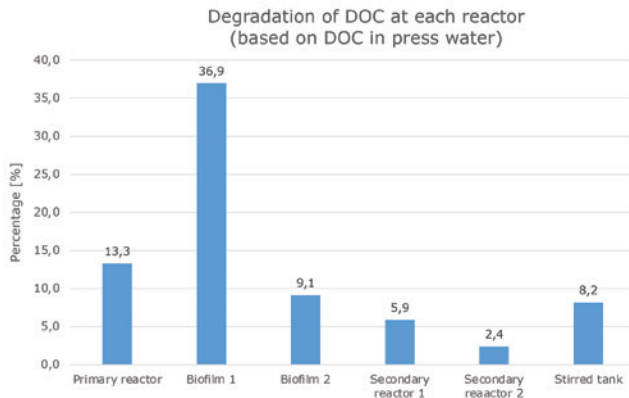


Figure 4: Degradation of DOC at each reactor of WAD

Figure 4 shows that nearly 75% of the DOC fed to the WAD is degraded. Due to the acidity in the primary reactor, only 13% of the DOC is used by microorganisms. Whereas, the major DOC (37%) is converted to biogas in the first biofilm reactor. The function of both secondary reactors is to separate the produced biogas,

which is dissolved in the substrate, from the substrate. Also, the degradation of non-easily degradable organics occurs to some extent in the stirred tank in which the substrate remains for a longer period.

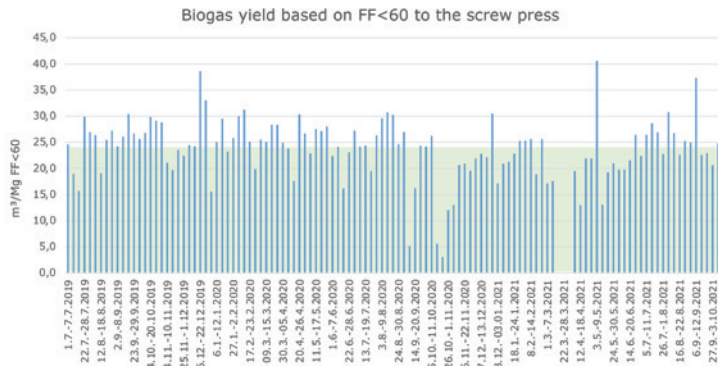


Figure 5: Production of biogas from WAD per ton FF<60

The produced biogas is collected from primary, secondary reactors and piped to the stirred tank. The average biogas production of 2,5 years proves a biogas potential rate of 25 m³/Mg FF<60. The CH₄ concentration lies at 60%. The H₂S content is below 2000 ppm that is reduced by 98% through an ECO-Cover filter installed in the stirred tank and a biological filter. The rest is eliminated at an active coal filter unit directly before the CHP. No inhibitory affect in the WAD evidenced due to trace elements such as NH₄-N.

The generated heat from the CHP is applied for drying the RDF containers with 33 m³ capacity. About 7% of the mass was lost by evaporation through forced aeration of a 70 °C air into the containers for 24 hours. In 2021, the mass balance of the MBT plant showed that 33% of the input MBT ended as stabilized Inert for landfilling and the 70% is recycled. The latter is above the average recycling rate of the whole MSW in Germany with 67% (Umweltbundesamt, 2021). This shows ambitious potentials for other MBT plant. For example, in Germany, about 1,800,000 tons/year of residual waste is processed at 16 MBT plants (Ketelsen and Becker 2023). The WAD can be a potential alternative for renewable energy production for least at 10 MBT plants in Germany.

References

- Dornbusch, Heinz-Josef; Hannes, Lara; Santjer, Manfred; Böhm, Carsten; Wüst, Susanne; Zwisele, Betram; Kern, Michael; Siepenkothen, Hans-Jörg; Kanthak, Manfred (2020): Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien, Abschlussbericht, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>
- Ketelsen, Ketel; Becker, Gabriele (2023): Weiterentwicklung der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) mit den Zielen der Optimierung der Ressourceneffizienz und Minimierung von Treibhausgasemissionen.

Nelles, Michael; Böning, Thomas, Bewani, Rzgar; Nassour, Abdallah (2022): Endbericht der wissenschaftlichen Begleitung von mechanisch-biologischen Restabfallbehandlungsanlage in Erbenschwang, Bayern, Deutschland.

Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft (2008): Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)-Methodensammlung Abfalluntersuchung. Version 1.0.

Statistisches Bundesamt (2022): Umwelt, Abfallwirtschaft, https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html

Umweltbundesamt (2023): Abfall- und Kreislaufwirtschaft, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfall-kreislaufwirtschaft>.

VDI-RICHTLINIEN 4630, November (2016): Fermentation of organic materials, Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests, checked on 6/23/2023.

Contact

M. Sc., Rzgar Bewani, PhD Student

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft,
Universität Rostock

Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock

Tel.-Nr. +49 163 1569 231

E-Mail: rzgar.bewani@uni-rostock.de

Homepage: <https://www.auf.uni-rostock.de/professuren/bau-und-umweltbereich/abfall-und-stoffstromwirtschaft/>

Verwertung organischer Reststoffe als Futtermittel für die Larven der Schwarzen Soldatenfliege in einer Insektenbioraffinerie

Abstract: Bioabfälle sowie Lebensmittelrückläufer und Lebensmittelreste aus Kantinen sind organische Reststoffe, die nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz und der Bioabfallverordnung stofflich und energetisch in Kompostierungs- und Bioabfallvergärungsanlagen verwertet und als organisches Düngemittel in Form von Kompost oder Gärrest eingesetzt werden. Mit der Bioökonomiestrategie der Europäischen Union, der Nationalen Bioökonomiestrategie der Bundesregierung und der Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg rücken organische Reststoffe in den Fokus zur Herstellung von Sekundärrohstoffen und -produkten, um eine Defossilierung zu erreichen und somit einen nachhaltigen Beitrag für Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt zu leisten. Im Verbundprojekt „Die Insektenbioraffinerie – Von der Verwertung organischer Reststoffe und Abfälle bis hin zur Herstellung von Produkten“ wird eine Insektenbioraffinerie vom Labormaßstab (Phase 1) bis zur Demonstrationsanlage (Phase 2) aufgebaut, mit der organische Reststoffe unter Zuhilfenahme der Schwarzen Soldatenfliege in hochwertige Produkte umgewandelt werden. Dabei werden Bioabfälle, Lebensmittelrückläufer und Lebensmittelreste aus Kantinen als Inputstoffstrom ebenso wie die organischen Reststoffe (nicht verwertetes Restsubstrat, Ausscheidungs- und Häutungsprodukte) aus der Insektenbioraffinerie sowie die im Prozess entstehenden Emissionen als Outputstoffstrom betrachtet. Zudem werden die organischen Reststoffe für die Evaluierung möglicher Verwertungspfade genutzt und hinsichtlich des Biogasertrags, 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 (destatis, 2023). Das Bioabfallaufkommen im Siedlungsbereich belief sich im Jahr 2020 auf 14,4 Millionen Tonnen (destatis, 2024). Derzeit werden die anfallenden Bioabfälle sowohl in Biogas- als auch in Kompostierungsanlagen einer Verwertung zugeführt. Mit dem Abkommen zum Europäischen Grünen Deal in der Europäischen Kommission im Jahr 2019 bilden organische Reststoffe einen der Schwerpunkte zur

Förderung der rohstoffeffizienten Kreislaufwirtschaft, um im Zieljahr 2050 Klimaneutralität zu erreichen (Europäische Kommission, 2019). Zur Umsetzung dieser Ziele hat das Land Baden-Württemberg die Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie beschlossen. Diese sieht es vor Rest- und Abfallstoffe, wie die entlang der Lebensmittelkette entstandenen organischen Abfälle, in eine Wertschöpfungskette zu bringen, um daraus Sekundärrohstoffe für industrielle Zwecke herzustellen (Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie BW, 2019).

Ein Meilenstein für den Aufbau einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft kann die Mast von Insekten mit organischen Reststoffen sein. Diese können von Insektenlarven in hochwertige Fette und Proteine umgewandelt und als Rohstoff wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden (Klammsteiner et al., 2020). Im Rahmen des Verbundprojektes „InBiRa“ wird erstmals eine Insektenbioraffinerie in Baden-Württemberg als Pilotanlage aufgebaut, mit der organische Reststoffe aus Lebensmittelrückläufern und Bioabfällen mit Hilfe von Insekten in neue hochwertige Produkte umgewandelt werden. Das hierfür ausgewählte Insekt ist die Schwarze Soldatenfliege „*Hermetia illucens*“. Sie weist eine hohe Futtermittelverwertungseffizienz 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 Exkremente 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 der Arbeitspakete vom ISWA der Uni Stuttgart werden organische Reststoffe (Lebensmittelrückläufer bis hin zu Bioabfällen) so aufbereitet bzw. verwertbar gemacht, dass diese den Fliegenlarven als Futtersubstrat dienen. Dazu ist es erforderlich, die organischen Reststoffe zu zerkleinern, homogenisieren und ggfs. haltbar zu machen. Für eine effiziente Verwertung bzw. Umwandlung der organischen Reststoffe durch die Insektenlarven zu hohen Mengen an Larvenbiomasse soll ein Nährstoffportfolio über verschiedene Futtersubstrate erstellt werden. Als Referenzsubstrat dient klassisches Schweinefutter, das bisher bei der *Hermetia Baruth GmbH* als Substrat zur Larvenfütterung eingesetzt wird. Zur Kreislaufschließung werden das nicht verwertete Futtersubstrat und die Ausscheidungs- und Häutungsprodukte, das sogenannte Restsubstrat (Frass), als weiterer Stoffstrom für die Evaluierung möglicher Verwertungspfade genutzt und hinsichtlich des Biogasertrags, 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 zwei verschiedenen Maßstäben durchgeführt. Im Labormaßstab (Phase 1) werden je Ansatz 10 kg an Futtermischung benötigt und im weiteren Projektverlauf wird für den halbtechnischen Maßstab (Demonstrationsanlage) auf eine Menge von 1000 kg aufskaliert.

Ziel der Laboruntersuchungen in Phase 1 ist die Kombination der organischen Reststoffe für ein bestmögliches Nährstoffverhältnis von Proteinen zu Kohlenhydraten, um ein möglichst großes Larvenwachstum

zu erreichen. Dabei müssen die physikalischen Anforderungen an die Futtersubstrate bei der Larvenmast ebenfalls berücksichtigt werden. Die Futtermischungen werden iterativ weiterentwickelt und daraus Futtermischungskonzepte entwickelt. Die geeignetsten Mischungen werden in der Demonstrationsanlage getestet. Der bei der Fütterung entstehende Frass wird in beiden Phasen auf weitere Verwertungswege hin untersucht. Die bei der Mast entstehenden Emissionen werden in Phase 1 erfasst und anhand derer ein Messkonzept für Phase 2 erstellt. Aus den gewonnenen Emissionswerten in Phase 2 wird ein Konzept zur Abluftreinigung erstellt.

Die Larvenmast und -ernte wird in Phase 1 vom Projektpartner Hermetia Baruth GmbH (Hermetia) durchgeführt und findet in Phase 2 beim Projektpartner Fraunhofer IGB statt. Die aus der Larvenmast erhaltenen Larvenbiomasse (Fett, Protein, Chitin) wird am Fraunhofer IGB als Rohstoff für technische Produkte untersucht. Die Stoffstrombilanz der Insektenbioraffinerie ist in Abbildung 1 dargestellt.

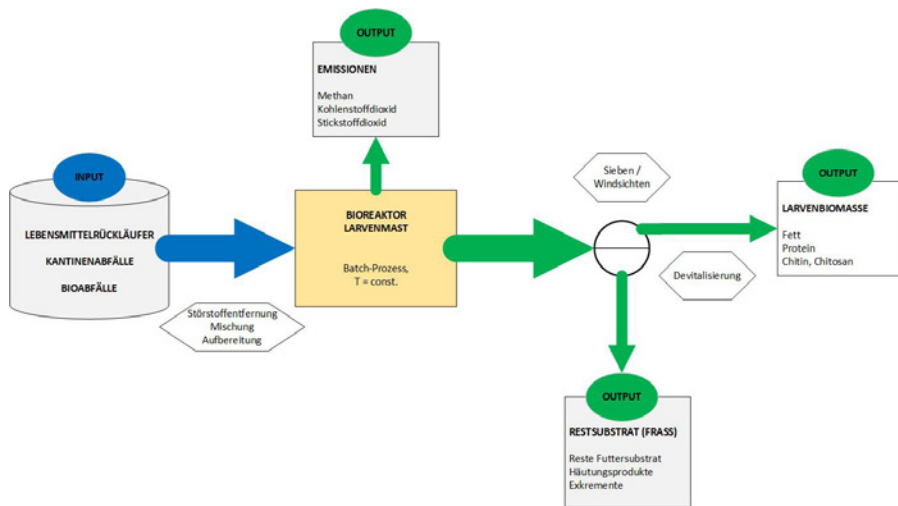


Abbildung 1: Stoffstrombilanz einer Insektenbioraffinerie

2.1 Aufbereitung und Bewertung organischer Reststoffe als Futtersubstrate

2.1.1 Aufbereitung und Mischungskonzepte

Zuerst werden die organischen Reststoffe der drei Kategorien Lebensmittelrückläufer, Kantinenabfälle und kommunale Bioabfälle entpackt, von Störstoffen befreit und im darauffolgenden Schritt einer Grobzerkleinerung (Turbinen-/Walzenzerkleinerung) und anschließend einer Feinzerkleinerung (Schneidmühle mit 3 mm Lochsieb) zugeführt. Dabei wird über die Mischungsverhältnisse oder die Zugabe von Wasser ein Feuchtegehalt von 75 % - 82 % eingestellt (Referenzwerte Projektpartner). Die Kategorie der Lebensmittelrückläufer wird entsprechend der real anfallenden Verhältnissen aus Gemüse/Obst, Backwaren, Molkereiprodukten und Fisch/Fleisch gemischt, ebenso wie die Kantinenabfälle und Bioabfälle in unverändertem Verhältnis an die Larven der Schwarzen Soldatenfliege verfüttert und hinsichtlich dem Larvenwachstum (Larvenmasse,

Überlebensrate, Umsatzrate des Ausgangsmaterials, Substratreduktion) und der Zusammensetzung der Larvenbiomasse (Verhältnis aus Fett und Protein) bewertet.

Bei allen Futtersubstraten werden die Standardparameter Trockenmasse (TM), 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. Für die Nährwertanalytik (Kohlenhydrate, Proteine, Fette und Fasern) wird von jeder Kategorie eine Mischprobe aus zehn Einzelproben erstellt. Die Nährwerte werden als Berechnungsgrundlage für alle Futtersubstrate genutzt. Über den Versuchszeitraum werden die Futtersubstrate iterativ weiterentwickelt und über die Nährwertprofile der Stoffströme ein Nährstoffportfolio mit einem erforderlichen Nährwertverhältnis von Proteinen zu Kohlenhydraten von 1:1 (Gold et al., 2020) entwickelt. Angestrebt wird eine Larvenentwicklung vergleichbar mit dem Referenzsubstrat Schweinefutter.

2.1.2 Larvenmast

Die Larvenmast wird von *Hermetia* in einem Bioreaktor durchgeführt. Dabei werden jeweils 10 kg der Futtersubstrate im Triplikate in Wannen eingewogen, 22 500 Junglarven auf die Mischung gegeben und unter für den Prozess relevanten, kontrollierten Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchte) im Batch-Verfahren umgesetzt. Die Larven werden bei einem TM-Gehalt von 70 – 80 % des verbliebenen Futtersubstrats geerntet (nach 6 - 7 Tagen). Bei der Ernte werden die Larven (Präpuppen) über ein zweistufiges, mechanisches Trennverfahren (Siebung) vom Restsubstrat getrennt und anschließend devitalisiert.

2.1.3 Aufbereitung der Futtersubstrate und die Larvenmast für die Demonstrationsanlage

Die Aufbereitung der Futtersubstrate erfolgt analog zu Phase 1. Es werden hierfür zwei verschiedene Verfahren zur Zerkleinerung, Durchmischung und Entwässerung (verfahrensabhängig, optional) getestet. Die Larvenmast wird in einem Bioreaktor am Fraunhofer IGB durchgeführt.

2.2 Untersuchungen und Bewertung zur Verwendung des Restsubstrats (Frass)

Das aus der Larvenmast angefallene Restsubstrat (Frass) wird hinsichtlich der Substratreduktion, Verunreinigung mit nicht abtrennbaren Larven und der Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der verwendeten Futtersubstrate bewertet. Zudem werden die Standardparameter analog zu den Futtersubstraten analysiert. Für eine weitergehende stoffliche Nutzung im Sinne der Bioökonomie wird der Frass 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 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 CO₂-Gehalt ermittelt. Des Weiteren wird die aerobe Abbaubarkeit nach AT4 sowie die Nutzbarkeit als Düngemittel untersucht.

2.3 Ermittlung der Emissionen und Erstellung eines Emissionskonzeptes

In Phase 1 werden die Konzentrationen von CO₂ und NH₃ minütlich von einem Messsensor in einzelnen Kammern des Bioreaktors ermittelt. Bei Grenzwertüberschreitung (Kontrolle über automatisierten Sensor)

dieser Werte wird Frischluft zugeführt. Die Ergebnisse aus Phase 1 werden auf Phase 2 übertragen und daraus ein Konzept zur Behandlung der Emissionen erstellt. Die Ergebnisse werden im Vergleich zu anderen Anlagen zur Behandlung organischer Reststoffe eingeordnet.

3 Ausblick und wissenschaftlicher Beitrag

Die Lebensmittlrückläufer, Kantinenabfälle und Bioabfälle werden im Bezug auf das Nährwertprofil untersucht und mit dem Referenzsubstrat verglichen. Dabei wird ermittelt, welcher Schwankungsbreite die Futtersubstrate unterliegen und welchen Einfluss diese auf die Larvenausbeute zeigen. Ebenso werden die Futtersubstrate über die Larvenentwicklung und -zusammensetzung bewertet und in Bezug zur Zusammensetzung des Restsubstrats bilanziert. Es werden Mischungen mit berechnetem Nährwertprofil der Kategorien miteinander erstellt und im Gesamtkonzept eingeordnet. Mit Abschluss der Arbeitspakete im Rahmen von InBiRa, soll eine Bilanz über die gesamte Insektenbioraffinerie Aufschluss über die Umwandlung der organischen Reststoffe in Larvenbiomasse und Restsubstrat sowie der weiteren Verwendung des Restsubstrats im Sinne der Bioökonomie geben.

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

- Europäische Kommission (2019) Der europäische Grüne Deal. COM(2019) 640 final.
- 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, [Online] <https://www.igb.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/2022/inbira-mit-insekten-zu-kreislaufwirtschaft.html> (Stand 20.10.22).
- Klammsteiner, T., Turan, V., Fernández-Delgado Juárez, M., Oberegger, S. & In-sam, H. (2020) „Suitability of Black Soldier Fly Frass as Soil Amendment and Implication for Organic Waste Hygienization“, *Agronomy*, Vol. 10, No. 10, S. 1578.
- Landstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg (2019), [Online] <https://mlr.baden-wuerttemberg.de/de/unsere-themen/biooekonomie-und-innovation/landstrategie>. (Stand 03.01.24).
- madebymade, 2022. Insektenzüchter Pegau, Deutschland, [Online] <https://madebymade.eu/> (Stand 20.10.22).

- destatis, 2023. Statistisches Bundesamt, [Online] <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/lebensmittelabfaelle.html> (Abgerufen am 04.01.23).
- destatis, 2024. Statistisches Bundesamt, [Online] https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/09/PD22_371_321.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 Waffenfliegenart *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. 0711/685-63695

E-Mail: bettina.krucker@iswa.uni-stuttgart.de

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

Investigation of the Movement of Microplastic from Biowaste in a Simulated Agricultural Environment Depending on Impacting Factors such as Soil Slope and Rain Intensity

Abstract: This study is focused on microparticles of plastic (MP) that is mainly originated from impurities of biowaste which is later used to produce composts for agricultural purposes like to increase the quality of soils. Plastics found in composts and as a conclusion MP found in agricultural soils can mainly be traced back to polymer products that were not carefully separated from the biowaste. In the present study, MP from polyethylene with a low density in the presence of artificial rain was investigated by the aid of a novel test bench under conditions of three different soil slopes. To further understand the transfer mechanisms of MP in agricultural areas, two different rainfall intensities 95 and 135 L m⁻² h⁻¹ were applied. It was shown that after an artificial rain treatment with an increasing slope, from 10 mg initial MP the main part was washed off and only 4.1, 3.8, and 3.2 mg remained inside the soil depending on the slope (0.0 °, 15 °, and 20 °) the remaining MP in soil diminished by 7.3 % and 22.0 % referred to the flat soil surface. With the higher mentioned rain intensity, the remaining amount of MP found in soil with a 15 ° slope referred to the horizon was determined to be 2.3 mg which is 39.5 % less than the measured value for the lower applied rain intensity.

1 Introduction

Waste management, reduction of green house and methane emissions, and decreased needs for non-renewable raw materials and resources motivate industries to transition from a linear to a circular economy which brings sustainability to societies. Recycling biowaste to compost is the one of the main actions to fulfil circular economy goals (Brucellae's et al., 2020, Manfredi et al., 2011). Although recycling biowaste to compost has environmental and economic sustainability aspects, it has a serious potential to bring microparticles of plastic (MP) to our ecosystems. Finding plastic particles in different size in compost, alarms us that recycled biowaste has a big potential to be one of the reasons for the entrance of MP into the

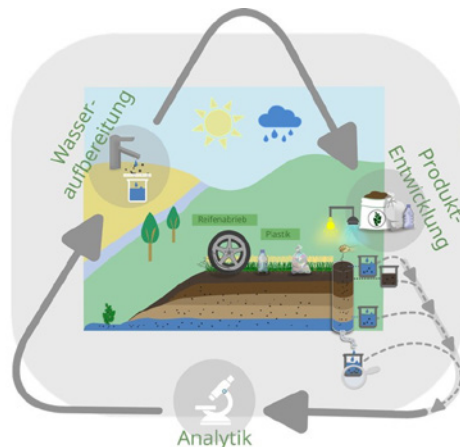


Figure 1. Overview about possible entrance mechanisms of MP into soil and transferring from one ecosystem to another

soil (Werthmann et al., 2018). The Figure 1 shows how MP can be introduced to the soil and how they can be transfer from one ecosystem to another one.

Generally, microplastics (MP) are widespread pollutants in aquatic and terrestrial ecosystems as well as in the air, and their lightweight and small size facilitate their easy transport by wind, and rain or become permanent contamination for the environment (Dong et al., 2022, Lwanga et al., 2022). Since MP in the real nature is impacted by different environmental factors, tracing MP in the environment and studying on individual impacting factors are not possible. To study on MP, a novel test bench was built up in which environmental conditions like rain, sunlight, and soil slope can be simulated. A detailed description of this test system can be found in Haddadi et al., 2022. In the present study, we focused on studying two environmental factors, the rain intensity, and the slope of soil, which have effects on the transposition of plastic MP to the depth of soil. However, a share of MP is washed from the surface of soil to surface waters like rivers or lakes.

To find an answer on how much MP remains in soil in the presence of rain with different intensity, the following procedure was undertaken (compare to Figure 2). At the first step, slope of the soil surface was adjusted. After adjusting and measuring the slope of soil, MP was distributed homogeneously on the surface of soil. In the third step, rain system was run with different parameters. Fourth step, the MP that was washed with the artificial rain from the soil surface, was collected from the test bench. Furthermore, the remaining MP in the first layer of the soil was collected. After collecting water and soil samples, MP particles were cleaned, separated, and analysed according to the weight and material purity.

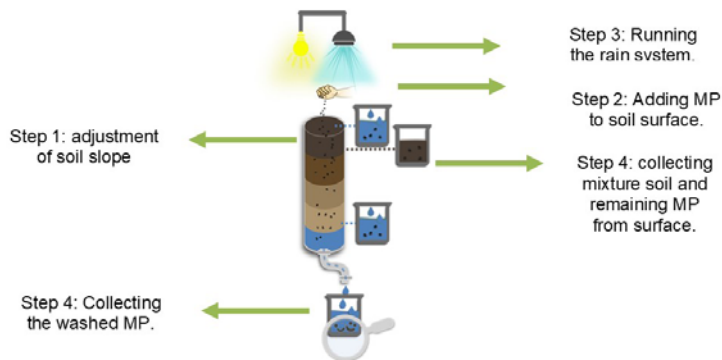


Figure 2. Transferring MP from the soil surface, migration to the depth of the soil and degradation of MP under the condition of simulated sunlight and rain

2 Methodology

To have close conditions like in the environment, soil from agricultural area was collected from a field near to city of Münster (Germany). This was used for all described tests. For each test run, the first layer of soil in our test bench was replaced. To have a fine soil, it was sieved with 8 mm mesh size to remove big stones and to have homogenous first layer to simulate the topsoil. To easier shape the first layer according to different slopes, the soil was wetted with tap water. The digital slope measurement type Krone was used to adjust the

soil slope to 0.0° , 15° , and 20° , respectively, referred to the horizon. According to our earlier experiment, the moisture impacts the movement of soil and consequently of MP. Therefore, the moisture was measured and kept in similar range between 6.0 to 7.0 % for each test. The moisture of soil was checked with the aid of a moisture analyser type Sartorius MA30. Among others, polyethylene with a low density (LDPE) is the most applicable polymer in industries (Plastics - the Facts 2022), therefore, in this work the focus is set on this material. To prepare the test run, the MP of LDPE with an average size of $600\ \mu\text{m}$ and an amount of 10 mg was prepared and added to the surface of the soil for each investigation. As a raw material, the granules of colourless LDPE without additives from Goodfellow was chosen. Granules were milled with a cryogenic grinding type Cryomold Retsch. Only one batch of the raw material was utilized.

To run the test, two different rain intensities were applied. Tap water was used in the simulated rain system. To achieve artificial rain droplets near to reality and to distribute water homogeneously on the surface, a water compartment was arranged 25 cm above the soil having in the bottom 21 holes with a diameter of 1.0 mm, and further, under this compartment having installed an additional sieve with a mesh size of 1.0 mm. Adding 300 ml and 500 ml water to the water system equals to $95\ \text{L m}^{-2}\ \text{h}^{-1}$ and $135\ \text{L m}^{-2}\ \text{h}^{-1}$, respectively, representing very heavy rainfall. For each slope and rain intensity test runs were repeated 5 times. After the artificial rain was completed, the water samples which comprise a mixture of water, soil, and MP were collected from an outlet of the test bench. Soil samples including the remaining MP were collected up to a depth of 1.0 cm measured from the surface. Both types of samples were taken to measure the share of remaining MP in the soil as well as washed off MP from the surface water. To determine the amount of the MP in soil and water samples, an inorganic and an organic separation process was performed. As the density of the LDPE is $0.93\ \text{to}\ 0.97\ \text{g cm}^{-3}$, it was possible to separate inorganic materials from samples with water and NaCl. The floated MP and organic particles are collected by a peristaltic pump from the water surface, vacuumed on hydrophilic membrane with $0.4\ \mu\text{m}$ pores and then dried. To remove the organic particles from the MP sample, a Fenton reagent was applied. This process consists of several steps, including the addition of several chemicals to the sample, such as $\text{FeSO}_4 \cdot 7\ \text{H}_2\text{O}$, H_2O_2 (30 % in H_2O), H_2SO_4 (98 % in H_2O), and a surfactant as a wetting agent (Tween 20).

2.1 Analyses of micro plastic

The amount of the MP before adding it to the surface of soil was measured with a balance type SARTORIUS 124-1s. Additionally, the amount of MP in water and soil samples collected after a respective test run were measured subsequently to inorganic and organic separation. Before milling, PE granules were validated by Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR) type Thermo Fischer Scientific Nicolet iS5. It is appropriate to identify a sample with range from 5 mm to $500\ \mu\text{m}$. Furthermore, the size of the plastic particles after milling were measured using a second FTIR combined with a microscope type Thermo Fischer Scientific iN10 (compare to Figure 3). After inorganic and organic separation, the collected materials were validated by FTIR microscope iN10 to check only PE particles were measured.

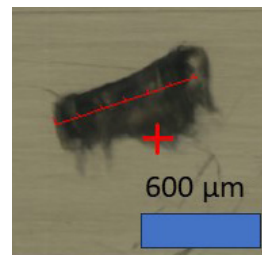


Figure 3. Microscopic image of a selected particle after milling

3 Result and discussion

It was determined that after a test run with artificial rain a significant amount of MP remains inside the first millimetres of the treated soil depended on the soil slope and rain intensity. The average residual mass of MP inside the investigated soil samples decreased from initially 10 mg added to 4.1 mg to 3.8 mg, and 3.2 mg, respectively, when increasing the slope from 0 ° to 15 ° and 20 ° at a given rain intensity of 95 L m² h⁻¹, respectively (compare to Table1).

Table1: Residual mass of MP in soil depending on slope at the same rain intensity of 95 L m² h⁻¹

Slope [°]	0	15	20
Residual mass of MP [mg]	4.1	3.8	3.2

A rise in soil slope results in a decrease of residual mass of MP in soil by 7.3 % (15 °) and 22.0 % (20 °) referred to the value measured with horizontally arranged soil. Additionally, by increasing the rain intensity to 135 L m² h⁻¹ at a given soil slope of 15 °, the average remaining MP in soil decreases to 2.3 mg which is about 39.5 % less than measured for the lower rain intensity (as written above).

4 Conclusion

Slope and rain intensity can both influence the movement of MP in soil. The steeper slope and increased rain wash more MP from the soil surface, transporting them to waters such as lakes. Although the condition of the experiment was changed to higher rain intensity and steep slope, it was still determined a share of MP remains in the soil. The movement of MP from sloping agricultural land to waters provides an opportunity to prevent hazardous particles from entering to aquatic ecosystem, e.g. by filtration. In the flat agricultural land, most likely hazardous MP will remain for a longer time and become a permanent contamination.

Acknowledgement

The research leading to the presented results has received the funding by Ministry of Culture and Science of the Federal State of North Rhine-Westphalia (NRW) under the framework of the project 'Mik-Mak' (funding number 005-2302-0028). Further, we would like to thank Dorance Matemegne, B.Eng. for her technical support and assistance with sample preparation.

References

- Braun, M., Mail, M., Heyse, R., & Amelung, W. (2021). Plastic in compost: prevalence and potential input into agricultural and horticultural soils. *Science of The Total Environment*, 760, 143335.
- Brusselaers, J.; Winterstetter, A.; Dils, E.; Arnold, M.; Teittinen, T.; Braekevelt, A.; Ullstein, B. (2020). Bio-waste in Europe — turning challenges into opportunities Report 2020. European Environment Agency 04.

- Haddadi, P.; Weil, J.P.; Palm, J.; Baberg, L.; Tekle-Röttering, A.; Holzhauer, R.; (2022). Plastic impurities in bio-waste and their impact on the environment, Proceedings of the EUBCE 2022, 30th European Biomass Conference, pp. 341-346, online conference.
- Lwanga, E. H., Beriot, N., Corradini, F., Silva, V., Yang, X., Baartman, J., ... & Geissen, V. (2022). Review of microplastic sources, transport pathways and correlations with other soil stressors: a journey from agricultural sites into the environment. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 1-20.
- Manfredi, S., Pant, R., Pennington, D. W., & Versmann, A. (2011). Supporting environmentally sound decisions for waste management with LCT and LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 937-939.
- Plastics Europe (2022): Report of Plastics – the Facts.
- Weithmann, N., Möller, J. N., Löder, M. G., Piehl, S., Laforsch, C., & Freitag, R. (2018). Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science advances*, 4(4), eaap8060.
- Dong, S., Yu, Z., Huang, J., & Gao, B. (2022). Fate and transport of microplastics in soils and groundwater. In *Emerging contaminants in soil and groundwater systems*, 301-329.

Contact

Poroshat Haddadi, Ph.D. Student

Westfälische Hochschule Gelsenkirchen Bocholt Recklinghausen

Tel.-Nr. + 49 209 9596-172

E-Mail: poroshat.haddadi@w-hs.de

Mapping the Biogasification Potential of Agricultural Crops Residues at the Town Scale in China

Abstract: *This study investigates the effective estimation of energy potential from crop residues for biogas at the township scale in China. It introduces a novel approach by integrating four models – Biochemical Methane Potential, simplified ADM1, Gradient Boosting, and Random Forest – with Geographic Information System to spatially represent biogasification potential. Applied in a township scale, these models address prevalent data issues such as incompleteness and inconsistency, offering potential biogas yields calculation results of main crops. Results show variations within an acceptable range across the models, indicating the feasibility of selecting an optimal model based on available data. This research significantly contributes to understanding and implementing sustainable agricultural waste recycling and energy management policies in China, by providing a methodology for township-scale energy potential estimation of crop residues through anaerobic digestion technology.*

1 Introduction

China is a major agricultural country with ample biogas resources from manure, crops and forest residues(Li et al. 2016), thus driving the energy transition(Giwa et al. 2020). This move is marked by challenges in data availability (e.g., yields, spatial distribution, physical and chemical characteristics of agricultural residues, etc.) at the township level, critical for policy implementation and assessment (Chen et al. 2023). Innovative data collection and analysis techniques are being employed to overcome these barriers and understand the socio-economic and environmental dynamics within townships. Studies like large-scale data-driven urbanization analysis and substance flow analysis in rural Beijing exemplify efforts to grasp and improve rural life through targeted interventions.

Anaerobic digestion (AD), a process converting organic waste into biogas, stands out as a sustainable technology(Muhayodin et al. 2021). It effectively manages organic waste, reducing pollution and landfill usage while producing renewable energy-biogas, composed mainly of methane and carbon dioxide(Li et al. 2016). This transformation aligns with several Sustainable Development Goals (SDGs), such as Affordable and Clean Energy, Climate Action, and Responsible Consumption and Production, by promoting renewable energy use, mitigating climate change, and encouraging a circular economy(Obaideen et al. 2022; Ajieh et al. 2021). AD technology's application has broad implications for waste management, renewable energy generation, climate change mitigation, and promoting sustainable agricultural practices.

The assessment of biogas potential is multifaceted, involving analysis of local biomass resources, technological capabilities, economic viability, and policy environments(Chukwuma et al. 2021; Theuerl et al.

2019). Spatial analysis via Geographic Information Systems (GIS) is a common tool, aiding in biomass resource mapping and understanding the economic implications of local biomass utilization. Despite the township-level data challenges, methodologies integrating process models, like Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1), Biochemical Methane Potential (BMP), and Machine Learning (ML) models, have been developed to predict biogas yield accurately.

This paper presents a methodological approach to map biogas production potential from agricultural residues at the township scale, employing a hybrid of official statistics, field surveys, literature, and experimental data. Models like the simplified ADM1 (S-ADM1), BMP, and ML are used alongside GIS to determine biogas production potential. These efforts aim to provide robust data and methods for policy-making, driving the rural energy revolution in China's townships towards a sustainable future.

2 Methodology

The objective of this study is to identify the biogas potential of agricultural residues and its spatial distribution at the township level. It employs an integrated approach, combining AD models, diverse data sources, and GIS visualization. Initially, three models, including BMP, S-ADM1, and ML models, were used to estimate the theoretical biogas yields. These estimates were then combined with a GIS to produce an ArcGIS-based visualisation of potential yields using a mixture of data from the literature, field studies and laboratory analyses. The specific methodological framework and results are shown in Figure 1.

2.1 AD Models

This study involves the calculation of theoretical biogas yields using three distinct types of models: mechanistic, empirical, and statistical. The BMP model applies the Buswell formula, considering the elemental composition to calculate theoretical yields (Rashama et al. 2021). The S-ADM1 model simplifies the complex biochemical and physicochemical processes involved in anaerobic digestion into a series of summed reactions (Weinrich et al. 2021; Weinrich and Nelles 2021). Machine Learning models, namely Gradient Boosting (GB) and Random Forest (RF), were deployed for their ability to provide accurate predictions without an extensive understanding of the biological processes involved in AD (Clercq et al. 2020).

2.2 GIS Visualization biogas potential in crops

The study adopted GIS for a detailed spatial analysis of crop cultivation and potential biogas yield. Firstly, farmlands were delineated and divided into 50m * 50m grids and assigned unique numbers. Each grid was analyzed for crop types and waste biomass. Field visits complemented this spatial analysis to ensure accuracy. The estimated biogas yield was visualized using ArcGIS software, providing a comprehensive view of the potential across the region.

2.3 Data Strategy

As depicted in Figure 1, the primary data sources utilized in this study were laboratory analysis, available literature data, and field trip interviews. The field trip to Beiyang town was conducted during October and November 2021, which coincided with the local harvest season. The purpose of the trip was to determine the

specific crop types corresponding to each grid. Through the research, it was observed that the major crops in the area included rice, citrus, sugarcane, wild rice, and various vegetables (labeled as vegetable cropping lands, mainly family-owned plots). These crops accounted for over 75% of the total area in the study region.

Crop residues such as rice straw, citrus peel, bagasse and wild rice leaves, which are the main wastes associated with the respective crops, were sampled (Julia Santolin 2020). The available literature was consulted for characterization data of vegetable waste (Poggio et al. 2016). The model variables, including the constants and parameters in ADM1, were derived from existing literature sources. The training set for the ML models was obtained from the study conducted by (Bai 2021).

To analyze the regional mapping and calculate the biogas production for each grid, waste coefficients, yields, and grass-to-grain ratios of agricultural crops were obtained from the literature.

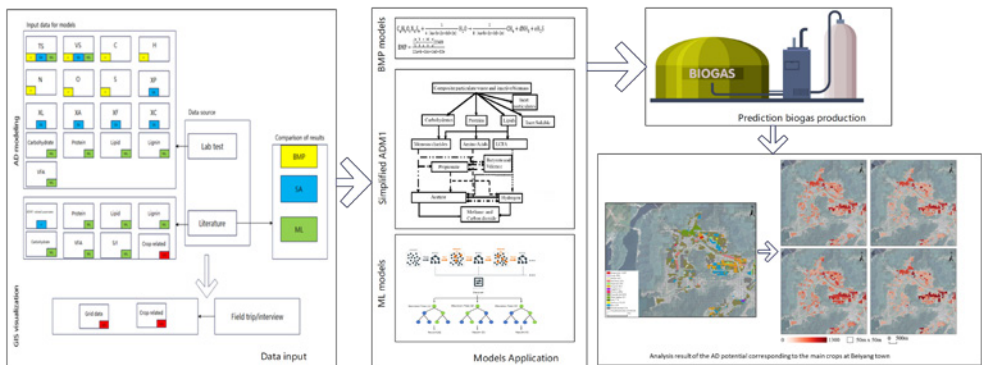


Figure 1. Methodology framework for the analysis of the AD potential of the main crops at Beiyang town

3 Results and outlook

The four models were calculated for the main crop residues in Beiyang Township were calculated. Overall, the mapping results from the four models were consistent in the ranking order of biogas potential. The results show that citrus has the highest biogas potential, which is mainly planted near the administrative center of Beiyang Township and is dominated by large-scale orchards. On the other hand, rice fields are more widely planted and located in the peripheral areas of the town.

In future research, the results of this method can be used for the planning and design of biogas production facilities. Furthermore, it can also be used for the calculation of the distribution of soil carbon sequestration, which will contribute to the carbon neutrality of agriculture.

Acknowledgement

This research was funded by the German Federal Ministry of Education and Research(BMBF) Project "URA" (No. 01LE1804A1) and the China Scholarship Council Scholarship (No. 201908320362).

References

- Ajeh, Mike U.; Isagba, Ebuwa S.; Ihoeghian, Newton; Edosa, Valerie I. O.; Amenaghawon, Andrew; Oshoma, Cyprian E. et al. (2021): Assessment of sociocultural acceptability of biogas from faecal waste as an alternative energy source in selected areas of Benin City, Edo State, Nigeria. In *Environ Dev Sustain* 23 (9), pp. 13182–13199. DOI: 10.1007/s10668-020-01205-y.
- Bai, Lu (2021): Prediction of CH₄ yields and NH₄⁺-N concentration from manure-based anaerobic digestion with the artificial neural network model. Master thesis. Technische Universität Berlin.
- Chen, Zuoqi; Yu, Siyi; You, Xiaojun; Yang, Chengshu; Wang, Congxiao; Lin, Juan et al. (2023): New nighttime light landscape metrics for analyzing urban-rural differentiation in economic development at township: A case study of Fujian province, China. In *Applied Geography* 150, p. 102841. DOI: 10.1016/j.apgeog.2022.102841.
- Chukwuma, Emmanuel Chibundo; Okey-Onyesolu, Faith Chinenye; Ani, Kingsley Amaechi; Nwanna, Emmanuel Chukwudi (2021): GIS bio-waste assessment and suitability analysis for biogas power plant: A case study of Anambra state of Nigeria. In *Renewable Energy* 163, pp. 1182–1194. DOI: 10.1016/j.renene.2020.09.046.
- Clercq, Djavan de; Wen, Zongguo; Fei, Fan; Caicedo, Luis; Yuan, Kai; Shang, Ruoxi (2020): Interpretable machine learning for predicting biomethane production in industrial-scale anaerobic co-digestion. In *The Science of the total environment* 712, p. 134574. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134574.
- Giwa, Abdulmoseen Segun; Ali, Nasir; Ahmad, Izhar; Asif, Muhammad; Guo, Rong-Bo; Li, Fu-Li; Lu, Ming (2020): Prospects of China's biogas: Fundamentals, challenges and considerations. In *Energy Reports* 6, pp. 2973–2987. DOI: 10.1016/j.egy.2020.10.027.
- Julia Santolin (2020): Towards nutrient circularity: A material flow analysis case study in Huangyan District, China. Master thesis. Technische Universität Berlin.
- Li, Heng; Tan, Fen; Ke, Lanting; Xia, Dong; Wang, Yuanpeng; He, Ning et al. (2016): Mass balances and distributions of C, N, and P in the anaerobic digestion of different substrates and relationships between products and substrates. In *Chemical Engineering Journal* 287, pp. 329–336. DOI: 10.1016/j.cej.2015.11.003.
- Muhayodin, Furqan; Fritze, Albrecht; Rotter, Vera Susanne (2021): Mass Balance of C, Nutrients, and Mineralization of Nitrogen during Anaerobic Co-Digestion of Rice Straw with Cow Manure. In *Sustainability* 13 (21), p. 11568. DOI: 10.3390/su132111568.
- Poggio, D.; Walker, M.; Nimmo, W.; Ma, L.; Pourkashanian, M. (2016): Modelling the anaerobic digestion of solid organic waste - Substrate characterisation method for ADM1 using a combined biochemical and kinetic parameter estimation approach. In *Waste management (New York, N.Y.)* 53, pp. 40–54. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.04.024.
- Rashama, Charles; Ijoma, Grace N.; Matambo, Tonderayi S. (2021): Appraising different models for predicting biomethane potential: the case of avocado oil processing by-products. In *J Mater Cycles Waste Manag* 23 (1), pp. 409–415. DOI: 10.1007/s10163-020-01116-0.

- Theuerl, Susanne; Herrmann, Christiane; Heiermann, Monika; Grundmann, Philipp; Landwehr, Niels; Kreidenweis, Ulrich; Prochnow, Annette (2019): The Future Agricultural Biogas Plant in Germany: A Vision. In *Energies* 12 (3), p. 396. DOI: 10.3390/en12030396.
- Weinrich, Sören; Mauky, Eric; Schmidt, Thomas; Krebs, Christian; Liebetrau, Jan; Nelles, Michael (2021): Systematic simplification of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) - Laboratory experiments and model application. In *Bioresource Technology* 333, p. 125104. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125104.
- Weinrich, Sören; Nelles, Michael (2021): Systematic simplification of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) - Model development and stoichiometric analysis. In *Bioresource Technology* 333, p. 125124. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125124.

Contact

Mr., Zheng Yang, Research Assistant

Chair of Circular Economy and Recycling Technology, Technical University Berlin

Tel.-Nr. +493031419007966

E-Mail: zheng.yang@campus.tu-berlin.de

Homepage: <https://www.tu.berlin/en/circulareconomy/about-us>

KAPITEL II – POSTER

Datenakquise für die Digitalisierung der Handsortierung: Methodik und erste Erkenntnisse

Abstract: Die manuelle Sortierung von Abfällen in Sortierkabinen ist physisch und geistig herausfordernd, deshalb befasst sich das Projekt recAlcle mit der Entwicklung eines Assistenzsystems für Sortiermitarbeiter:innen. Für die Entwicklung des Systems sind fortschrittliche Künstliche Intelligenz- und Machine Learning-Modelle erforderlich, sowie hochwertige Trainingsdaten. Die Qualität der öffentlich verfügbaren Trainingsdaten ist oft begrenzt, daher ist es wichtig, maßgeschneiderte Datensets zu erstellen, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen. Im Digital Waste Research Lab des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben wurden experimentell Trainingsdaten für die Objekterkennung, Klassifikation und Aktionserkennung des recAlcle Systems gewonnen. Die Methodik und die Ergebnisse der Trainingsdatenakquise werden in diesem Beitrag vorgestellt.

1 Einleitung

Obwohl die Digitalisierung in der Abfallwirtschaft voranschreitet, wurde die Handsortierung in Sortierkabinen vernachlässigt und ihre Funktionsweise hat sich über die letzten Jahrzehnte kaum verändert. Die Arbeit von Sortiermitarbeiter:innen ist körperlich und geistig fordernd. Die körperliche Belastung ergibt sich einerseits aus der Beschaffenheit der Abfälle und andererseits durch die wiederholten Greifbewegungen (Poulsen et al. 1995). Ein durchschnittlicher Sortiermitarbeiter / eine durchschnittliche Sortiermitarbeiterin kann bis zu 200 Griffe pro Minute tätigen (Kranert 2017). Die geistige Belastung für die Mitarbeiter:innen resultiert aus der komplexen Sortierentscheidung. Die meisten Sortierbänder in Sortierkabinen bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,5 m/s, wobei ein Sortiermitarbeiter/ eine Sortiermitarbeiterin für ca. 1–1,2 m Sortierbandlänge zuständig ist. Durch die Geschwindigkeit des Sortierbandes muss die Entscheidung, ob ein betrachtetes Partikel aussortiert werden soll oder nicht, innerhalb von wenigen Sekundenbruchteilen getroffen werden. Zusätzlich wird diese durch die Heterogenität der verarbeiteten Abfälle erschwert. Die Abfallzusammensetzung ist stark von der betrachteten Region, lokalen Events, globalen Trends und der Demografie abhängig und schwankt über die Zeit (Kaza et al. 2018). Einer der vielversprechendsten Ansätze für die Weiterentwicklung der Handsortierung ist die Einführung einer digitalen, autonom arbeitenden Unterstützung bei der Sortierentscheidung auf Basis Künstlicher Intelligenz (KI) für die Sortiermitarbeiter:innen. Jedoch sind für die Entwicklung eines solchen Systems fortschrittliche KI- und Machine Learning (ML)-Modelle notwendig. Diese Modelle benötigen Rechenleistung und große Mengen an Trainingsdaten (Sarker 2021). In der Vergangenheit war die Limitierung die zur Verfügung stehende Rechenleistung. Durch die enormen Fortschritte bei der Halbleiterfertigung und beim Cloud-Computing ist heutzutage meist die Verfügbarkeit von hochqualitativen und repräsentativen Trainingsdaten der limitierende Faktor (Liu et al. 2021; Zhou 2021). Es existieren online zwar viele öffentlich zugängliche Trainingsdatensets, jedoch schwankt deren Qualität oft sehr stark. Deshalb ist es wichtig auf den Use-Case

angepasste Trainingsdaten zu erstellen. Diese Veröffentlichung befasst sich mit der Methodik und den Ergebnissen der im Technikumsmaßstab durchgeführten Trainingsdatenakquise für das recAlcle System.

2 Methodik

Im Zuge der Entwicklung des recAlcle Systems und der dafür notwendigen ML-Modelle wurden in mehrstufigen Versuchen Trainingsdaten für die verwendeten Modelle akquiriert. Hier wird auf die Methodik der Trainingsdatenakquise eingegangen, inklusive der verwendeten Materialien. Generell wurde die Datenakquise je nach Verwendungszweck der Daten unterteilt: Objekterkennung, Klassifizierung, Aktionserkennung. Erhoben wurden die Daten mit 5 MP Basler ace2pro Industriekameras im Digital Reseach Waste Lab (DRWL) des Lehrstuhls für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW) der Montanuniversität Leoben. Alle Versuche fanden mit laufenden Förderbändern statt. Die Geschwindigkeit wurde in Anlehnung an reale Bedingungen in Sortierkabinen mit 0,5 m/s festgelegt. Je nach Anforderung an die Trainingsdaten für das entsprechende Szenario wurden die Versuche an unterschiedlichen Punkten im DWRL durchgeführt. In den folgenden Unterkapiteln wird auf jeden Versuch zur Trainingsdatenakquise eigens eingegangen und auf die Kamerapositionen im jeweiligen Versuchsaufbau (siehe Abbildung 1) verwiesen.

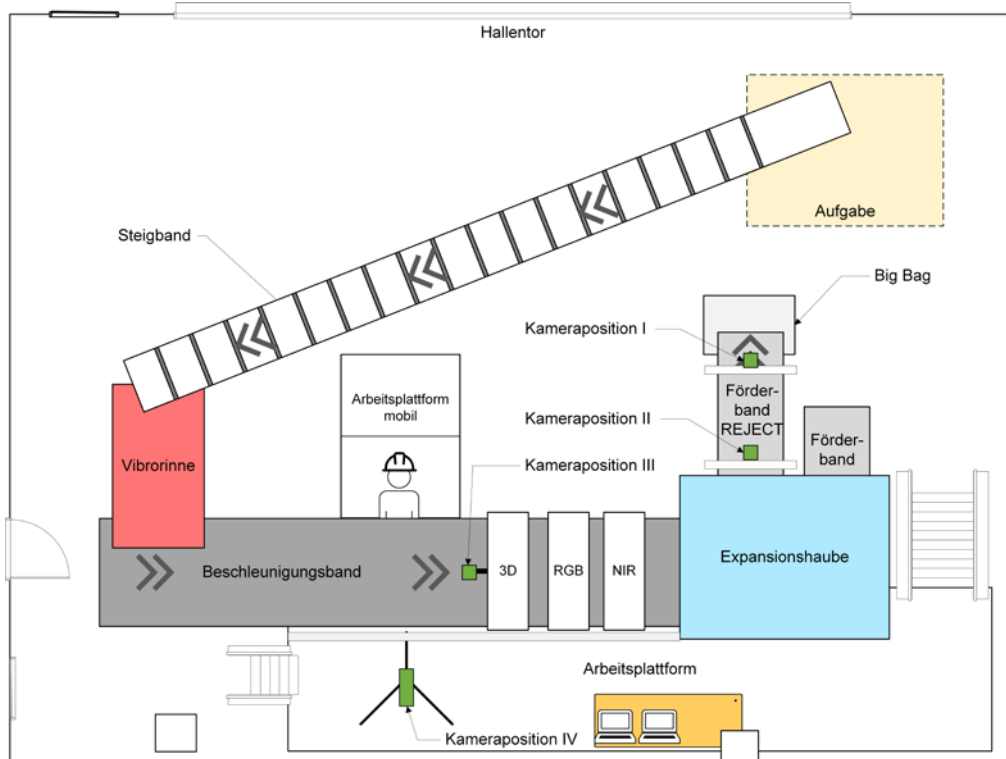


Abbildung 1: Versuchsaufbau im DWRL und Kamerapositionen

2.1 Datenset Objekterkennung

Die Objekterkennung spielt eine sehr wichtige Rolle für das System. Zu Beginn wurde das Modell mit synthetisch generierten Daten trainiert. Um die Vielfältigkeit der Trainingsdaten zu steigern, wurde an zwei verschiedenen Förderbändern des DWRL, am Rejectband (Kameraposition I) und am Beschleunigungsband (Kameraposition III), Videos mit unterschiedlichen Bandbelegungen (kg Abfall / m² Förderband) bzw. Überlappungen der Abfallpartikel aufgenommen. Für diese Versuchsreihe wurden zwei Materialien herangezogen, einerseits eine PVC-reiche Fraktion und eine Rejectfraktion aus der Polyolefingewinnung. Beide Fraktionen entstammten jeweils gemischten Gewerbeabfällen. Überlappende Partikel stellen für das Modell eine Herausforderung dar, deshalb ist es wichtig genügend Trainingsdaten mit Überlagerungen zur Verfügung zu stellen, damit eine reibungslose Erkennung von Objekten in einem realen Einsatz gewährleistet werden kann.

2.2 Datenset Klassifizierung

Die Daten für das Training des Klassifikationsmodells wurden am Rejectband des Sortierers im DWRL mit zwei Kameras (Kameraposition I und II) aufgenommen. Um den Annotationsaufwand der gewonnenen Daten möglichst gering zu halten, wurden in jedem Durchgang nur vereinzelt Partikel einer Stoffgruppe aufgegeben und aufgezeichnet. Dadurch sind alle Objekte im jeweiligen Videoclip einer Stoffgruppe zuzuordnen und annotiert. Insgesamt wurden fünf verschiedene Stoffgruppen aufgenommen: Getränkeverpackungskarton (GVK), Polyethylen (PE), Polyethylenterephthalat (PET), Polystyrol (PS) und Polyvinylchlorid (PVC).

2.3 Datenset Aktionserkennung

In Zuge des Projektes wird auch ein Modell zur Aktionserkennung trainiert, um zu erkennen, ob ein durchschnittlicher Sortiermitarbeiter / eine durchschnittliche Sortiermitarbeiterin ein Partikel vom Band nimmt, es nur berührt oder ähnliche Handlungen ausführt. Dafür wurden Aufnahmen mit zwei Kameras erstellt. Eine Kamera wurde direkt über dem Sortierband bzw. Beschleunigungsband des DWRL (Kameraposition III) positioniert und nimmt die Hände der sortierenden Person auf. Die zweite Kamera wurde in einer erhöhten Position auf der Arbeitsplattform (Kameraposition IV) platziert und nimmt die sortierende Person von oben in einem 45° Winkel auf, während diese auf der mobilen Arbeitsplattform steht und Material am Beschleunigungsband sortiert.

3 Ergebnisse

Aus den Versuchen wurden umfangreiche Datensets für das Training der für das recAlcle System benötigten ML-Modelle generiert (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Erstellte Datensets für das recAlcle-System

Für das Objekterkennungsdatenset wurden jeweils etwa eine Stunde Videomaterial pro Material erzeugt, wobei jeweils fünf verschiedene Bandbelegungen berücksichtigt wurden. Für das Klassifizierungsdatenset wurden je 200 Partikel für jede der fünf Stoffklassen (GVK, PE, PET, PS, PVC) aufgenommen. Mithilfe der entwickelten Objekterkennung wurden die Abfallpartikelbilder mit Bounding Boxes versehen und ausgeschnitten. Unter Bounding Boxes versteht man rechteckige Begrenzungsrahmen, die um Objekte in einem Bild gezeichnet werden. Sie dienen dazu, den Bereich zu kennzeichnen, in dem sich das jeweilige Objekt befindet (Lempitsky et al. 2009). Für die Aktionserkennung wurden sieben verschiedene Aktionen (Entfernen eines Abfallpartikels mit der linken oder rechten Hand oder mit beiden Händen, Greifen und Loslassen eines Partikels mit der rechten, linken oder beiden Händen, Hände über das Förderband bewegen bzw. sich strecken) von zwei Perspektiven aufgezeichnet und zeitlich synchronisiert. Das Datenset besteht insgesamt aus 854 Clips.

Danksagung

Das Projekt RecAlcle (FFG Projektnummer: FO999892220) wird im Zuge der Ausschreibung AI for Green 2021 (KP) aus Mitteln der FFG gefördert.

Literatur/Quellen

- Kaza, S.; Yao, L. C.; Bhada-Tata, P.; van Woerden, F. (2018): What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.
- Kohonen, T. (1988): An introduction to neural computing. In: Neural Networks, 1 (1), S. 3–16. [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(88\)90020-2](https://doi.org/10.1016/0893-6080(88)90020-2).
- Kranert, M. (Hrsg.) (2017): Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Planung - Recht - Verfahren. Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2257-4>.
- Liu, J.; Zhu, F.; Chai, C.; Luo, Y.; Tang, N. (2021): Automatic data acquisition for deep learning. In: Proceedings of the VLDB Endowment, 14 (12), S. 2739–2742. <https://doi.org/10.14778/3476311.3476333#sec-recommendations>.
- Poulsen, O. M.; Breum, N. O.; Ebbenhøj, N.; Hansen, A. M.; Ivens, U. I.; van Lelieveld, D.; Malmros, P.; Matthiasen, L.; Nielsen, B. H.; Nielsen, E. M. (1995): Sorting and recycling of domestic waste. Review of occupational health problems and their possible causes. In: Science of The Total Environment, 168 (1), S. 33–56. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04521-2](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04521-2).
- Sarker, I. H. (2021): Deep Learning: A Comprehensive Overview on Techniques, Taxonomy, Applications and Research Directions. In: SN computer science, 2 (6), S. 420. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00815-1>.
- Zhou, Z.-H. (2021): Machine Learning. Singapore: Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1967-3>.

Kontakt

Dipl.-Ing. Julian Aberger

Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel.-Nr. +43 3842 402-5123

E-Mail: julian.aberger@unileoben.ac.at

Homepage: www.avaw-unileoben.at

Aerobic Digestate Reactivation of Anaerobically Digested Sewage Sludge – A Micro Review

Abstract: *The authors of the present work summarize their recently published article “Microbiome Characterization after Aerobic Digestate Reactivation of Anaerobically Digested Sewage Sludge” from Otto et al. (2023). This article presents the outcomes of a municipal-scale demonstrator plant implementing a recently patented process for improved sludge degradation within a municipal sewage treatment system. The study focused on a 1500 m³ sewage sludge digester, where an intermediate aerobic sewage sludge reactivation stage was introduced. This reactivation resulted in a 55% increase in biogas production and a 25% reduction in residual solids. For the residual NH₄ in the liquid phase of the sewage sludge, the process achieved NH₄-N removal rates exceeding 90%. To gain insights into the microbial community dynamics, 16S rRNA gene amplicon high-throughput sequencing was employed on the reactivated digestate. The analysis revealed a reduced population of methane-forming archaea compared to the primary digester, along with the detection of multiple ammonium-oxidizing bacteria. Notably, genera within the Chitinophagaceae family, comprising up to 18.8% of DNA sequences, were prevalent, alongside a small presence of Candidatus nitrosoglobus (<0.3%). The study highlights an economically viable approach for efficient nitrogen removal from sewage sludge while simultaneously increasing biogas yields and reducing potential pathogens in the residual material.*

1 Introduction

Anthropological activities often generate significant sewage waste, posing risks to human health and ecosystems (McCunney, 1986; Sikosana et al., 2019). Managing and treating this sewage, which produces sludge, is challenging (Adepu et al., 2022). Various technologies like biodrying, composting, and anaerobic digestion are used for sludge treatment (Gebreyessus & Jenicek, 2016; Wolny-Koladka et al., 2021).

In the present work, a novel municipal sewage treatment plant is summarized based on results from Otto et al. (2023). The plant utilizes incineration to dispose of fermentation residues from sewage sludge digestion. To reduce incineration costs, the respective plant aimed to reduce digestate volume and associated while enhancing biogas yield from anaerobic digestion. To achieve this, the plant sought to improve the degradation rate of the anaerobic digestion process, which typically produces methane from biomass through microbial degradation (Zhen et al., 2017). Although anaerobic digestion typically occurs in oxygen-free conditions, some studies explore the impact of limited oxygen on the process.

To date, researchers have already carried out extensive research to describe the influence of oxygen on microbiomes. This becomes clear, for example, if one uses the search terms “anaerobic digestion” and “oxygen” in Web of Science (all databases, search specified to “topic”, 12/19/2023), this yields 7,255 articles. Given this wealth of research work, it is surprising that oxygen is rarely used industrial water treatment plants to activate digested sludge from sewage sludge digesters. To close this gap, the company ProEntec GmbH patented recently a novel reactor configuration (the PEGA_{KA} process), which allows for the aerobic activation of previously digested sewage sludge in an intermediate reaction stage. Top of Form Recently, ProEntec was able to implement this process on a municipal level. Partners from the European H2020 project “MICRO4BIOGAS” (<https://micro4biogas.eu/>) collaborated with the ProEntec GmbH to describe the so called PEGA_{KA} process for the first time on an academic level focusing especially on the underlying microbiome. This work was recently published at the journal “MDPI Fermentation” by Otto et al., 2023.

2 The PEGA_{KA} process

A detailed description of chemical and taxonomic data can be found in the respective reference published by Otto et al. (2023). The authors from Otto et al. implemented the PEGA_{KA} process in a municipal wastewater treatment plant (figure 1). During 46 months of operation, the system treated wastewater corresponding to 48,043 inhabitants in average (designed for 35,000 inhabitants). The realized PEGA_{KA} process involved activating digested sludge in the 1500 m³ main digester, with parameters including a total organic load in volatile solids (VS) of Φ 2514.6 kg VS d⁻¹, an organic loading rate (OLR) of 1.68 kg VS m⁻³ d⁻¹, and a hydraulic retention time (HRT) of 41 d, maintaining an average pH of 7.68. Sludge reactivation occurred in separate reactor, the so-called PEGA_{BB} reactor, which was repurposed from an 860 m³ sequencing batch reactor (SBR). Instead of pure oxygen, ambient air was used for digestate reactivation due to technical limitations. A 46 kW compressor injected air (10 h/d), with agitators maintaining solids in suspension when

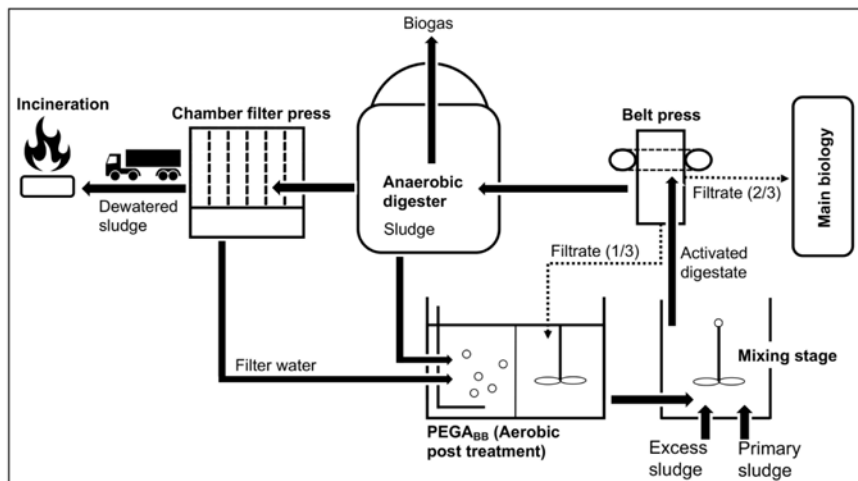


Figure 1: Representation of the PEGA_{KA} process as (figure from Otto et al., 2023). The digestate, derived from the digestion tower, undergoes reactivation in the PEGA_{BB} phase through the utilization of ambient air as an oxygen source. Following thickening on a belt filter, the reactivated digestate undergoes a secondary treatment in the digestion tower.

the compressor was off. For oxic reactivation, residual water from the final mechanical sludge dewatering step was pumped into the PEGA_{BB} reactor. After oxic reactivation, thickening occurred, followed by returning the reactivated sludge into the main digester. The reactor, operational since 2019, demonstrated a remarkable increase in biogas productivity, rising by 57.40% from 2018 to 2021. The PEGA_{BB} reactor significantly contributed to enhanced gas production. Automated sensors in the PEGA_{BB} stage monitored various parameters, revealing low oxygen concentrations (1.2 mg L⁻¹) and high NH₄-N removal (92.70%).

3 The PEGA_{KA} microbiome

The taxonomic profiles of the main digester and as well the PEGA_{BB} reactor were both dominated by *Proteobacteria*, *Bacteroidota*, and *Patescibacteria*. The genus-level revealed significant microbial shifts between both reactors, notably an increase in genera associated with nitrogen cycling in the PEGA_{BB} reactor. Methanogenic archaea, responsible for methane production, were identified with low proportions in both systems. However, the PEGA_{BB} method appeared to inhibit their activity. Despite this, the overall biogas yield was increased. Interestingly, potential pathogens were reduced as well.

Otto et al. searched especially for microorganisms involved into N-metabolism. No anammox bacteria were detected. However, the authors found bacteria involved into ammonium oxidation, namely *Candidatus nitrosoglobus* (< 0.3%) and a member of the Chitinophagaceae family (up to 18.8%). Especially the high abundance of Chitinophagaceae was of high interest, as its importance for nitrogen removal in wastewater treatment has hardly been addressed in other works. Otto et al. reviewed the N-metabolism in detail. Although not measured directly, the authors raised concerns about nitrogen oxide release (NO and N₂O), which should be investigated further in following works. The authors also performed a profitability analysis, which demonstrated economic viability regarding energy consumption, sludge reduction, and biogas yield. The study emphasized positive effects on nitrogen removal. In particular, the reduction in the residual sludge yield is of economic interest, as this reduced the costs for sludge incineration in respective case about EUR 54,045. The results presented by Otto et al. suggest that the PEGA_{BB} reactor positively influenced biogas production, microbial composition, nitrogen removal, as well as residual sludge reduction supporting its economic feasibility and environmental benefits.

4 Conclusions

In summary, the patented PEGA_{KA} process enhances anaerobic digestion efficiency in sewage sludge digestion by reactivating fermentation residues aerobically. The process influences methane-forming archaea and promotes ammonium oxidation and denitrification. Overall, PEGA_{KA} appears to be a promising technology to increase the biogas yield, reducing the residual sludge volume, and to improve nitrogen removal.

Acknowledgements

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 101000470. We are grateful to the European Commission for funding the Micro4Biogas project.

References

- Adepu, N.; Kermanshachi, S.; Safapour, E.; Pamidimukkala, A. (2022): Challenges and risks in resilience management of water and wastewater infrastructure. In Construction Research Congress 2022; Jazizadeh, F., Shealy, T., Garvin, M.J., Eds.; ASCE Press: Reston, VA, USA, 2022.
- Gebreeyessus, G.D.; Jenicek, P. (2016): Thermophilic versus Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge: A Comparative Review. *Bioengineering*. 3, 15.
- McCunney, R.J. (1986): Health effects of work at waste water treatment plants: A review of the literature with guidelines for medical surveillance. *Am. J. Ind. Med.* 9, 271–279.
- Otto, P.; Alipoursarbani, M.; Torrent, D.; Latorre-Pérez, A.; Paust, T.; Albert, A.; Abendroth, C. (2023): Microbiome Characterization after Aerobic Digestate Reactivation of Anaerobically Digested Sewage Sludge. *Journal of Fermentation* 9(5), 471.
- Sikosana, M.L.; Sikhwivhilu, K.; Moutloali, R.; Madyira, D.M. (2019): Municipal wastewater treatment technologies: A review. *Procedia Manuf.* 35, 1018–1024.
- Wolny-Koladka, K.; Malinowski, M.; Zdaniewicz, M. (2021): Energy-related and microbiological evaluation of the effects of bulking agents on the brewery hot trub biodrying. *Food Bioprod. Process.* 127, 398–407.
- Zhen, G.; Lu, X.; Kato, H.; Zhao, Y.; Li, Y.Y. (2017): Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 69, 559–577.

Contact

*M.Sc. Mozhdeh Alipoursarbani, academic employee
Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg
Phone: +49 0355 693683
e-Mail: alipours@b-tu.de*

Was passiert mit den Hygiene-Schutzscheiben? PMMA-Stoffstromanalyse für Deutschland

Abstract: PMMA ist mit einem jährlichen Einsatz von etwa 61.000 Mg in Deutschland ein wichtiger Polymerwerkstoff in der Bau-, Fahrzeug-, Elektrik/Elektronik- und Verpackungsbranche. Derzeit werden jedoch europaweit nur etwa 10 % der Acrylglas-Abfälle verwertet. Um höhere Verwertungsquoten zu erreichen, wird eine genaue Kenntnis über PMMA-Anwendungen und damit verbundene Abfallströme benötigt. Ziel dieser Arbeit ist es, die aus vorliegenden Marktstudien bekannten Mengen je Branche auf Produktebene zu erweitern und somit den Detailgrad zu erhöhen. Hierzu wurden Internetrecherchen sowie Expertenfragebögen und -interviews durchgeführt. Insgesamt konnte für rund 80 % der in Deutschland verarbeiteten PMMA-Mengen ein spezifischer Anwendungsfall identifiziert und quantifiziert werden. Auf Basis dieser Datengrundlage soll in einem nächsten Schritt eine Bewertung bezüglich der voraussichtlichen mechanischen Aufbereitungsfähigkeit durchgeführt und somit das in Deutschland verfügbare PMMA-Recyclingpotential bestimmt werden.

1 Einleitung

PMMA (Polymethylmethacrylat) ist im Bau-, KFZ- und im Innenausbereich ein wichtiger Polymerwerkstoff. Während der Covid-19-Pandemie wurde darüber hinaus insbesondere PMMA in Form von Acrylglas flächendeckend für Hygiene-Schutzscheiben eingesetzt, die nach dem Ende der pandemischen Lage nun in großem Umfang als Abfälle anfallen [1]. Für die werkstoffliche Verwertung von Acrylglas gibt es seit Jahrzehnten industrielle Ansätze, welche technologisch jedoch kaum weiterentwickelt wurden [2]. Derzeit werden nur etwa 10 % der in Europa anfallenden Acrylglas-Abfälle verwertet [2]. Dies kann u. a. mit fehlenden Sammel- und Rücknahmesystemen begründet werden, doch auch die hohen Qualitätsanforderungen für eine mechanische Aufbereitung zur Wiederverwertung von Acrylglas tragen dazu bei. Eine grundlegende Problematik für die PMMA-Kreislaufwirtschaft stellt die unzureichende Datengrundlage bezüglich des Einsatzzweckes und der Einsatzdauer von Acrylglas dar. Zwar werden in aktuellen Marktstudien verarbeitete PMMA-Mengen nach Branchen publiziert [3], deren Detailgrade lassen jedoch nur begrenzte Prognosen über die Art, den Zeitpunkt und die daraus resultierende Qualität des zukünftigen PMMA-Abfalls zu.

Ziel dieser Arbeit ist es, die in [3] publizierten PMMA-Mengen je Branche im Detaillierungsgrad bis auf Produktebene zu spezifizieren und dadurch die Ableitung abfallwirtschaftlicher Kennzahlen zu ermöglichen. Als Grundlage dient eine Recherche zu PMMA-Produkten sowie deren voraussichtlichen Lebensdauern.

2 Methodik

Die Studie „Stoffstrombild der Kunststoffe in Deutschland 2021“ [3] stellt unter anderem die PMMA-Mengen dar, die im Jahr 2021 in den Branchen Fahrzeuge, Bau, Elektrik/Elektronik, Verpackungen und Sonstige in Deutschland verarbeitet wurden. Diese PMMA-Mengen bilden die Zielwerte für die nachfolgende Analyse und werden im Rahmen eines Bottom-Up-Ansatzes anhand von Studien, Marktdaten und Expertenwissen auf Produktebene erweitert.

Mithilfe einer Kombination aus Expertengesprächen und Internetrecherchen wird ein umfassendes Bild der PMMA-Produkte auf dem Markt gewonnen, woraus die eingesetzten PMMA-Mengen sowie Lebensdauern abgeleitet werden. Zur Quantifizierung werden u. a. öffentlich zugängliche Statistiken, z. B. zur PKW-Neuwagenproduktion in Deutschland, herangezogen und mit Marktdaten (z. B. Gewicht einer PMMA-Heckleuchte) kombiniert. Zusätzlich werden E-Mail-Fragebögen als Informationsquelle genutzt, die von Rohstoffversorgern, PMMA-Verarbeitern und -Verwertern ausgefüllt wurden. Die gesammelten Daten werden abschließend mittels weiterer Experteninterviews plausibilisiert und fehlende Daten durch Expertenabschätzungen ergänzt. Dies ermöglicht fundierte Aussagen über den PMMA-Massenstrom in den fünf Branchen Fahrzeuge, Bau, Elektrik/Elektronik, Verpackungen und Sonstige.

3 Ergebnisse

Im Jahr 2021 wurden in Deutschland insgesamt 61.000 Mg PMMA verarbeitet, von denen 14.000 Mg auf Fahrzeuge, 18.000 Mg auf den Bau-Sektor, 4.000 Mg auf Elektrik und Elektronik, 1.000 Mg auf Verpackungen und 24.000 Mg auf Sonstige Anwendungsfelder entfallen [3]. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die eingesetzten PMMA-Mengen nach Branche und Produkten.

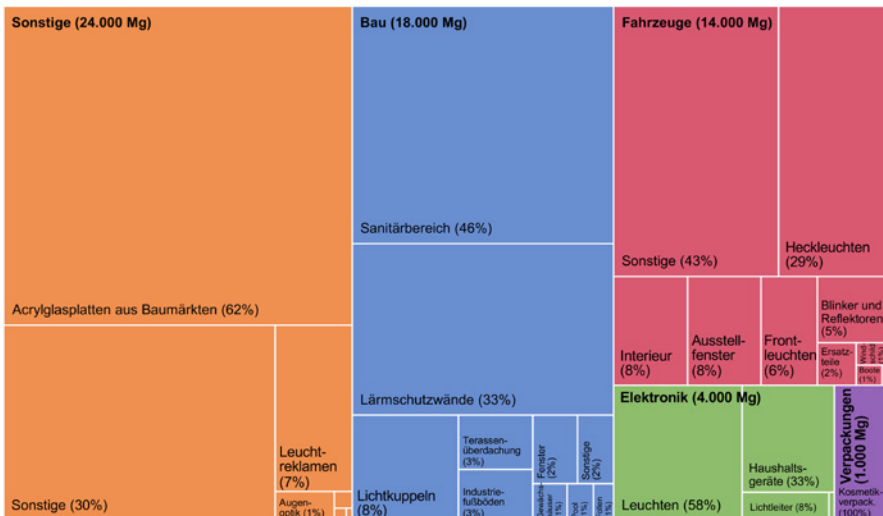


Abbildung 1: Eingesetzte PMMA-Mengen nach Branche [3] und Produkten

Im **Fahrzeugbereich** wird PMMA insbesondere in der Lichttechnik sowie für Designelemente im Interieur und Exterieur von Kraftfahrzeugen eingesetzt. So werden in PKW-Heckleuchten bei einem PMMA-Marktanteil von ca. 90 % und 3,4 Mio. jährlich in Deutschland produzierten Fahrzeugen [4] ca. 3.670 Mg PMMA eingesetzt. Hinzu kommen die Heckleuchten von LKW, Bussen, PKW-Anhängern und LKW-Anhängern, sodass insgesamt ca. 4.010 Mg PMMA allein für Heckleuchten verwendet werden. Insbesondere im hochpreisigen Fahrzeugsegment (ca. 20 % aller Fahrzeuge) werden auch Frontscheinwerfer aus PMMA hergestellt (820 Mg). Weitere sicherheitsrelevante Anbauteile sind Blinker und Reflektoren, die für alle Kraftfahrzeuge ca. 640 Mg PMMA ausmachen. Kraftfahrzeuge haben in Deutschland eine Lebensdauer zwischen 10 und 20 Jahren [5; 6].

Im Interieur wird PMMA unter anderem für Lichtwellenleiter in der Ambientebeleuchtung (380 Mg), für transparente Instrumentenabdeckungen (410 Mg) und für Black-Panel-Displays (290 Mg) verwendet. Eine Masse von ca. 6.000 Mg kann keiner direkten Anwendung zugeordnet werden, da die Verwendung sehr vielfältig ist, aber in geringen Mengen erfolgt. So werden beispielsweise 40 Mg für den Joystick der Mercedes S-Klasse verwendet. Weitere Anwendungen im Interieur sind Dekorelemente mit Hochglanz- oder Klavierlackoptik wie Zierleisten, Mittelkonsolenabdeckungen oder Blenden für Türgriffe. Im Exterieur wird PMMA ähnlich vielseitig eingesetzt. So werden beispielsweise die A- und C-Säulen des Mini (40 Mg) oder das Logo der VW ID-Modelle (3 Mg) aus PMMA gefertigt [7]. Auch der Kühlergrill oder das Außenspiegelgehäuse eines PKW können aus PMMA gefertigt sein. Eine Nischenanwendung sind zudem Leichtbauscheiben für Rennfahrzeuge, die sowohl aus PMMA als auch aus dem alternativ einsetzbaren Polycarbonat hergestellt werden.

Daneben wird PMMA auch im Boots- und Schiffbau (70 Mg) oder für Flugzeugfenster (20 Mg) verwendet. Auch die Windschutzscheibe von Motorrädern und Motorrollern kann aus PMMA gefertigt sein (100 Mg). Die Ausstellfenster von Caravans und Wohnmobilen bestehen meist ebenfalls aus PMMA (1.070 Mg).

In der **Bau-Branche** finden PMMA-Produkte mit Einsatzdauern von 20 Jahren oder mehr tendenziell ihren zeitlich längsten Einsatz. Die größte Menge der insgesamt 18.000 Mg PMMA wird hierbei im Sanitärbereich sowohl im Neubau als auch bei der Renovierung von Bestandsimmobilien verwendet (8.310 Mg): Etwa 30 % der neu eingebauten Dusch- und Badewannen bestehen aus PMMA mit einer Masse zwischen 10 kg und 30 kg. Hieraus ergibt sich eine Menge von etwa 5.860 Mg PMMA jährlich. Weiterhin werden im Sanitärbereich ebenfalls Duschkabinen und -rückwände sowie WC-Sitze oder Waschbecken aus PMMA gefertigt.

Im öffentlichen Bereich wird PMMA in großen Mengen für Lärmschutzwände verwendet (6.000 Mg). Allein an Autobahnen (30 km) [8] und Bahnstrecken (125 km) [9] wurden rund 155 km Lärmschutzwände errichtet, für Landes- und Gemeindestraßen konnten keine Zahlen ermittelt werden. Reflektierende PMMA-Folie wird darüber hinaus auch für Verkehrszeichen verwendet (100 Mg).

Es verbleibt eine PMMA-Menge von ca. 330 Mg, die schätzungsweise hauptsächlich für Fassadenelemente, aber auch für kleinere Bauanwendungen wie z. B. Geländer und Treppen verwendet wird.

Im Bereich der **Elektrik und Elektronik** wird PMMA vor allem für Leuchtenabdeckungen verwendet, die je nach Anwendung eine geschätzte Lebensdauer von 10 bis 30 Jahren besitzen (2.330 Mg). Hierbei ist zu beachten, dass der Wechsel zu energiesparenden Leuchtmitteln derzeit zu einem erhöhten

Abfallaufkommen von PMMA-Leuchtenabdeckungen führt. Darüber hinaus wird PMMA in Elektro-Haushaltsgeräten sowohl für Blenden-Elemente als auch für Black-Panel-Displays eingesetzt (1.320 Mg). Jährlich werden hiervon etwa 80 Millionen Geräte (braune und weiße Ware) verkauft [10]. In der Telekommunikationstechnik werden Faser-Lichtleiter aus PMMA verwendet. Im Jahr 2021 wurden knapp 100.000 km neue „Glasfaser“-Leitungen verlegt [11], was einer Masse von etwa 330 Mg PMMA entspricht. Früher wurde PMMA auch häufig in Bildschirmen für Smartphones, TV-Geräte und Monitore eingesetzt (495 Mg), jedoch findet dies heutzutage kaum noch Anwendung [12]. Stattdessen sind vor allem Altgeräte auf dem Markt, die nach und nach entsorgt werden.

Im **Verpackungssektor** konnte der gesamte PMMA-Einsatz vor allem für Kosmetikprodukte wie Cremes und Düfte identifiziert werden (1000 Mg). PMMA wird hierbei neben Glas und anderen glasklaren Kunststoffen insbesondere für höherpreisige Produkte eingesetzt. Weitere Anwendungen z. B. als Display Case für Spirituosen oder als Siegelkett bei Medikamenten-Verpackungen wurden durch Experten im Interview genannt, konnten in der Internetrecherche jedoch nur vereinzelt identifiziert und nicht quantifiziert werden, sodass hier davon auszugehen ist, dass keine nennenswerten PMMA-Mengen eingesetzt werden. Eine durch die Autoren durchgeführte Leichtverpackungsanalyse-Studie [13] mit mehr als 20.000 einzelnen Verpackungen enthielt keine Verpackungen aus PMMA. Im Verpackungssektor sind die Lebensdauern mit meist nur wenigen Tagen oder Wochen in der Regel sehr kurz [14], bei sehr hochwertigen Produkten mit entsprechenden Packmitteln kann jedoch oft mit deutlich längeren Nutzungsdauern gerechnet werden.

Unter „**Sonstiges**“ ist in den insgesamt 24.000 Mg PMMA insbesondere der Einmaleffekt der Corona-Hygieneschutzscheiben enthalten. Rund 14.880 Mg PMMA-Plattenware wurde 2021 in deutschen Baumärkten verkauft. PMMA-Plattenware wird aber auch außerhalb pandemischer Lagen vielseitig eingesetzt. Rund 1.710 Mg werden beispielsweise für Leuchtreklamen verwendet. Ein großer Masseanteil von etwa 7.000 Mg konnte keiner eindeutigen Verwendung zugeordnet werden, wird aber wohl ebenfalls überwiegend als Plattenware eingesetzt. Hierzu zählen Maschinenabdeckungen, Schutzverkleidungen, Bilderrahmen, Aquarien und Terrarien oder der Einsatz im Event- und Messebau. Darüber hinaus wird PMMA als Plattenware, aber auch in anderen Verarbeitungsformen, für Möbel und Vitriolen oder in Laborgeräten verwendet. Auch in der Medizintechnik wird PMMA eingesetzt, z. B. für Zahnprothesen (10 Mg) oder in Knochenzementen (20 Mg). Weiterhin wird PMMA in der Augenoptik (230 Mg) für Brillengläser und Kontaktlinsen verwendet.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt konnten ca. 80 % der PMMA-Mengen aus [3] einem spezifischen Anwendungsfall zugeordnet und damit genauer quantifiziert und beschrieben werden. Insbesondere im Fahrzeugsektor wird PMMA sehr vielseitig eingesetzt, was eine produktspezifische Mengenbestimmung erschwert. Auch für Produkte, welche unter die Kategorie „Sonstiges“ fallen, trifft das zu. Anhand der ermittelten Mengen für die einzelnen Produktarten soll im nächsten Schritt eine Bewertung bezüglich der voraussichtlichen mechanischen Aufbereitungsfähigkeit durchgeführt und damit das in Deutschland verfügbare PMMA-Recyclingpotential bestimmt werden.

Danksagung

Der Großteil der hier vorgestellten Ergebnisse wurde ermöglicht durch eine Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) im Förderthema 8 „Kreislaufführung und effiziente Nutzung von umwelt-kritischen Metallen und mineralischen Reststoffen“ für das Vorhaben „PMMA in der Circular Economy“ (PACE) mit der Projektnummer 38166/01. Ein besonderer Dank geht an alle Projekt- und Interviewpartner.

Literatur/Quellen

- [1] Breyer-Mayländer, T, Zerres, C, Müller, A, Rahmenführer, K (2022): Die Corona-Transformation. Krisenmanagement und Zukunftsperspektiven in Wirtschaft, Kultur und Bildung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [2] Dubois, J-L, Heijden, S (2023): Preface: the genesis of the MMAtwo project. In: D'hooge, DR, Marien, YM, Dubois, J-L (Hrsg), *Polymer circularity roadmap. Recycling of poly(methyl methacrylate) as a case study*. De Gruyter, Berlin, Boston.
- [3] Conversio GmbH (2022): Stoffstrombild der Kunststoffe in Deutschland 2021. Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen, Mainaschaff, Germany.
- [4] Verband der Automobilindustrie (04.01.2023): Marktdaten Deutschland. Deutscher Pkw-Markt 2022.
- [5] KBA (2022): Durchschnittliches Alter der Lastkraftwagen in Deutschland von 2012 bis 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154528/umfrage/durchschnittliches-alter-der-lkw-in-deutschland/>. Abgerufen am 14.12.2023.
- [6] Wirtschaftswoche (2014): Typische Lebensdauer von Autos in Deutschland nach Automarken. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/316498/umfrage/lebensdauer-von-autos-deutschland/>. Abgerufen am 14.12.2023.
- [7] Bestenreiner, O, Kluch, D, Meier, L, Özdemir, B, Simic, V (2023): Stoffstromanalyse für den PMMA-Werkstoff. Abschlussbericht, Hochschule Pforzheim.
- [8] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2021): Statistik des Lärmschutzes an Bundesfernstraßen 2017 – 2018 – 2019.
- [9] Deutsche Bahn AG (o.J.): Lärmschutz. <https://nachhaltigkeit.deutschebahn.com/de/gruene-transformation/laermschutz>. Abgerufen am 13.12.2023.
- [10] Statista Market Insights (2023): Haushaltsgeräte - Deutschland. <https://de.statista.com/outlook/cmo/haushaltsgeraete/deutschland>. Abgerufen am 13.12.2023.
- [11] MPC Service GmbH (13.07.2022): Glasfaserausbau 2022 in Deutschland.
- [12] Clemm, C, Lang, K-D (2019): Stärkere Verankerung der Ressourceneffizienz und Abfallvermeidung in produktpolitischen Instrumenten. Texte | 18/2019, Dessau-Roßlau.
- [13] 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. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(11):1751–1762.
- [14] Kurth, P, Oexle, A, Faulstich, M (Hrsg) (2018): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.

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 *Dipl.-Ing. Julian Aberger*

Physikalisch mechanische Verbundaufftrennung von Photovoltaik Modulen durch Wasserstrahlschneiden

Abstract: In den letzten Jahrzehnten hat der weltweite Einsatz der kristallinen Photovoltaik (PV)-Technologie stetig zugenommen und unterstreicht das Potenzial für eine saubere und nachhaltige Zukunft. Aufgrund des komplexen Verbundaufbaus stellt das effiziente und hochwertige Recycling von PV-Modulen eine große Herausforderung dar. Im Rahmen des Projekts werden verschiedene Methoden zur schichtweisen Delaminierung erforscht, aber in dieser Arbeit werden die vielversprechenden Ergebnisse des Wasserstrahlschneidens dargestellt. Es wurden mehrere Versuchsreihen entwickelt, um die optimalen Parametereinstellungen für Druck, Spindeldrehzahl, Vorschubgeschwindigkeit, Abstand, Düsendurchmesser, Abtragsraster und Winkel zur Erzeugung der verschiedenen Fraktionen zu ermitteln. Es ist möglich, eine mehrstufige Delaminierung durchzuführen, wobei der Schichtabtrag in Abhängigkeit von den Parametereinstellungen ungleichmäßig erfolgt. Die Trennung von Verbundstoffen ist bereits eine Vorbereitung für das Recycling. Weitere Modultypen werden für die Prozess-evaluierung getestet.

1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojekts PVReValue werden die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für einen vollständigen Aufbereitungs- und Verwertungsprozess von Photovoltaik Modulen (PV Module) basierend auf bereits bestehenden Forschungsergebnissen entwickelt. Ein wichtiger Schwerpunkt dieses Projekts liegt in der Untersuchung und Entwicklung unterschiedlicher Verfahren für die mehrstufige Verbundaufftrennung von PV Modulen.

Das Wasserstrahlschneiden stellt neben dem Fräsen, der Dielektrischen Erhitzung etc. ein mögliches Verfahren für diese Herausforderung dar.

Durch praktische Untersuchungen sollen die optimalen Parameterkombinationen ermittelt werden, um die Effizienz und Qualität des Trennvorgangs mittels Wasserstrahlschneiden für diverse PV Modultypen zu analysieren.

2 Methodik

Der Delaminierungsprozess durch das Wasserstrahlschneiden beginnt mit der Entfernung der Backsheet (BS) Folie, gefolgt von der EVA Schicht, der Solarzelle und erneut der EVA Schicht. Durch die Schicht für Schicht Abtrennung werden die unterschiedlichen Materialfraktionen isoliert, um sie auf Grundlage ihrer Materialeigenschaften weiteraufzubereiten. Im Verlauf des Projekts wird eine iterative Vorgehensweise angewandt, um eine fortlaufende Anpassung der Versuchsparameter und die Optimierung des Prozesses für eine effiziente und wirtschaftliche Verbundauftrennung und Aufbereitung zu gewährleisten.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der ersten Iteration zeigen, dass die mehrstufige Delamination von PV Modulen mithilfe der Wasserstrahltechnik in geeigneten Parameterkombinationen möglich ist und eine Vorfraktionierung stattfindet. Dennoch haben sich während des Untersuchungsverlaufs einige technische Herausforderungen herausgestellt. Hierzu zählen, dass der Abtrag der Solarzelle nur mit dem Einkapslungsmaterial möglich war, der Materialverlust während des Trennungsprozesses und die auftretenden Schwierigkeiten bei der Zwischenreinigung der Schnittflächen. Für künftige Iterationen des Verfahrens wird die Implementierung eines geschlossenen Systems getestet, um den Materialverlust zu minimieren und die Probenahme bzw. Reinigung der Schnittflächen zu verbessern.

Zur Prozessbewertung werden weitere Modultypen überprüft. Das Wasserstrahlschneiden ist ein vielversprechender Prozess zur effizienten mehrstufigen Delamination von PV Modulen. Dies hat das Potenzial, die Wiederverwertung der verschiedenen Materialien zu erhöhen und somit einen Beitrag zur Förderung der Nachhaltigkeit in der Solarenergiebranche zu leisten.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG für die Finanzierung des Projektes PVReValue im Rahmen der 2. Ausschreibung der FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft.

Kontakt

Dipl.-Ing. Ferozan Azizi

Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben

Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, Austria

Tel.: +43 (0) 3842 / 402 - 5133, Mobil: +43 (0) 676 / 84 53 86-5133

E-Mail: ferozan.azizi@unileoben.ac.at

Rückgewinnungspotential von Kunststoffverpackungen durch automatisierte Sortierung von gemischtem Siedlungsabfall – eine Fallstudie aus Österreich

Abstract: Österreich muss mehr Verpackungsmaterialien dem Recycling zuführen. Speziell bei Kunststoffverpackungen sind noch deutliche Steigerungen notwendig, um die EU-Recyclingziele für 2025 und 2030 zu erreichen.

Diese Arbeit hat das Ziel, das Rückgewinnungspotential von Kunststoffen mit automatisierter Abfallsortierung zu evaluieren. Dazu wurden zwei der größten österreichischen Abfallsortieranlagen mit einem jährlichen Gesamtdurchsatz von rund 270.000 t/a untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass das theoretische Rückgewinnungspotential von Kunststoffverpackungen aus diesen beiden Anlagen im Schnitt bei 6.500 t/a liegt. Eine Hochrechnung auf ganz Österreich ergibt ein Potential von etwa 83.000 t/a. Berücksichtigt man weiters Verluste durch die weitere Aufbereitung wie Sortierung und den Recyclingprozess an sich, könnten etwa 30.000 t/a Rezyklat der Kunststoffproduktion zurückgeführt werden. Dies würde einem Anstieg der Recyclingrate für Kunststoffverpackungen von derzeit 25% auf 35% entsprechen.

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit basiert auszugsweise auf dem Manuskript *Recovery of plastic packaging from mixed municipal solid waste. A case study from Austria* von Blasenbauer et al., welche eingereicht wurde und sich derzeit in Revision befindet.

Österreich muss mehr Verpackungsmaterialien dem Recycling zuführen. Wie auch andere EU-Mitgliedstaaten, hat auch Österreich Schwierigkeiten, die von der EU festgelegten Recyclingziele für Verpackungsabfälle zu erreichen (European Environment Agency, 2023). Während bei Verpackungsmaterialien aus Glas, Papier und Karton die EU-Recyclingziele 2025 bereits erreicht werden, sind speziell bei Kunststoff noch erhebliche Steigerungen notwendig (BMK, 2023). Neben Maßnahmen wie der Verbesserung der getrennten Abfallsammlung, der Einführung eines Pfandsystems für bestimmte Fraktionen und dem Produkt-Design könnte die Rückgewinnung von Wertstoffen aus dem gemischten Siedlungsabfall („Restmüll“), einen Beitrag zur Steigerung der Recyclingquoten beitragen. Diese Rückgewinnung könnte durch die automatisierte Abfallsortierung in spezialisierten Sortieranlagen vor der Verbrennung geschehen.

Doch wie hoch ist dieses Potenzial bei den Siedlungsabfällen? Im Jahr 2020 fielen in Österreich 1,8 Mt/a Restmüll an (BMK, 2023). Laut der österreichischen Restmüllanalyse sind etwa 17% oder knapp 300.000 t

Verpackungsmaterialien im Abfall enthalten (Beigl, 2020). Davon sind etwa 110.000 t Verpackungen aus Kunststoff. Etwa 90% des Restmülls werden thermisch in Abfallverbrennungsanlagen behandelt, darunter viele Verpackungsmaterialien (BMK, 2023). Für Verpackungen aus Metall und Glas ist dies weniger ein Problem, da diese aus Verbrennungsrückständen zurückgewonnen werden können (Gritsch and Lederer, 2023; Lederer et al., 2022; Mühl et al., 2023; Warrings and Fellner, 2021). Andere Verpackungsmaterialien gehen jedoch bei der Verbrennung „verloren“ und müssen daher vorher zurückgewonnen werden. Und hier kommt die automatisierte Abfallsortierung ins Spiel. Solche Anlagen nach Stand der Technik können eine Vielzahl an Materialien zurückgewinnen, indem sie die Abfälle mit Aggregaten wie Sieben, ballistischen Separatoren, Metallabscheidern und Nahinfrarot-Sortierern (NIR) sortieren und verarbeiten. Beispiele für solche modernen Sortieranlagen sind die IVAR Forus-Anlage in Norwegen (Edo et al., 2022), die Ecoparc 4-Anlage in Spanien (<https://tinyurl.com/Ecoparc-4>) oder die CDMX-Anlage in Mexiko (<https://tinyurl.com/CDMX-Mexico-City>).

2 Methodik

In dieser Arbeit werden zwei der größten österreichischen Sortieranlagen mit einem jährlichen Gesamtdurchsatz von rund 270.000 t/a untersucht. Hauptzweck dieser beiden Anlagen ist die Vorbehandlung von gemischten Siedlungsabfällen und ähnlichen gewerblichen Abfällen vor der Verbrennung. Diese Vorbehandlung umfasst die Zerkleinerung, das Sieben und die Abtrennung von Eisen- und Nichteisenmetallen. Eine der beiden Anlagen verfügt über eine zweistufige NIR-Sortierung zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen (EBS) für die Zementindustrie. Infolgedessen werden nur Metalle der stofflichen Verwertung zugeführt.

Um das Verwertungspotenzial für andere Wertstoffe abseits von Metallen zu bewerten, wurden ausgewählte Outputs dieser Anlagen in regelmäßigen Abständen beprobt und durch Sortieranalysen charakterisiert. Da für Kunststoffverpackungen die deutlichsten Steigerungen der Recyclingquote erforderlich sind, wird ein Schwerpunkt auf dieses Material gelegt.

3 Resultate

Die Ergebnisse zeigen, dass die Outputs der beiden Sortieranlagen im Schnitt 7.600 t/a Kunststoffverpackungen enthalten – bezogen auf die Trockensubstanz. Diese Zahl berücksichtigt jedoch noch nicht, dass nicht 100% der im Stoffstrom vorhandenen Materialien verwertet werden können. So liegt beispielsweise die Rückgewinnungsrate eines NIR-Sortieraggregates in einer Kunststoffsortieranlage, die getrennt gesammelte Kunststoffabfälle verarbeitet, unter optimalen Bedingungen bei etwa 80-85% (Feil and Pretz, 2020). Bei der Sortierung von Siedlungsabfällen ist der Anteil an Fremdstoffen (z.B. Nicht-Kunststoffe) wesentlich höher, was die Erkennung durch den NIR-Sensor noch komplexer macht und die Rückgewinnungsrate entsprechend senkt. Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen gehen wir davon aus, dass 6.500 t/a tatsächlich zurückgewonnen werden können.

Dieses Kunststoffkonzentrat muss in weiterer Folge noch in spezialisierten Leichtverpackungssortieranlagen sortiert werden und danach jenem Recyclingprozess zugeführt werden, bei welchem das nutzbare Rezyklat produziert wird. Beide diese Prozesse sind mit weiteren Verlusten verbunden, welche je nach

Material recht unterschiedlich sein können. Für den Sortierprozess gibt die Literatur Sortiereffizienzen von 34-83% an (Antonopoulos et al., 2021; Environment Agency Austria, 2020; Van Eygen et al., 2018); für den Recyclingprozess liegen die Effizienzen im Bereich von 26-84% (Antonopoulos et al., 2021; Feil and Pretz, 2020; Shen and Worrell, 2014). Daraus folgt, dass für die Produktion von neuen Kunststoffgütern eine Rezyklatmenge von ca. 2.200 t/a zur Verfügung steht.

Eine Hochrechnung auf ganz Österreich ergibt für Kunststoffverpackungen ein Rückgewinnungspotential von etwa 83.000 t/a. Berücksichtigt man Verluste durch die weitere Aufbereitung wie Sortierung und den Recyclingprozess an sich, könnten etwa 30.000 t/a Rezyklat der Kunststoffproduktion zurückgeführt werden. Dies würde einem Anstieg der Recyclingrate für Kunststoffverpackungen von derzeit 25% auf 35% entsprechen.

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

- Antonopoulos, I., Faraca, G., Tonini, D., 2021. Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows, and barriers. *Waste Manag.* 126, 694–705. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.002>
- Beigl, P., 2020. Auswertung der Restmüllzusammensetzung in Österreich 2018/2019 (en: Evaluation of the MSW composition in Austria 2018/2019).
- BMK, 2023. Bundesabfallwirtschaftsplan 2023 (Federal Waste Management Plan 2023).
- Edo, M., Meissner, R., Nilsson, J., Johansson, I., 2022. Case study about a MSW sorting facility in Norway – IVAR.
- Environment Agency Austria, 2020. Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich Status 2019 (en: sorting and recycling of plastic waste in Austria Status 2019). Umweltbundesamt Österreich (Environment Agency Austria), Vienna.
- European Environment Agency, 2023. Many EU Member States not on track to meet recycling targets for municipal waste and packaging waste — European Environment Agency (Briefing).
- Feil, A., Pretz, T., 2020. Chapter 11 - Mechanical recycling of packaging waste, in: Letcher, T.M. (Ed.), *Plastic Waste and Recycling*. Academic Press, pp. 283–319. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00011-6>

- Gritsch, L., Lederer, J., 2023. A historical-technical analysis of packaging waste flows in Vienna. *Resour. Conserv. Recycl.* 194, 106975. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106975>
- Lederer, J., Bartl, A., Blasenbauer, D., Breslmayer, G., Gritsch, L., Hofer, S., Lipp, A.-M., Mühl, J., 2022. A review of recent trends to increase the share of post-consumer packaging waste to recycling in Europe. *Detritus* 3. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2022.15198>
- Mühl, J., Skutan, S., Stockinger, G., Blasenbauer, D., Lederer, J., 2023. Glass recovery and production of manufactured aggregate from MSWI bottom ashes from fluidized bed and grate incineration by means of enhanced treatment. *Waste Manag.* 168, 321–333. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.048>
- Shen, L., Worrell, E., 2014. Chapter 13 - Plastic Recycling, in: Worrell, E., Reuter, M.A. (Eds.), *Handbook of Recycling*. Elsevier, Boston, pp. 179–190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00013-1>
- Van Eygen, E., Laner, D., Fellner, J., 2018. Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in Austria. *Waste Manag.* 72, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.040>
- Warrings, R., Fellner, J., 2021. How to increase recycling rates. The case of aluminium packaging in Austria. *Waste Manag. Res.* 39, 53–62.

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

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

Bettina Cherdron, Mesut Cetin

Autoren der Studie sind Bettina Cherdron, Amon Krichel, Stefan Schlichter vom ITA Augsburg und Fatah Naji, Birgit Reinelt, Michael Schönemann, Hermann Nordsieck, Malgosia Kroban, Dieter Tronecker, Wolfram Dietz, Moritz Albert, Wolfgang Rommel vom bifa Umweltinstitut

Studie zur Potenzialanalyse der textilen Kreislaufwirtschaft: Ökonomische Potenziale des Textilrecyclings und der Wasserstoffherzeugung aus Textilabfällen

Abstract: Die Studie zur Evaluierung ökonomischer Potenziale des Textilrecyclings und der Wasserstoffherzeugung aus Textilabfällen konzentriert sich auf die Herausforderungen der Textilindustrie in Bezug auf nachhaltige Ressourcennutzung und Abfallreduktion. Angesichts steigender textiler Abfälle gewinnt das weltweite Textilrecycling an Bedeutung, unterstützt durch den Green Deal der EU und die EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles, die auf Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Recycling abzielen. Die Studie betont die Herausforderung vielfältiger Materialmischungen im Textilrecycling und prognostiziert bis 2030 eine 60%ige Steigerung der weltweiten Textilentsorgung. Sie zeigt, dass Textilabfälle wertvolles Fasergut enthalten, das als Sekundärrohstoff genutzt werden kann, und diskutiert verschiedene Recyclingrouten für textile Reststoffe. Dies beinhaltet die Gewinnung von grünem Wasserstoff aus Alttextilien als alternative Energiequelle, wobei die Textilvergasung weitere Forschung erfordert. Die Studie betont die Bedeutung nachhaltiger Recyclingkonzepte und schlägt Kompetenzzentren für textiles Recycling (RE-HUBs) vor, um innovative Lösungen zu entwickeln. Zudem wird die Rolle der Textilindustrie als Schlüsselakteur auf dem Weg zu einer nachhaltigen Zukunft betont und die Notwendigkeit politischer Unterstützung für den Übergang zur Kreislaufwirtschaft hervorgehoben.

1 Einleitung

Die Textilindustrie steht zweifellos vor großen Herausforderungen in Bezug auf nachhaltige Ressourcennutzung und Abfallreduzierung. Angesichts des weltweiten Anstiegs von textilen Abfällen gewinnt das Recycling auch in Deutschland zunehmend an Bedeutung. Die EU hat bereits konkrete Maßnahmen für eine nachhaltige Textilproduktion festgelegt, wie den Green Deal und die EU-Strategie für nachhaltige und kreislauforientierte Textilien. Die Abfallhierarchie betont die Priorisierung von Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Recycling von Textilabfällen.

Um diese Herausforderungen anzugehen und eine zukunftsfähige Entwicklung des Textilrecyclings zu ermöglichen, wurde die wegweisende Studie „Ökonomische Potenziale des Textilrecyclings und der Wasserstoffherzeugung aus Textilabfällen in Bayern“ durch die Zusammenarbeit des ITA Augsburg gGmbH und des bifa Umweltinstitut GmbH erstellt. Diese Studie wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, dem Verband der Bayerischen Textil- und Bekleidungsindustrie e.V. und der Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V. gefördert. Die Ergebnisse dieser Studie liefern wertvolle Entscheidungsgrundlagen für ein nachhaltiges Textilrecycling unter Berücksichtigung technischer, ökonomischer und ökologischer Aspekte. Diese sind auch auf andere Regionen übertragbar.

Die Recyclinglandschaft für Textilabfälle hat sich im Laufe der Zeit verändert. Früher war das Recycling durch mechanische Verfahren relativ einfach, da die Materialvielfalt geringer war. Heutzutage stellen die vielfältigen Materialmischungen und Post-Consumer-Textilien eine große Herausforderung dar. Prognosen zeigen, dass die Menge an Abfalltextilien bis 2030 um 60% steigen wird, was die Dringlichkeit einer effizienten Recyclingstrategie unterstreicht.

2 Zusammenfassung der Kernaussagen der Studie

Die Studie bietet einen detaillierten Einblick in die globalen Ausmaße der Textilindustrie und das drängende Problem des Abfallaufkommens sowie die Verwertungsmöglichkeiten textiler Abfälle. Die Textilindustrie, die Bekleidung, Haus- und Heimtextilien sowie technische Textilien umfasst, spielt weltweit eine bedeutende Rolle. Dabei verarbeitet sie eine erhebliche Menge an Rohstoffen, darunter landwirtschaftliche (Naturfasern) und industrielle (Chemiefasern) Erzeugnisse, um Bekleidungs-, Heim- und technische Textilien für den Markt bereitzustellen.

Von 1975 bis 2021 hat sich die weltweite Textilfaserproduktion von etwa 22 Mio. Tonnen auf rund 113 Mio. Tonnen pro Jahr vervierfacht. Chemiefasern dominieren diesen Markt mit 88,2 Mio. Tonnen, was etwa 78% der Gesamtproduktion ausmacht. Polyesterfasern nehmen dabei den größten Anteil ein (54%), gefolgt von Baumwolle (22%), Polyamid und Viskose (je 5%). Je nach Art der Grundstoffe, sei es fossil oder biosbasiert, variiert der Energieverbrauch für die Herstellung von Polyestern zwischen 51 GJ und 125 GJ pro Tonne, während Baumwolle einen Energieverbrauch von 55 GJ bis 69 GJ pro Tonne aufweist.

Das Abfallaufkommen aus Textilien ist alarmierend. Im Jahr 2015 wurden weltweit etwa 92 Mio. Tonnen Bekleidungstextilien zu Abfall, und Prognosen gehen davon aus, dass diese Menge bis 2030 um 60% steigen wird. In der EU werden jährlich 1,7 bis 2,1 Mio. Tonnen Alttextilien gesammelt, während zusätzliche 3,3 bis 3,7 Mio. Tonnen in gemischten Haushaltsabfällen landen oder in den Haushalten gelagert werden. In Deutschland werden über Altkleidersammlungen jährlich zwischen 1 bis 1,2 Mio. Tonnen Altkleider und Heimtextilien gesammelt, wobei 60% wiederverwendet und etwa 27% stofflich recycelt werden. Etwa 11,5% des Sammelguts finden keine weitere Verwendung und werden thermisch verwertet.

Die Zusammensetzung der Textilien-Restabfälle aus der Altkleidersammlung zeigt, dass 47,1% aus Baumwolle, 14,8% aus Polyester und 11,9% aus Polyester-Baumwoll-Mischgeweben bestehen. In Bayern allein fallen jährlich rund 76.000 Tonnen Alteppiche an, wovon etwa 5,8 kg pro Einwohner pro Jahr entsorgt werden müssen.

Die Verwertungsmöglichkeiten textiler Abfälle werden in der Studie eingehend betrachtet. Wiederverwendung, mechanisches Recycling, thermo-mechanisches Recycling und chemisches Recycling sind hierbei die Schlagwörter. Während mechanisches Recycling als wettbewerbsfähig erscheint, sind neuere Verfahren, insbesondere chemische Verwertungsmethoden aufgrund von Energieaufwand und fehlender industrieller Skalierung noch nicht wirtschaftlich.

Ein interessanter Aspekt der Studie betrifft das Wasserstoffpotenzial textiler Abfälle. Grüner Wasserstoff wird als Schlüssel zur Erreichung von Klimazielen betrachtet. Bayern allein hat einen geschätzten Bedarf von 10 TWh/a an Wasserstoff im Jahr 2030 und 61 TWh/a im Jahr 2050. Die Wasserstoffproduktion aus Textilabfällen ist bisher nicht großtechnisch umgesetzt worden. Eine Abschätzung zeigt, dass jährlich 70.000 Tonnen Textilabfälle in Bayern eine Wasserstoffmenge von 5.600 Tonnen produzieren könnten, was einem Potenzial von etwa 14 Mio € pro Jahr entspricht.

In Anbetracht der aktuellen Herausforderungen und der sich verändernden Rahmenbedingungen schlägt die Studie die Schaffung eines „Textilen Re-Hubs“ in Bayern vor. Dieses Kompetenzzentrum soll dazu dienen, die Textilindustrie auf die zukünftigen Anforderungen vorzubereiten und eine nachhaltige Position im internationalen Wettbewerb zu sichern. Angesichts der drängenden Bedürfnisse und internationalen Vorgaben ist die Schaffung solcher Kompetenzzentren als Antwort auf den Paradigmenwechsel in der textilen Kreislaufwirtschaft dringend erforderlich.

3 Fazit

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die Textilindustrie dringend eine durchdachte Recyclingstrategie benötigt, um den Herausforderungen einer nachhaltigen Ressourcennutzung und Abfallreduzierung gerecht zu werden. Die vorliegende Studie „Ökonomische Potenziale des Textilrecyclings und der Wasserstofferzeugung aus Textilabfällen in Bayern“ liefert bedeutende Erkenntnisse im Kontext eines nachhaltigen Textilrecyclings. Ein besonderer Bedarf besteht in der Verbesserung von Rücknahmesystemen, der Implementierung automatischer Sortiersysteme und der Forschung zur Wasserstofferzeugung aus Alttextilien. Die Etablierung von Kompetenzzentren für Textilrecycling, wie beispielsweise das vorgeschlagene Re-Hub im Großraum Augsburg, könnte die Forschung vorantreiben und die KMU-dominierte Textil- und Bekleidungsindustrie unterstützen. Die zunehmenden gesetzlichen Rahmenbedingungen, insbesondere auf EU-Ebene, werden den Druck zur Entwicklung neuer Strategien weiter verstärken. Die Studie liefert eine verbesserte Zahlenbasis für das textile Recycling als zentrales Element einer zirkulären Kreislaufwirtschaft und bewertet das Potenzial der Erzeugung von Wasserstoff aus textilen Abfällen.

Danksagung

Die Förderung dieser Studie erfolgte durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi), den Verband der Bayerischen Textil- und Bekleidungsindustrie e.V. und die Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V.

Literatur/Quellen

Die detaillierte Studie, inkl. aller Quellen, kann abgerufen werden unter:
<https://ita-augsburg.com/forschung/trec-h2-studie/>

Kontakt

Bettina Cherdron (wissenschaftliche Mitarbeiterin)

ITA Augsburg gGmbH

Tel.-Nr.: +49 176 61760591

E-Mail: bettina.cherdron@ita-augsburg.de

Homepage: www.ita-augsburg.de

Digestate Valorization: Advancing Sustainable Food Waste Composting within Circular Bio-economy and SDGs Frameworks

Abstract: *This study investigates the use of digestate, a by-product of anaerobic digestion, as a moisturizing agent in in-vessel food waste composting, aiming to enhance composting processes while adhering to circular bio-economy principles and supporting the sustainable development goals (SDGs). Through a comprehensive methodology involving the analysis of digestate samples and controlled experiments, the research demonstrates the effectiveness of integrating digestate to optimize composting. The inclusion of digestate improves moisture levels, regulates temperature, and accelerates composting rates, leading to environmental benefits such as waste diversion from landfills and alignment with SDGs objectives. By emphasizing digestate's value in waste management and its broader implications for circular bio-economy and SDGs targets, this study contributes to advancing sustainable practices and promoting a shift towards a responsible circular bio-economy.*

1 Introduction

Urban and agricultural waste management plays crucial roles in the food-waste-water-energy (FWEW) nexus, especially in rapidly urbanizing and intensifying agricultural regions[1]. Effective waste management is vital for environmental sustainability, public health, and efficient water and energy use. Composting, the key to handling organic waste, offers benefits like methane emission reduction, water conservation, and potential energy generation [2].

This approach aligns with several Sustainable Development Goals (SDGs) [3]. SDG 12 promotes responsible consumption and production, optimizing resource use in the FWEW nexus. SDG 6 addresses water challenges, including using digestate from anaerobic digesters for water conservation. SDG 2 advances through efficient waste management and composting, enhancing soil health and agricultural productivity. SDG 15 promotes sustainable land management by diverting waste from landfills and improving soil fertility. SDG 7 supports renewable energy generation, contributing to affordable and clean energy access.

This initiative emphasizes holistic approaches to tackle environmental challenges across urban and agricultural sectors, highlighting the interconnectedness of sustainable development goals within the FWEW nexus.

2 Methodology

The research focused on optimizing bio-waste utilization, including food waste (FW) and wheat straw (WS), through two phases: anaerobic digestion (AD) followed by utilizing the digestate in aerobic processes. This closed-loop system integrated food and agricultural waste anaerobic digestion, where the digestate was used to produce biofertilizer in an in-vessel composter [4]. The study aimed to reduce freshwater consumption by comparing digestate as a moisturizing agent with fresh water, evaluating biofertilizer quality and environmental impacts, including water conservation.

Thorough characterization of the digestates assessed physicochemical properties, macro- and micro-nutrients, and heavy metals. Selection criteria were established based on factors affecting composting performance and end-product quality. In the aerobic digestion phase, food waste served as the primary substrate for in-vessel composting, supplemented by wheat straw and mature compost. The experimental setup, a 200-L laboratory-scale composter, ensured optimal conditions. The study sought to evaluate the impact of incorporating acclimatized digestate on process performance and end-product quality [5].

3 Results and discussion

3.1 Enhancing Composting Efficiency: Insights into qualitative and quantitative dynamics of digestate vs freshwater utilization

The properties of the raw organic materials, such as moisture content and C:N ratio, are pivotal for efficient composting. Moisture content ranged from 6.5% to 96.7%, with the desired range of 55–65% achieved through the addition of a moisturizing agent (MA) in A1 (including water) and digestate in A2. The initial C:N ratio, vital for microbial degradation, fell between 33.28 and 31.07 for the substrates. Physicochemical characteristics like pH, conductivity, potassium, phosphorus, and heavy metals were evaluated for process efficiency.

Temperature monitoring during composting revealed distinct phases, with peak temperatures of 72°C and 66°C for A2 and A1, respectively, meeting pathogen-free compost criteria. Moisture monitoring showed a significant decrease, with A2 reaching 44% moisture content. pH varied, with A1 showing acidity due to carbonaceous degradation, while A2 trended alkaline. The C:N ratio decreased during the thermophilic phase, stabilizing around 11.38 for A1 and 13.99 for A2, indicating maturity. The nitrification index (NI) indicated stability, with both A1 and A2 reaching values close to 3, signifying mature compost. AT4 analysis confirmed stability, with low values of 5.06 and 4.43 for A1 and A2, respectively, indicating no further microbial activity. Comparing reactors using digestate (A2) and freshwater (A1) revealed notable differences. The modified reactor (A2) achieved thermophilic phases faster and with longer durations, with higher temperature values emphasizing the importance of digestate addition. A2 also showed a more alkaline pH trend and a faster decline in moisture content compared to A1. These findings underscore the effectiveness of digestate in improving composting performance, promoting stability, and reducing microbial activity, thus suggesting its potential as a sustainable alternative to freshwater in composting processes.

3.2 Synergizing Food, Waste, Energy, Water Nexus: Insights from Digestate Upcycling in Composting Process

Our research delves into the intricate dynamics of the Food-Waste-Energy-Water (FWEW) nexus, particularly emphasizing the role of digestate in composting processes. We meticulously explore both qualitative and quantitative dimensions of digestate utilization, revealing its potential in advancing Sustainable Development Goals (SDGs). Through thorough characterization, we unveil the physicochemical properties of raw materials, showcasing digestate's efficacy as a moisturizing agent that optimizes moisture content and bolsters microbial activity. Additionally, our temperature monitoring profiles demonstrate heightened thermophilic phases and accelerated composting kinetics with digestate integration, indicative of energy-efficient and pathogen-free compost production. The observed trends in pH and C:N ratio further underscore digestate's role in stabilizing the composting process and enhancing product maturity.

Aligned with SDG 2 (Zero Hunger), our study explores innovative strategies for managing food waste and enhancing soil fertility through biofertilizer production. Moreover, by addressing water scarcity concerns and curbing fresh water consumption, our research contributes significantly to SDG 6 (Clean Water and Sanitation) and SDG 13 (Climate Action). Furthermore, the energy savings achieved through digestate utilization resonate with SDG 7 (Affordable and Clean Energy) and SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure). In addition, our study promotes circular economy principles by establishing links between food waste, waste management (SDG 12), and sustainable land use (SDG 15). The integration of digestate in composting processes highlights the circularity of resources, contributing to SDGs 2, 12, and 15. Furthermore, by addressing the nexus between water, energy, and waste, our research aligns with circular economy principles and supports multiple SDGs, including SDG 2, SDG 6, SDG 13, and SDG 15. Through the transformative potential of digestate-based composting, our study underscores the importance of circular economy approaches in achieving sustainable development objectives.

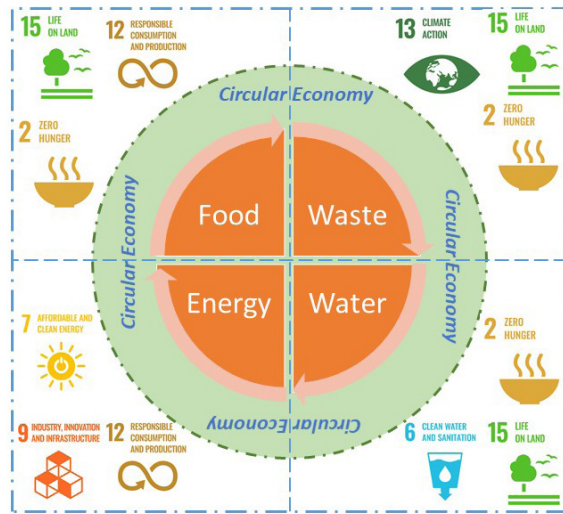


Figure 1. Nexus between FWWE, Circular Economy and SDGs.

4 Conclusion and perspectives

Our study compares the use of digestate and freshwater in composting, revealing significant improvements in efficiency and sustainability. Integrating digestate as a moisturizing agent optimizes moisture content and microbial activity, crucial for effective composting. Temperature monitoring shows faster composting kinetics and pathogen-free production with digestate. Reactors using digestate exhibit faster thermophilic phases, alkaline pH trends, and reduced microbial activity compared to freshwater-based ones, highlighting digestate's effectiveness. Furthermore, our research highlights the synergies within the Food-Waste- Energy-Water (FEW) nexus and its alignment with Sustainable Development Goals (SDGs). Addressing food waste management, soil fertility enhancement, and water conservation, our study contributes to SDGs 2, 6, and 13. Energy savings from digestate use advance SDGs 7 and 9. Additionally, we promote circular economy principles by linking food waste management, waste reduction (SDG 12), and sustainable land use (SDG 15). Through digestate-based composting, we advocate for circular economy approaches to achieve sustainable development across various SDGs.

References

- [1] Ingrao, C.; Failla, S.; Arcidiacono, C. A Comprehensive Review of Environmental and Operational Issues of Constructed Wetland Systems. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2020, 13, 35–45, doi:10.1016/j.coesh.2019.10.007.
- [2] Fayiah, M.; Dong, S.; Singh, S.; Kwaku, E.A. A Review of Water–Energy Nexus Trend, Methods, Challenges and Future Prospects. *Int J Energ Water Res* 2020, 4, 91–107, doi:10.1007/s42108- 020-00057-6.
- [3] Feng, B.; van Dam, K.H.; Guo, M.; Shah, N.; Passmore, S.; Wang, X. Planning of Food-Energy-Water-Waste (FEW2) Nexus for Sustainable Development. *BMC Chemical Engineering* 2020, 2, 4, doi:10.1186/s42480-020-0027-3.
- [4] Effects of Co-Substrates' Mixing Ratios and Loading Rate Variations on Food and Agricultural Wastes' Anaerobic Co-Digestion Performance | Biomass Conversion and Biorefinery Available online: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01655-y> (accessed on 31 January 2024).
- [5] Chaher, N.E.H.; Hemidat, S.; Chakchouk, M.; Nassour, A.; Hamdi, M.; Nelles, M. From Anaerobic to Aerobic Treatment: Upcycling of Digestate as a Moisturizing Agent for in-Vessel Composting Process. *Bioresources and Bioprocessing* 2020, 7, doi:10.1186/s40643-020-00348-0.

Contact

Dr. Ing Nour El Houda Chaher (Research associate)

Department of Waste and Resource Management, Faculty of Agricultural and Environmental Sciences,
University of Rostock, 18051 Rostock, Germany
Department of Chemical and Process Engineering,

National Engineering School of Gabes, University of Gabes
Gabes 6029, Tunisia

Email address: nour.chaher@uni-rostock.de

Homepage: <https://www.researchgate.net/profile/Nour-El-Houda-Chaher>

Abdallah Nassour

Department of Waste and Resource Management, Faculty of Agricultural and Environmental Sciences,
University of Rostock, 18051 Rostock, Germany

Michael Nelles

Department of Waste and Resource Management, Faculty of Agricultural and Environmental Sciences,
University of Rostock, 18051 Rostock, Germany

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ), the German Centre for Biomass Research,
04347 Leipzig, Germany

Additivierung von Kalkhydrat zur Schwefelabscheidung in halogenarmen Abgasen (Ca-ADD)

Abstract: Rauchgasreinigungsanlagen in Müllheizkraftwerken, konventionellen Kraftwerken, Biomasse-Heizkraftwerken und anderen Verbrennungsanlagen nutzen nach dem Stand der Technik überwiegend kalkstämmige Sorbenzien zur Abscheidung saurer Rauchgaskomponenten. Signifikante Einschränkungen hinsichtlich der Anwendbarkeit zeigen sich bei geringen Rauchgasfeuchten, Temperaturen oberhalb von 200 °C sowie bei Vorliegen eines molaren Chlor-Schwefel-Verhältnisses im Rauchgas $< 1,3$. Kalkhydrat ist in Anlagen, in denen diese Bedingungen auftreten, wie z. B. Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen, nur bedingt einsetzbar. Die Mechanismen zur Abscheidung saurer Rauchgaskomponenten am Kalkpartikel sind noch nicht vollständig verstanden. Durch die Kombination mehrerer Messverfahren soll neben phänomenologischen Beobachtungen ein tiefgreifendes Verständnis für die relevanten Mechanismen aufgebaut werden. Hierdurch werden für die Praxis wichtige Erkenntnisse gewonnen und Zusammenhänge ergründet, die zur Optimierung von industriellen Rauchgasreinigungsanlagen genutzt werden können.

1 Einleitung

Die konditionierte Trockensorption hat sich als Standard-Rauchgasreinigungsverfahren in abfall- oder biomassegefeuerten Heizkraftwerken durchgesetzt. Als Adsorbenzien kommen zur Abscheidung der bei der Verbrennung entstehenden säurebildenden Gase (HCl, SO₂, SO₃, HF, HBr) Kalkhydrat (Ca(OH)₂) und Natriumbicarbonat (NaHCO₃) zum Einsatz. Die Verwendung von Natriumbicarbonat ist ohne Konditionierungsmaßnahmen und bei Temperaturen um 180 °C möglich. Zur Abscheidung von Dioxinen, Furanen und Schwermetallen wird zusätzlich Aktivkohle oder Herdofenkoks eingesetzt. Die Reaktion von Natriumbicarbonat mit SO₂ sowie SO₃ weist eine höhere Selektivität im Vergleich zum Kalkhydrat auf. Es wird oberhalb von 140 °C eingesetzt, da erst in diesem Temperaturbereich die eigentlich aktive Komponente Natriumcarbonat (Na₂CO₃) gebildet wird. Kalkhydrat reagiert bevorzugt mit Halogenwasserstoffen und SO₃, zeigt jedoch eine geringere Reaktivität gegenüber SO₂. Betriebstemperaturen von Rauchgasreinigungsanlagen mit Einsatz von Kalkhydrat liegen in Abhängigkeit der Rauchgaszusammensetzung und anderer Randbedingungen zwischen 130 °C und 150 °C. Die relative Rauchgasfeuchte sollte zur Verbesserung der Abscheidungsleistung zwischen 5 % - 6 % liegen. Dies geschieht entweder durch Zugabe von Wasser in einem separaten Apparat, durch das Einspeisen von Dampf direkt in den Rauchgaskanal oder durch das Erhöhen der Feuchte des Sorbens, indem es bereits vor dem Einbringen in die Rauchgasreinigung mit Wasser besprüht wird. Bei Einsatz von Kalkhydrat wird die Abscheidung von SO₂ durch das gleichzeitige Vorhandensein von HCl im Rauchgas deutlich verbessert [1], die Ursachen hierfür sind nicht bekannt und sind somit ebenfalls Teil der Untersuchungen.

2 Wirkmechanismen bei der Additivierung kalkstämmiger Sorbenzien

Es werden drei übergeordnete Wege verfolgt, welche die wesentlichen physikalischen und chemischen Mechanismen des SO_2 -Umsatzes am Kalkpartikel adressieren:

- A) **Verbesserung der Stoffaustauschfläche** durch eine Optimierung der Sorbensmorphologie (innere und äußere Oberfläche) für eine verbesserte Zugänglichkeit zu den aktiven Zentren auf der Oberfläche der Sorbenspartikel. Eine große Anzahl von Untersuchungen [2–14] hat gezeigt, dass sich unter Nutzung der puzzolanischen Reaktion hochporöse, hydrierte calcium- und aluminiumbasierte Silikate oder Sulfate bilden. Die amorphen Strukturen, die selbst nicht an der Umsatzreaktion teilnehmen, kennzeichnet eine hohe spezifische Oberfläche (bis $200 \text{ m}^2/\text{g}$) und eine vorteilhafte Porosität. Die Zugänglichkeit des SO_2 zum Calcium des Sorbens wird deutlich verbessert. Ermöglicht wird dies über einen vorgeschalteten Herstellungsprozess bei dem Calciumoxid (CaO) oder Kalkhydrat mit verschiedenen puzzolanischen Zuschlagstoffen (hohe Anteile an Silizium- und Aluminiumverbindungen sowie Alkali- und Übergangsmetallen) und Wasser bei ca. $90 \text{ }^\circ\text{C}$ gemischt werden. Der Weg zielt auf die physikalischen Schritte Porendiffusion und Schadstoffadsorption.
- B) **Erhöhung der Dissoziation (Lösungsgeschwindigkeit) und Ionenbildung** der Reaktionspartner durch die Erhöhung der Partikelfeuchte (Bildung einer Hydrathülle). Die Anwesenheit einer flüssigen Phase im bzw. am Kalkpartikel gilt als einer der wesentlichen Einflussfaktoren bei der konditioniert trockenem SO_2 -Abscheidung [15–17]. Ein Ansatz, die Partikelfeuchte und damit die Ausbildung einer flüssigen Phase zu fördern, ist die gezielte Zugabe von hygroskopischen, bzw. deliqueszenten Stoffen. Der zweite Weg fokussiert damit die Steigerung der physikalischen Schritte Schadstoffad- bzw. -absorption und Beweglichkeit der Reaktionspartner.
- C) **Veränderung der Sulfatierungsmechanismen und Nutzung von Zwischenschritten**, um die mäßige Reaktivität von SO_2 bei der Reaktion mit Kalkhydrat zu Sulfit oder Sulfat zu umgehen, wie z. B. die Bildung von Calciumhydroxychlorid $\text{Ca}(\text{OH})\text{Cl}$. So wird vermutet, dass $\text{Ca}(\text{OH})\text{Cl}$, welches sich als Zwischenprodukt bei der Abscheidung von HCl bildet [18], mit SO_2 zu CaCl_2 sowie CaSO_3 reagiert und auf diese Weise die Abscheidung von SO_2 verbessert [19]. Nach ersten Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass die Kalk-Additivierung mit Flugstaub, Rotschlamm oder Aluminiumsalzen diese Reaktion begünstigen kann. Eine signifikante Wirkung konnte jedoch noch nicht nachgewiesen werden. In Tabelle 1 sind die Additiv-Beispiele zu Stoffgruppen zusammengefasst und die physikalischen und chemischen Mechanismen, die diese Stoffe am Sorbenspartikel adressieren, aufgeführt. Der Ansatz beleuchtet die chemische Reaktionskinetik.

Tabelle 1: Stoffgruppen für die Additivierung von kalkstämmigen Sorbenzien

Stoffgruppe	Additiv-Beispiel	Vermuteter Wirkmechanismus	
		Primär	Sekundär
Puzzolanische Zuschlagstoffe (Herstellung Silikate)	Flugstaub	A) Verbesserte Stoffaustauschfläche	B) Verbesserung der Partikelfeuchte
	Kohlekraftwerk		
	Hüttensand		
	Silikatstaub		
	Kieselgur Tonerde		
Hygroskopischer Stoff	Ca-Salze	B) Verbesserung der Partikelfeuchte	C) Veränderung der Sulfatierungsmechanismen
	K-Salze		
	Na-Salze		
	Salzhaltige ind. Nebenprodukte		
Chemischer Promotor	Flugstaub MVA	C) Veränderung der Sulfatierungsmechanismen	A) Verbesserte Stoffaustauschfläche
	Rotschlamm		
	Aluminiumsalze		

3 Methodik

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung einer belastbaren Wissensgrundlage für die Additivierung kalkstämmiger Sorbenzien zur Sauer gasabscheidung, in Abhängigkeit von den Konzentrationen der relevanten Rauchgaskomponenten (SO_2 , HCl , CO_2 und H_2O), zur Optimierung der industriellen Abgasreinigung. Als mögliche Additive werden zu Beginn der Untersuchungen Substanzen (vgl. Tabelle 1) ausgewählt, für die in der Literatur bereits positive Effekte hinsichtlich einer verbesserten Sauer gasabscheidung identifiziert wurden. Erweitert wird die Stoffliste mit ökonomisch und ökologisch geeigneten industriellen Nebenprodukten oder Naturprodukten. In Laboruntersuchungen werden die ausgewählten Stoffe hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften charakterisiert. Es werden umfangreiche Analysen unter anderem mittels RFA¹, ICP-OES², XRD³, REM⁴, Raman-Spektroskopie, Licht- und Erhitzungsmikroskopie durchgeführt. Die Laborergebnisse werden auf den Technikumsmaßstab übertragen. Zur Identifikation von Zwischenprodukten an der Oberfläche des Sorbenspartikels wird an der Versuchsanlage eine Methodik zur in-situ-Analyse etabliert. Die Versuchsanlage „MiniPlant“ besteht aus den Komponenten Gaskonditionierung, Wirbelschichtreaktor sowie Kühlung und Filtration. Mit der entsprechenden Regelungs- und Messtechnik ermöglicht diese die Herstellung synthetischer Rauchgase, wodurch das Abscheide- und Umsatzverhalten der ausgewählten Stoffe unter definierten und reproduzierbaren Bedingungen untersucht werden kann. Als Reaktionsraum zwischen Gaskomponenten und zugegebener Fest-

1 Röntgenfluoreszenzanalyse

2 Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy)

3 Röntgenbeugung (X-ray diffraction)

4 Rasterelektronenmikroskop

stoffmischung dient ein Wirbelschichtreaktor. Die Gaszusammensetzung wird am Austritt des Reaktors mit IR⁵-Analytoren erfasst. Durch die ermittelten SO₂-Konzentrationen lässt sich das reaktionskinetische Verhalten ermitteln (Durchbruchkurven). Der Reaktor wird um einen faserbasierten Raman-Sensor zur in-situ-Analytik erweitert (siehe Abbildung 1). Dieser verfügt über ein besonders großes Potential zur Bestimmung der molekularen Zusammensetzungen und Kristallmorphologien von Partikeln. In einem weiteren Schritt werden ausgewählte Additivmaterialien und Mischungsverhältnisse unter realen Bedingungen an einer Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage (Wirbelfeuerung) des LuF TEER an der RWTH Aachen erprobt.

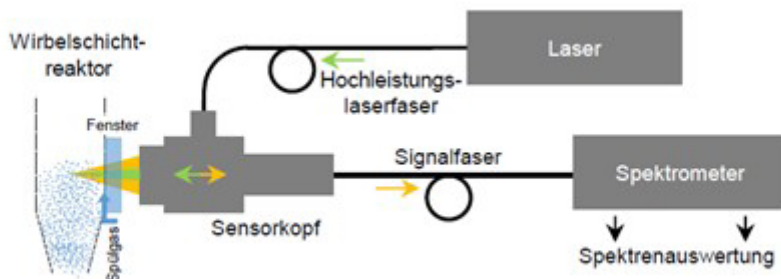


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Raman in-situ-Analytik sowie deren Integration an den vorhandenen Wirbelschichtreaktor

Danksagung

Das AiF e. V.-Projekt Ca-ADD (22821 BG) wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über das Programm der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) für zwei Jahre (2023 – 2025) gefördert.

Das Projektkonsortium setzt sich wie folgt zusammen:

- Professur für Energieverfahrenstechnik (EVT), TU Dresden (Koordination)
- Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER), RWTH Aachen
- Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT), RWTH Aachen
- Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e. V.

Literatur/Quellen

- [1] B. Naffin and U. Werner, „Abscheidung saurer Schadgase in durchströmten, befeuchteten Kalkfilterschichten,“ *Cement, lime, gypsum*, vol. 49, no. 9, 494-508, 1996.
- [2] L. F. Brodnax and G. T. Rochelle, „Preparation of calcium silicate absorbent from iron blast furnace slag,“ *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, vol. 50, no. 9, pp. 1655–1662, 2000, doi: 10.1080/10473289.2000.10464191.
- [3] P. Davini, „Investigation of flue gas desulphurization by fly ash and calcium hydroxide mixtures,“ *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 15, pp. 193–201, 1995.
- [4] R. A. Diffenbach, M. J. Hilterman, E. A. Frommell, and H. B. Booher, „Characterization of calcium oxide-fly ash sorbents for SO₂ removal,“ *Thermochimicu Acta*, vol. 189, pp. 1–24, 1991.
- [5] A. Garea *et al.*, „Fly-ash/calcium hydroxide mixtures for SO₂ removal: structural properties and maximum yield,“ *Chemical Engineering Journal*, vol. 66, pp. 171–179, 1997.
- [6] G. Gong, S. Ye, Y. Tian, Y. Cui, and Y. Chen, „Characterization of Blast Furnace Slag–Ca(OH)₂ Sorbents for Flue Gas Desulfurization,“ *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 47, no. 20, pp. 7897–7902, 2008, doi: 10.1021/ie800873b.
- [7] W. Jozewicz and G. T. Rochelle, „Fly Ash Recycle in Dry Scrubbing,“ *Environmental Progress*, vol. 5, no. 4, pp. 219–224, 1986.
- [8] W. Jozewicz, B. K. Gullett, and Tseng S., Eds., *A novel calcium-based sorbent for the removal of flue gas HCl by dry injection*, 1991.
- [9] K. K. Kind and G. T. Rochelle, „Preparation of Calcium Silicate Reagent from Fly Ash and Lime in a Flow Reactor,“ *Journal of the Air & Waste Management Association (1994)*, vol. 44, pp. 869–876, 1994.
- [10] R.-B. Lin, S.-M. Shih, and C.-F. Liu, „Structural Properties and Reactivities of Ca(OH)₂ /Fly Ash Sorbents for Flue Gas Desulfurization,“ *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 42, no. 7, pp. 1350–1356, 2003, doi: 10.1021/ie020289o.
- [11] C.-F. Liu and S.-M. Shih, „Kinetics of the reaction of iron blast furnace slag/hydrated lime sorbents with SO₂ at low temperatures: effects of sorbent preparation conditions,“ *Chemical Engineering Science*, vol. 59, no. 5, pp. 1001–1008, 2004, doi: 10.1016/j.ces.2003.12.012.
- [12] J. C. Martinez, J. F. Izquierdo, F. Cunill, J. Tejero, and J. Querol, „Reactivation of Fly Ash and Ca(OH)₂ Mixtures for SO₂ Removal of Flue Gas,“ *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 30, pp. 2143–2147, 1991.
- [13] H. Tsuchiai, T. Ishizuka, T. Ueno, H. Hattori, and H. Kita, „Highly Active Absorbent for SO₂ Removal Prepared from Coal Fly Ash,“ *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 34, no. 4, pp. 1404–1411, 1995, doi: 10.1021/ie00043a048.
- [14] M. Yamamoto *et al.*, „Enhancement of Ca(OH)₂ /Fly Ash Sorbent for the Dry-Desulfurization Process,“ *Energy Fuels*, vol. 20, no. 5, pp. 1901–1905, 2006, doi: 10.1021/ef050438q.
- [15] B. Naffin, „Einflüsse von Gaszusammensetzung und Temperatur auf das Durchströmungsverhalten von Kalkfilterschichten und die Schwefeldioxidabscheidung,“ Dissertation, Universität Dortmund, Dortmund, 1998.
- [16] R. Karpf, „Verbesserung der Abscheideleistungen bei optimiertem Additiveinsatz,“ in *3. Tagung Trockene Abgasreinigung, 2007*.
- [17] *Abgasreinigung durch Chemisorption*, 3928, Verein deutscher Ingenieure, Jan. 2017.

- [18] M. Köhler, „Methode zur speziierenden Untersuchung der Reaktionsprodukte in Kalkadditiv-basierten Rauchgasreinigungen,“ Dissertation, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, TU Dresden, Dresden, 2021.
- [19] R. Karpf and A. Wiedl, Eds., *Abgasreinigung hinter Klärschlammverbrennungsanlagen: was wird funktionieren und was funktioniert nicht*. Nietwerder: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 2018.

Kontakt

Joel da Silva Félix, M. Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter

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

Tel.-Nr. +49 241 80 96575

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

Homepage: www.teer.rwth-aachen.de



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Comparative life cycle assessment of a concrete slab with different conventional and flexible designs

Abstract: *This paper presents a comprehensive environmental assessment of flexible design within the building industry, with a specific emphasis on a case study involving the flexible design of a slab element. Employing the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, the study quantifies the environmental impacts associated with the flexible design. The LCA results reveal a reduction in carbon dioxide (CO₂) emissions when utilizing flexible elements. This observed decrease can be primarily ascribed to a concurrent reduction in operating energy and diminished resource consumption. The findings underscore the potential environmental benefits of incorporating flexible design strategies in the construction sector.*

1 Introduction

The challenges of transitioning the construction industry to regenerative practices are varied and complex and encompass collective efforts amongst all stakeholders in the construction value chain. One, amongst many strategies for achieving impact reductions is better resource and waste management in construction. Literature suggests that design-strategic approaches are central for achieving regenerative construction (i.e., circular construction), as such, strategies support reuse and recycling of materials in opposition to disposal (or downcycling) with hereof resulting environmental benefits. Applying flexible design results in decreasing CO₂ emissions, energy consumption, natural resources usage, building waste generation, etc. (Sadafi et al., 2014). Beside environmental impacts of sustainable construction, there are social and economic benefits. For example, decrease in consumption of energy and natural resources reduce the cost of construction, which this results in lower price of construction activities and buildings for users.

Despite considerable benefits of sustainable construction, several barriers rose in the application of sustainability in construction sector. For example, long lifetime of buildings makes it difficult to persuade the owners, builders and designers to invest on a sustainable building (Sadafi et al., 2014). That emphasizes on the importance of research and scientific proofs to clarify the reliability and advantages of sustainability in construction sector. The main focus of this paper is to calculate and approve the environmental benefits of the concept of circular, adaptable construction practices through a case study.

2 Case study: Hamburger Klassenhäuser

This case study named “Hamburger Klassenhäuser” is collection of several comparable schools in each of them one of the following slabs is applied: a conventional slab, a flexible-designed slab with pre-stressed concrete, a flexible-designed slab with pre-stressed concrete and with seam and joint in connection

sections; and a wood-concrete screwed flexible designed slab. This case study, built in Hamburg in 2020, is part of the CIRCulT project - Circular Construction in Regenerative Cities. CIRCulT is a collaborative project funded by the European Commission's Horizon 2020 program for the period 2019-2023, which aims to support the creation of regenerative cities through the implementation of sustainable and circular construction practices (CIRCulT, 2019-2023).



Figure 1. Case study: Hamburger Klassenhäuser

3 Methodology

According to ISO 14040 and ISO 14044, the general principles of the LCA framework divides into four separate phases: Goal and scope definition, Inventory analysis, Impact assessment and Interpretation of the results (ISO 14040:2006). In the following section, each step will be described for the case of this project.

To compare the environmental impacts of this case study, DIN EN 15978 European standard is used. In this standard, 4 modules are defined to cover the life cycle of the buildings (Deutsche Institut für Normung e.V [DIN], 2012)

- module A1-A3 (Product stage)
- module A4-A5 (construction process stage)
- module B1-B7 (use stage) which is out of scope of this study
- module C1-C4 (end of life stage)
- Module D (benefits and loads beyond the system boundary) refers to the future use of components which is not considered in the study

3.1 Goal and scope definition

The goal of this study is to assess and compare the environmental impacts of conventional and flexible-designed slab construction and analyze if flexible components leads to higher environmental benefits compared to conventionally designed components. All the analysis is done for the functional unit of „Construction of 1 m² of a slab for a school building in Hamburg“

Four scenarios are defined in order to calculate and compare the environmental impact of construction and design methods:

Scenario 1: Construction of a conventional in-situ concrete slab (slab type 1)

Scenario 2: Construction of a pre-stressed concrete slab (slab type 2)

Scenario 3: Construction of a pre-stressed concrete slab with seam joint (slab type 3)

Scenario 4: Construction of a wood-concrete slab with screwed joint (slab type 4)

For each of the above scenarios, a life cycle model is developed in OpenLCA software and the environmental impacts are calculated using ecoinvent V3.7.1 database (ecoinvent 3.7, 2021).

3.2 Life cycle inventory

The primary data have been provided directly from the OTTO WULFF Bauunternehmung GmbH in Hamburg. Moreover, in case of data gap, secondary data were collected from the Ecoinvent v3.7.1 database.

3.3 Life cycle impact assessment

The impact assessment method used in this modelling is the ReCiPe Midpoint H, which is part of the ReCiPe method, one of the most recent and updated impact assessment methods available to LCA Practitioners. It addresses a number of environmental concerns and expresses them through 18 midpoint level categories, which are then weighed and aggregated into a set of three endpoint categories.

3.4 Interpretation of the results

Module A1-A3

Compared to the baseline scenario, the LCA modelling confirms that the carbon emissions are lower for the flexible slab cases.

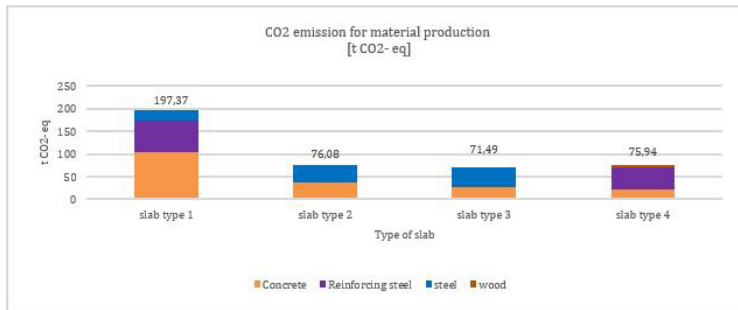


Figure 2. Comparison of CO₂ emission for material production of each slab

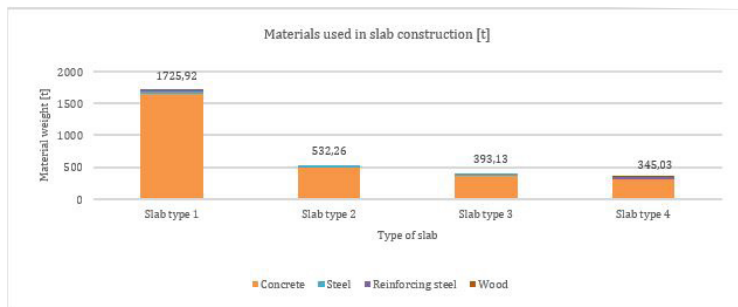


Figure 3. Comparison of material used in production of each slab

The diagrams above indicate that despite the small amount of steel and reinforcing steel used, there is considerable CO₂ emissions compared to the use of concrete in the conventional in-situ concrete slab. This fact emphasizes the importance of material selection and their positive impacts on embodied CO₂ emissions.

Module A4-A5

The LCA results show that transportation and installation of building materials in construction site do not have a significant role in contributing to CO₂ emissions when compared to material production (module A1-A3) and end of life phase (module C).

Module C

For the modeling process, it was assumed that the conventional slab will be demolished and recycled at the end of use phase. The dismantling and transportation of the slab constructions for a new building has been assumed in the assessment to include the avoided impacts. Manual activities like screwing or manual dismantling were not considered in the calculations. The CO₂ emissions for the transportation and reassembly of each slab is presented in the following diagram.

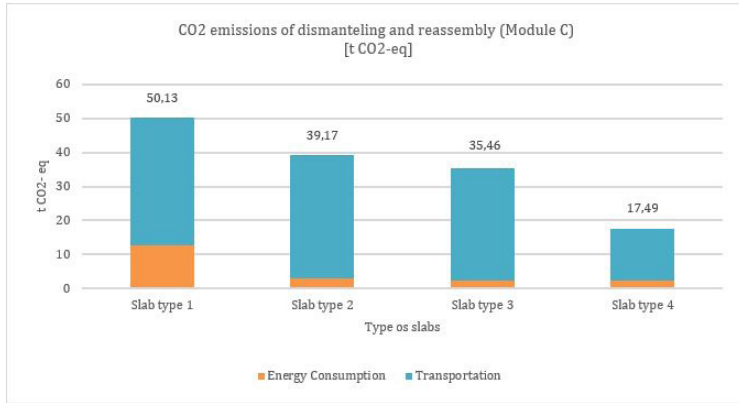


Figure 4. CO₂ emissions of dismantling and reassembly of each slab (Module C)

Conclusion

The interpretation of the results, focusing on modules A1-A3, A4-A5, and C, revealed notable findings. In particular, the flexible slab cases exhibited lower carbon emissions compared to the baseline scenario (slab type 1), emphasizing the significance of material selection in reducing embodied CO₂ emissions. The impact of transportation and installation during the construction phase was found to be less significant in contributing to CO₂ emissions compared to material production and end-of-life phases.

In essence, the findings underscore the need for a holistic approach to sustainable construction practices, where material selection, construction processes, and end-of-life considerations play pivotal roles in minimizing environmental impacts. The comparison of the environmental impacts confirmed that Scenario 4, with a hybrid and flexible design for dismantling, shows a reduction of more than 50% in CO₂ emissions compared to the other scenarios.

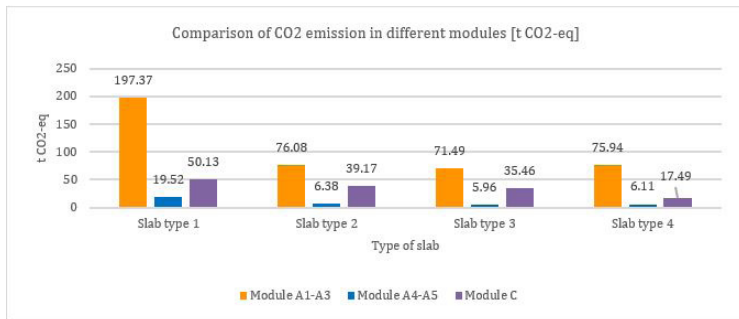


Figure 5. Comparison of CO₂ emission in different modules

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude for the financial support received by “the European Union’s Horizon 2020 research and innovation program” through the CIRCUIT project.

References

- ABOUT THE PROJECT: WHAT IS CIRCUIT. (2019-2023).*
- Deutscher Institut für Normung e.V. (DIN) (2012). *DIN EN 15978(2012-01)* (DIN EN 15978).ecoinvent 3.7 (2021). *ecoinvent database 3.7.*
- ISO 14040:2006. *ISO 14040:2006, Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.* https://www.h2.de/fileadmin/user_upload/Einrichtungen/Hochschulbibliothek/Downloaddateien/DIN_EN_ISO_14044.pdf
- Sadafi, N., Zain, M. F. M., & Jamil, M. (2014). DESIGN CRITERIA FOR INCREASING BUILDING FLEXIBILITY: DYNAMICS AND PROSPECTS. *Environmental Engineering and Management Journal, 13*(2), 407–417. <https://doi.org/10.30638/eemj.2014.045>

Contact

Mrs., Mahsa Doostdar, Research associate (wissenschaftliche MitarbeiterIn)
Hamburg University of Technology / Institute of Circular Resource Engineering and Management (CREM)
Tel.-Nr. +49 40 42878 4499
E-Mail: mahsa.doostdar@tuhh.de
Homepage: <https://www.tuhh.de/crem/willkommen>

Unlocking the recycling potential: Die Gewinnung von recyclingfähigen Kunststoffen aus gemischten Abfällen

Abstract: Die Europäische Kommission hat im Circular Economy Action Plan ambitionierte Ziele für das Recycling von Siedlungsabfällen festgelegt, um Recycling zu fördern und Stoffkreisläufe zu schließen. Bisherige Erkenntnisse zeigen, dass lediglich 3 bis 5% der gemischten Gewerbeabfälle recycelt werden. Damit die ehrgeizigen Ziele der Europäischen Kommission erreicht werden, muss die Recyclingrate erhöht werden. Zu diesem Zweck wurden gemischte Gewerbeabfälle einer korngroßenabhängigen Zusammensetzungsanalyse unterzogen. Die Ergebnisse daraus zeigen, dass unter anderem ein Potential für eine stoffliche Verwertung von Polypropylen (PP) aus gemischten Gewerbeabfällen besteht. Daher wurde eine Versuchsreihe entwickelt, welche die Gewinnung eines PP-Konzentrates für das mechanische Recycling im großtechnischen Maßstab ermöglichen soll. Ziel dieser Forschungsarbeit ist es ein geeignetes Anlagenkonzept zu entwickeln, welches PP-Konzentrate in geeigneter Qualität erzeugt und dabei die Qualität des erzeugten Ersatzbrennstoffes der Abfallaufbereitungsanlagen nicht beeinträchtigt.

1 Einleitung

Mit dem neuen Circular Economy Action Plan hat die Europäische Kommission ehrgeizige Ziele für das Recycling von Siedlungsabfällen gesetzt, mit dem Ziel, das Recycling zu fördern und Stoffkreisläufe zu schließen (European Commission (EC) 2020). Um den Richtlinien der Europäischen Kommission gerecht zu werden, sind nicht nur die separat gesammelten und sortenreinen Abfallfraktionen von Interesse, sondern auch die gemischten Siedlungs- und Gewerbeabfälle. Laut Pomberger (2021) gibt es für verwertbare Fraktionen aus gemischten Siedlungsabfällen bis dato keine vernünftige Rückführung in das Wirtschaftssystem, mit Ausnahme der Metalle. Laut Wellacher und Pomberger (2017) führt dies lediglich zu einer Recyclingrate von 3 bis 5% bei gemischten Gewerbeabfällen. Mehrere Arbeiten haben gezeigt, dass ausreichende Mengen an potentiell recyclingfähigen Kunststoffen in gemischten Gewerbeabfällen grundsätzlich vorhanden wären (Möllnitz et al. (2020), Weissenbach et al. (2019), Umweltbundesamt (2014), Wellacher und Pomberger (2017)). Um die Recyclingrate von gemischten Gewerbeabfällen zu erhöhen und einen Schritt näher an eine Kreislaufwirtschaft heranzuführen, ist es entscheidend, die typischen Erzeugnisse mechanischer Abfallaufbereitungsanlagen (Ersatzbrennstoffe) um weitere Fraktionen zu erweitern. Dazu müssen zusätzliche Fraktionen qualitätsgesichert abgetrennt, aufbereitet und einer weiteren stofflichen Verwertung zugeführt werden. Jede weitere Fraktion, die aus gemischten Abfällen gewonnen und dem Recycling zugeführt wird, erhöht die Recyclingrate und führt die europäische Produktionswirtschaft einen weiteren Schritt näher zu einer Kreislaufwirtschaft. Der aktuelle Stand der Technik in

Abfallaufbereitungsanlagen konzentriert sich primär auf die Produktion von qualitätsgesicherten Ersatzbrennstoffen. Dieser Artikel widmet sich der systematischen Untersuchung der erforderlichen Anpassungen und verfahrenstechnischen Maßnahmen, die Abfallaufbereitungsanlagen künftig vornehmen müssen, um den Übergang von reinen Ersatzbrennstoffproduzenten zu Sekundärroh- und -brennstoffproduzenten zu vollziehen. Im Mittelpunkt dieses Beitrags steht die methodische Herangehensweise, die angewendet wurde, um das Ausbringen von Polypropylen (PP) aus gemischten Gewerbeabfällen für ein mechanisches Recycling in einer modernen Abfallaufbereitungsanlagen zu ermöglichen.

2 Methodik

2.1 Die drei Forschungsphasen

Das methodische Vorgehen für die Entwicklung eines passenden Anlagenkonzeptes für das Ausbringen von PP aus gemischten Gewerbeabfällen für ein mechanisches Recycling in einer modernen Abfallaufbereitungsanlage wurde zunächst in 3 Forschungsphasen unterteilt. Diese sind in Abbildung 1 veranschaulicht.



Abbildung 1: Die drei Forschungsphasen mit Kennzeichnung des Status-Quo

Beim Verfassen dieses Artikels wurden noch nicht alle Phasen durchlaufen und noch nicht alle Erkenntnisse gewonnen. Im Folgenden werden die bereits abgeschlossenen Phasen erläutert und zukünftige Forschungsfelder beleuchtet.

2.2 Forschungsphase 1: Grundlegend Untersuchungen

Zu Beginn der Phase 1 wurde zunächst mit einer grundlegenden Literaturrecherche begonnen, welche darauf abzielte, Informationen über die im Input enthaltenen Mengen und die geforderten Qualitäten für PP-Konzentrate zu gewinnen. Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass in gemischten Gewerbeabfällen geeignete Mengen an Polyolefinen vorhanden sind. Allerdings fehlen Daten über die technisch verfüg-

baren Mengen, d.h. jene Massenanteile, welche für einen sensorgestützten Sortierer (SBS) technisch zur Verfügung stehen. Im Konkreten wird angenommen, dass in einer durchschnittlichen Abfallaufbereitungsanlage nur Partikel der 3D-Fraktion größer 60 mm für einen solchen Sortierer zugänglich sind. Um die korngößenspezifische Materialverteilung in gemischten Gewerbeabfällen zu ermitteln, wurde eine repräsentative Probenahme durchgeführt. Die gewonnenen Proben (ca. 1500 kg in 20 Inkrementen) wurden anschließend in 8 Siebschnitte gesiebt und alle Siebschnitte größer 20 mm in 30 Fraktionen sortiert. Unter den sortierten Fraktionen befand sich auch die Fraktion 3D-Polypropylen. Mit diesen Daten konnte ein technisches Potential für das Ausbringen von PP aus gemischten Gewerbeabfällen abgeleitet werden. Zudem belegt die Arbeit von Möllnitz et al. (2020), dass die aus gemischten Gewerbeabfällen gewonnenen Kunststoffe für ein mechanisches Recycling geeignet sind.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden mehrere Vorversuche in einer modernen österreichischen Abfallaufbereitungsanlage umgesetzt. Das Ziel dieser Vorversuche bestand darin, grundlegende technische Erkenntnisse und Erfahrungen zu sammeln und somit großtechnische Versuche vorzubereiten.

Die drei Vorversuche hatten jeweils eine Dauer von etwa 60 Minuten. Dabei wurde der SBS, welcher im Normalbetrieb auf das Ausbringen von Störstoffen (PVC) eingestellt ist, auf das Ausbringen von Wertstoffen (PP) eingestellt. Ein Überblick über die Vorversuche und deren Erkenntnisse werden in Abbildung 2 dargestellt.

Vorversuch 1:	Vorversuch 2:	Vorversuch 3:
Ziele des Vorversuches: Grundlegende Untersuchung / Machbarkeit eruieren / Problemfelder erkennen	Ziel des Vorversuches: Erreichen eines höheren Wertstoffausbringens durch geeigneteres Inputmaterial	Ziel des Vorversuches: Messung des PO Ausbringens des Sortierers
Ein sensorgestützter Sortierer (SBS) in einer Abfallaufbereitungsanlage wurde auf das Ausbringen von PE+PP (PO) eingestellt.	Gleicher Versuchsaufbau wie aus Vorversuch 1. Besseres Material als bei Vorversuch 1. Das PO-Material zeigt eine gute Qualität. Eject Output jedoch immer noch gering.	Gleicher Versuchsaufbau / repräsentative Probenahme des Eject und Rejects / Anschließende Sortierung. Eject zeigt eine gute Reinheit an PO
Erkanntes Problemfeld: Inputmaterial für den Versuch war nicht ideal. Wenig Kunststoffanteil, viel davon 2D-Material.	Erkanntes Problemfeld: Das PO-Material zeigt eine gute Qualität. Eject Output jedoch immer noch geringer als erwartet.	Erkanntes Problemfeld: Das Ausbringen des Sortierers ist zu gering, da nicht auf alle geeigneten Partikel geschossen wird.
Hypothese: ein weiterer Versuch mit geeigneteren Inputmaterial soll den Einfluss dessen darstellen	Hypothese: Der geringe Eject Anteil wird durch den SBS verursacht. Daher wird eine Analyse des Ausbringens des SBS angedacht.	Hypothese: Das Anlernen von geeigneten Partikeln sollte das Ausbringen deutlich erhöhen
Ableitung daraus für den nächsten Versuch: neuer Versuch mit gleichen Einstellungen aber geeigneterem Inputmaterial	Ableitung daraus für den nächsten Versuch: Repräsentative Probenahme mit anschließender Sortierung, um das Ausbringen des Sortierers ermitteln zu können	Ableitung daraus für die folgenden Anlagenkonzepte: Die Gewinnung von PO-Konzentraten kann prinzipiell in geeigneter Qualität und Menge erzeugt werden. Das Ausbringen des Sortierers muss allerdings erhöht werden

Abbildung 2: Überblick über die Vorversuche und deren Erkenntnisse

2.3 Forschungsphase 2: Sensorische, maschinelle und konzeptionelle Anpassungen

Die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Vorversuchen wurden schließlich genutzt, um daraus geeignete Anlagenkonzepte für das großtechnische Ausbringen von PP aus gemischten Gewerbeabfällen für das mechanische Recycling zu entwickeln. Dabei wurde die neue Infrastruktur der Montanuniversität, das Digital Waste Research Lab (DWRL) für die Nachsortierung eingesetzt. Eine Beschreibung des DWRL ist in der Arbeit von Kandlbauer et al. (2023) zu finden. Die bisher erstellten Anlagenkonzepte wurden zum Teil bereits umgesetzt und es konnten mehrere hundert Kilogramm an PP-Konzentraten für das mechanische Recycling in geeigneter Qualität gewonnen werden. Die Anlagenkonzepte werden in Abbildung 3 dargestellt. Davon wurden bereits die Konzepte 1 und 2 umgesetzt und die weiteren Konzepte befinden sich in der Planungs- bzw. Umsetzungsphase.

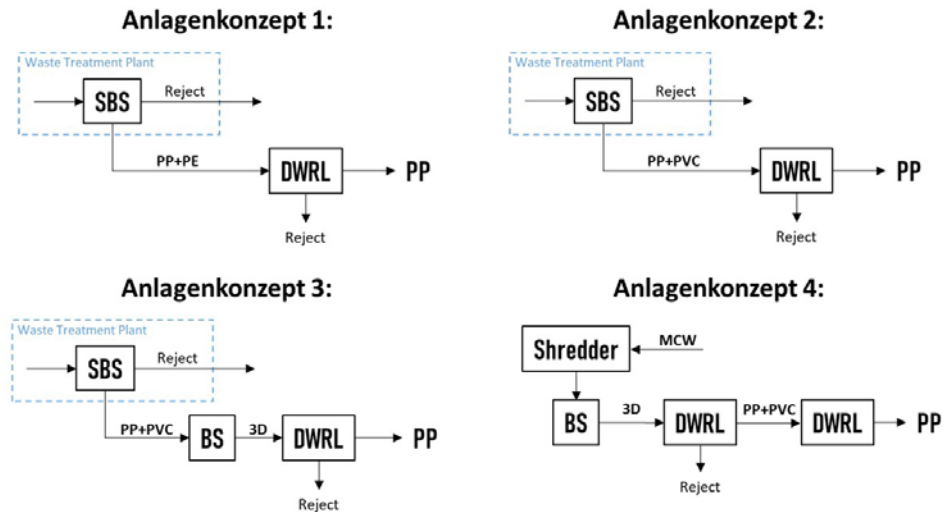


Abbildung 3: Darstellung der umgesetzten und geplanten Anlagenkonzepte

Danksagung

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

Literatur/Quellen

- European Commission (EC) (2020): A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>, zuletzt geprüft am 28.06.2023.
- Kandlbauer, Lisa; Sarc, Renato; Pomberger, Roland (2023): Großtechnische experimentelle Forschung im Digital Waste Research Lab und Digitale Abfallanalytik und -behandlung. In: Österr Wasser- und Abfallw, S. 1–10. DOI: 10.1007/s00506-023-00999-1.
- Möllnitz, S.; Khodier, Karim; Pomberger, R.; Sarc, Renato (2020): Grain size dependent distribution of different plastic types in coarse shredded mixed commercial and municipal waste. In: Waste Manage 103, S. 388–398. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.12.037.
- Pomberger, Roland (2021): Über theoretische und reale Recyclingfähigkeit. In: ÖWAV (Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband) 73 (1-2), S. 24–35. DOI: 10.1007/s00506-020-00721-5.
- Umweltbundesamt (2014): Stoffstromorientierte Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen. Unter Mitarbeit von Iswing Dehne, Rüdiger Oetjen-Dehne, Nadine Siegmund, Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH, Berlin.

Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_18_2015_stoffstromorientierte_loesungsansaetze_fuer_eine_hochwertige_verwertung_0.pdf.
Weissenbach, Thomas; Pomberger, Roland; Sarc, Renato (2019): Composition of mixed commercial waste with focus on recyclable fractions. Heraklion, Greece. Online verfügbar unter http://uest.ntua.gr/heraklion2019/proceedings/pdf/HERAKLION2019_Weissenbach_etal.pdf.
Wellacher, Martin; Pomberger, Roland (2017): Recyclingpotenzial von gemischtem Gewerbeabfall. In: Österr. Wasser- und Abfallw. 69 (11-12), S. 437–445. DOI: 10.1007/s00506-017-0426-8.

Kontakt

Dipl.-Ing., Maximilian Julius Enengel, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW)

Tel.-Nr.: 06509110192

E-Mail: maximilian.enengel@unileoben.ac.at

Homepage: <https://www.avaw-unileoben.at/>

Entwicklung einer kosten- und zeiteffizienten Methode zur Bestimmung des Polyolefingehaltes einer Kunststofffolienfraktion mithilfe des Schwimm-Sink-Verfahrens

Abstract: Ziel war die Erarbeitung einer verlässlichen Methode zur Bestimmung des Polyolefingehaltes (PO-Gehaltes) einer Kunststofffolienfraktion mithilfe des Schwimm-Sink-Verfahrens. Für die Methodenentwicklung wurde in Vorversuchen die optimale Kombination aus Konzentration an Benetzungsmittel (handelsübliches Spülmittel), Rührparametern (Geometrie, Drehzahl, Position, Dauer), Aufgabemenge und Absetzzeit ermittelt. Anschließend wurde ein Scale-Up auf ein Trennmediumvolumen von ca. 110 Litern und einer Aufgabemenge von 209 Folienstücken durchgeführt. Für die bestmögliche Benetzung ohne Schaumbildung wurde eine Spülmittelkonzentration von 0,03 Vol% gefunden. Ein Schrägblattrührer mit 90 mm Durchmesser, einer Blatthöhe von 30 mm und einer Blattneigung von 30 Grad erzielte Strömungsverhältnisse, die eine gute Durchmischung des Probenmaterials gewährleisteten. Mit einer Rührdauer von 10 Minuten und einer Absetzzeit von 5 Minuten konnten sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Hinsichtlich Nicht-Polyolefin-Multilayer ergaben sich durch die Verwendung von Wasser als Trennmedium Probleme.

1 Einleitung

Der vorliegende Beitrag bildet einen Teil zur Entwicklung und zum Vergleich von Methoden zur Bestimmung des Polyolefingehalts von Kunststofffraktionen. Neben der in dieser Arbeit betrachteten Schwimm-Sink-Methode werden am Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben auch spektroskopische und lösemittelbasierte Verfahren erarbeitet. Im Vergleich zu diesen bietet die Schwimm-Sink-Analyse Vorteile hinsichtlich der direkten Ausnutzung von Stoffeigenschaften und einer einfachen apparativen und kosteneffektiven Umsetzung. Während Polyolefine eine Dichte von unter 1 g/cm^3 aufweisen, haben die meisten anderen Kunststoffe eine höhere Dichte (Bauer et al. 2017). Aufgrunddessen bietet sich Wasser als kostengünstiges Trennmedium für eine Dichtentrennung an. Ein kritischer Parameter für den Trennerfolg ist die vollständige Benetzung mit dem Trennmedium, damit das Partikel dichtebasiert sinkt bzw. schwimmt. Während Hartkunststoffpartikel ein relativ kleines Oberflächen-zu-Masseverhältnis aufweisen, ist dieses bei Kunststofffolien anders. Es muss daher durch ein Oberflächenbenetzungsmittel gewährleistet werden, dass keine Luftblasen auf den Folien anhaften (Hu et al. 2010).

2 Durchführung

Den Ausgangspunkt stellte eine Teilprobe (vgl. Tabelle 1) einer händisch vorsortierten Kunststofffolienfraktion einer österreichischen Abfallbehandlungsanlage dar. Das Probenmaterial wurde im ersten Schritt auf eine im Labor handhabbare Korngröße zerkleinert und anschließend gewaschen. Um die Komplexität des Verhaltens der Folien im System systematisch zu erproben, wurde ein inkrementeller Ansatz verfolgt. Dieser führte abhängig von Beobachtungen bzw. Versuchsergebnissen Schritt-für-Schritt zu einer Optimierung der notwendigen Parameter.

2.1 Probenvorbereitung

Ziel der Probenvorbereitung war es einerseits, den Einfluss der Korngröße und der Verschmutzung der Partikel zu reduzieren und andererseits die Zusammensetzung des Probenmaterials zu bestimmen. Zu Beginn wurden die Folienstücke händisch mit einer Schere zerkleinert (maximale Kantenlänge 5 cm) und anschließend in einem dreistufigen Waschprozess gewaschen. Zur Bestimmung der Zusammensetzung erfolgte eine Charakterisierung der einzelnen Folienstücke mit Hilfe eines Fourier-Transformations-Infrarotspektrometers und die Sortierung in die Klassen *Polyolefin-Singlelayer (PO-SL)*, *Polyolefin-Multilayer (PO-ML)*, *Nicht-Polyolefin-Singlelayer (NPO-SL)* und *Nicht-Polyolefin-Multilayer (NPO-ML, mindestens eine Seite NPO. z.B. PE/PA, PP/PET, PA/PET)*.

Tabelle 1: Zusammensetzung der repräsentativen Teilprobe

	SL-PO	ML-PO	SL-NPO	ML-NPO	REST	Summe
Masse [g]	122	15	8	66	1	212
Stückzahl [-]	1180	109	44	356	–	1689

2.2 Inkrementelle Methodenentwicklung

Gestartet wurde mit der Fraktion „SL-NPO“, da der Erfolg der Methode anhand dieser Fraktion am besten zu beobachten war. Bei den Vorversuchen mit realen Proben wurde festgestellt, dass vor allem dünne Folien durch anhaftende Luftblasen fälschlicherweise ins Schwimmgut ausgetragen werden. Die vollständige Benetzung der Oberfläche mit dem Trennmedium (deionisiertes Wasser) wurde daher als essentielle Voraussetzung definiert. Da im Probenmaterial nur wenige dünne SL-NPO (vgl. Tabelle 1) vorhanden waren, wurde die weitere Methodenentwicklung auf „idealisiertem Material“ aufgebaut. Dieses bestand aus sehr dünnen LDPE und PVC-Folien. Mit Hilfe dieser Proben wurden kritische Parameter, wie die optimale Spülmittelkonzentration, Aufgabemenge, Rührdauer und Absetzzeit erprobt. Anschließend erfolgte ein Scale-Up auf das Zielbeckenvolumen von ca. 110 l. In den Versuchen wurde hauptsächlich die Rührergeometrie und -positionierung modifiziert, um vorteilhafte Strömungsverhältnisse zu erwirken. Weiters wurden in diesem Schritt die in den vorangegangenen Versuchen gefundenen Parameter getestet und nötigenfalls angepasst. Zum Schluss wurde die Methode mit den ermittelten Parametern auf das reale Probenmaterial (vgl. Tabelle 1) angewandt.

3 Ergebnisse

3.1 Methodenentwicklung

Die entwickelte Methode eignet sich zur Bestimmung des Polyolefingehaltes einer Kunststofffolienfraktion mit Hilfe des Schwimm-Sink-Verfahrens im Trennmedium Wasser. In ihrer derzeitigen Ausführung ist diese jedoch auf händisch zerkleinertes und gewaschenes Probenmaterial beschränkt. Zusätzlich muss eine Einschränkung hinsichtlich NPO-Multilayerfolien getroffen werden. Reines deionisiertes Wasser war nicht geeignet, um eine ausreichende Abtrennung dieser Fraktion zu gewährleisten. Tabelle 2 zeigt zusammenfassend sämtliche für die Durchführung der Methode notwendigen Parameter.

3.2 Methodenanwendung auf reales Probenmaterial

Zur Bewertung der Genauigkeit der entwickelten Methode wurde die Charakterisierung des Probenmaterials mittels FTIR als Referenz hinzugezogen. Eine Gegenüberstellung der ermittelten Werte ist in Abbildung 1 zu finden. Sowohl anzahl- als auch massebezogen kam die Schwimm-Sink-Methode zu höheren PO-Anteilen. Die Ergebnisse zeigen, dass es bei der PO-Anteilsbestimmung mit dem Schwimm-Sink-Verfahren zu einer Übersortierung der NPO-Folienstücke kam.

Tabelle 2: Zusammenfassung des Anwendungsbereichs, der Einschränkungen und der Parameter der optimierten Schwimm-Sink-Methode

Anwendungsbereich	Kunststofffolien mit einer maximalen Kantenlänge von ca. 1 – 5 cm
Einschränkungen	Gewaschenes und zerkleinertes Probenmaterial, nicht geeignet für NPO-Multilayerfolien
Behälterbreite [cm]	50
Behälterlänge [cm]	80
Füllhöhe Wasser [cm]	30
Rühraggregatleistung [W]	min. 50
Rührerart	Schrägblattrührer (3D gedruckt aus PLA-Filamet)
Geometrische Abmessungen des Rührers	Durchmesser: 180 mm Rührblatthöhe: 30 mm Rührblattneigung: 30°
Rührerdrehzahl [U/min]	120
Spülmittelkonzentration [Vol%]	0.03
Abstand Rührer von Boden [cm]	10
Aufgabestückzahl [Stk.]	200
Rühdauer [min]	10
Absetzdauer [min]	5

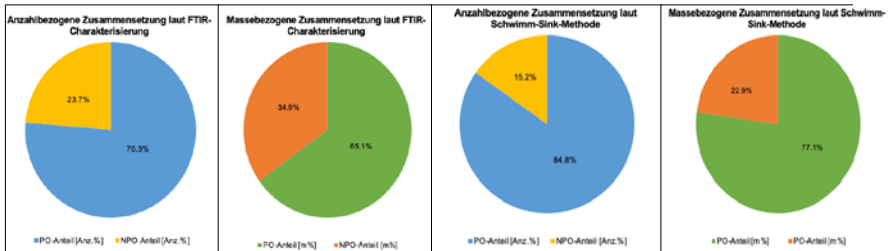


Abbildung 1: Zusammensetzung des Versuchsmaterials bestimmt durch die FTIR-Charakterisierung und der Schwimm-Sink-Methode

Mit einer Dichte von 1 g/cm^3 kann ein sehr scharfer Trennschnitt zwischen Polyolefinen und anderen Kunststoffen gezogen werden. Bezüglich Folien, die aus mehreren Schichten unterschiedlicher Kunststoffe bestehen, ergibt sich jedoch ein Erfassungsproblem. In den meisten Fällen bestehen Multilayerfolien zum Großteil aus PE- oder PP-Schichten in Kombination mit PA-6 oder PET (Häsänen 2016). Abhängig von dem Verhältnis zwischen den PO- und NPO-Schichtdicken in einer NPO-Folie kann sich eine Dichte unter oder über 1 g/cm^3 ergeben. Abbildung 2 veranschaulicht diese Tatsache sehr gut. Während die falsch ausgetragenen Folienstücke in den Fraktionen SL-PO, ML-PO und SL-NPO gering waren, wurden in der Fraktion ML-NPO nur die Hälfte der Folienstücke richtig ausgetragen.

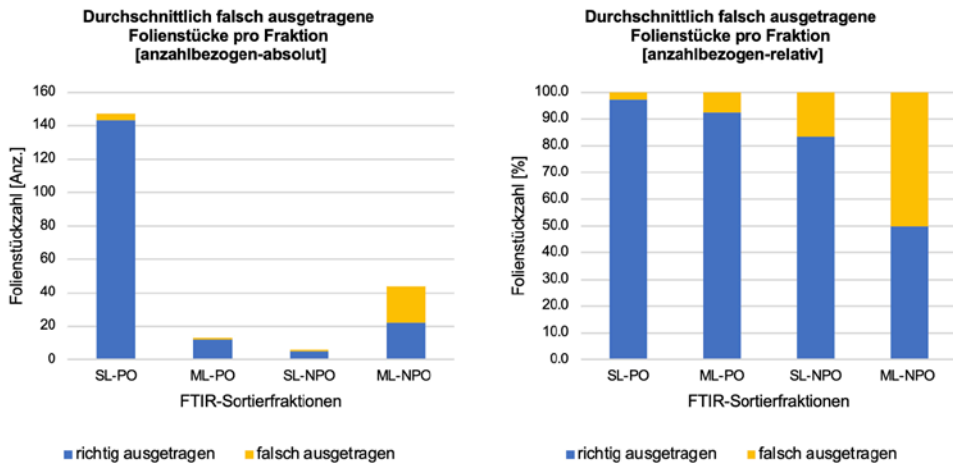


Abbildung 2: Durchschnittlich richtig bzw. falsch ausgetragene Folienstücke

Die Fraktion der ML-NPO Folien hat daher Potential für weiterführende Arbeiten. Ein möglicher Ansatz wäre die Dichte der Folien genau zu bestimmen und in weiterer Folge die Dichte des Trennmediums anzupassen. Dadurch könnte womöglich der Abscheidegrad der NPO-Multilayerfolien verbessert werden.

4 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag präsentiert eine Methodenentwicklung zur Bestimmung des Polyolefingehalts mittels Schwimm-Sink-Analyse. Die Methode wurde auf reales Probenmaterial angewandt, wobei diese im Vergleich zur FTIR-Charakterisierung (Referenzmethode) einen höheren Polyolefinanteil fand. Besondere Herausforderungen ergaben sich hinsichtlich NPO-Multilayerfolien, für deren Abscheidung reines Wasser als Trennmedium nicht ausreichend war. Diese Fraktion bietet Potential für weitere Untersuchungen, insbesondere hinsichtlich der Anpassung der Trennmediumdichte.

Danksagung

Wir danken dem österreichischen Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort, der Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung und der Christian-Doppler-Forschungsgesellschaft für die finanzielle Unterstützung. Darüber hinaus bedanken wir uns für die finanzielle und nicht-finanzielle Unterstützung unserer Unternehmenspartner Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoffrecycling Austria AG, Linz Service GmbH, OMV Downstream GmbH und Wien Energie GmbH.

Literatur/Quellen

- Bauer, Markus, Markus Lehner, Daniel Schwabl, Helmut Flachberger, Lukas Kranzinger, Roland Pomberger, und Wolfgang Hofer. 2017. „Bestandsaufnahme und mögliche Perspektiven der nass-mechanischen Aufbereitung von Altkunststoffen für das rohstoffliche Recycling“. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 69 (11–12): 446–59. <https://doi.org/10.1007/s00506-017-0420-1>.
- Häsänen, Eemeli. 2016. „Composition Analysis and Compatibilization of Post-Consumer Recycled Multi-layer Plastic Films“. Tampere University of Technology.
- Hu, B., N. Fraunholz, und P. Rem. 2010. „Wetting Technologies for High-Accuracy Sink-Float Separations in Water- Based Media“. *The Open Waste Management Journal* 3 (1). <https://benthamopen.com/ABSTRACT/TOWMJ-3-71>.

Kontakt

Thomas Fink, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel.-Nr.: +43 3842/402-5101

E-Mail: thomas.fink@unileoben.ac.at

Homepage: www.avaw-unileoben.at

Ermöglichung einer Echtzeitklassifikation von Mehrkomponentenkunststofffolien mittels maschinellen Lernens und der Reduktion spektraler Komponenten

Abstract: Die im österreichischen Anlagenpark als Stand-der-Technik geltende Nahinfrarotsortierung kommt bei der Separation von Kunststofffolien aufgrund des geringen Signal-Rausch-Verhältnisses, mechanischer Positionierungs- und Austragsprobleme und insbesondere infolge der großen Anzahl an möglichen Materialkombinationen an ihre Grenzen. Um die reale Recyclingfähigkeit von Kunststofffolien zu steigern, empfiehlt es sich, die derzeit technisch nicht recyclingbaren Mehrkomponenten- von den gut recyclebaren Monokomponentenfolien zu separieren. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie mit Hilfe der Reduktion der Spektralkomponenten von 220 auf 67 die Inferenzzeiten so weit herabgesetzt werden konnten, dass eine Echtzeitklassifikation mit Hilfe eines flachen neuronalen Netzwerks möglich wurde. Mit einer Genauigkeit von 85 % konnten Mono- und Mehrkomponentenfolien klassifiziert werden.

1 Einleitung

Jährlich fallen in Österreich 150.000 t Kunststofffolien als Abfall an. Nur teilweise wird dieser Stoffstrom einer stofflichen Verwertung zugeführt. Der Großteil der anfallenden Kunststofffolienabfälle wird bis dato thermisch verwertet (Van Eygen, Laner, und Fellner 2018). Für die Erreichung des von der EU gesetzten Ziels, Recycling von 50% des Kunststoffverpackungsmaterials bis 2025, ist es notwendig, die stoffliche Verwertung der Folienabfälle zu steigern. Eine Trennung dieser Fraktion in Mono- und Mehrkomponentenfolien kann helfen dieses Ziel zu erreichen. Monokomponentenfolien können der stofflichen Verwertung zugeführt werden. Gleichzeitig kann eine Mehrkomponentenfolienfraktion als Feedstock für Methoden des derzeit stark beforschten chemischen Recycling dienen.

Im derzeitigen Österreichischen Anlagenpark sind Nahinfrarotsortieraggregate für die Sortierung von Kunststoffabfällen weit verbreitet. Obwohl die eingesetzten Klassifikationsalgorithmen in den letzten 30 Jahren (Pretz und Julius 2008) ihren Aufgaben gerecht geworden sind, geraten diese bei neuen Sortieraufgaben an ihre Grenzen. Klassifikationsalgorithmen derzeit eingesetzter Sortieraggregate beruhen auf der Bildung von Materialklassen aufgrund charakteristischer Spektren. Diese Klassifikationsart ermöglicht eine stabile Sortierung von Polymerarten. Ist man jedoch an der Sortierung von Mono- und Mehrkomponentenfolien interessiert, führt eine Klassenbildung anhand polymertypischer Banden zu Herausforderungen. Die Vielzahl an unterschiedlichen Polymeren, deren Kombination und Variationen in der Schichtdicke schaffen eine Heterogenität, die nur schwer in Klassen fassbar ist. Eine Möglichkeit, dieser Herausforderung gerecht zu werden, ist die Abstraktion der Materialunterschiede auf eine höhere Ebene

mit Hilfe maschinellen Lernens. Die Klassifikation macht sich materialartübergreifende Unterschiede zwischen den Gruppen Mono- und Mehrkomponentenfolien zunutze. Ziel dieser Arbeit war es die Echtzeitklassifikation von Mono- und Mehrkomponentenfolien mit Hilfe eines flachen neuronalen Netzwerks durch Minimierung der Inferenzzeit mittels Merkmalsreduktion zu ermöglichen.

2 Methotik

2.1 Datenakquise

Die Datengrundlage bildete Folienmaterial aus der getrennten Sammlung, welches mithilfe FTIR- und DSC-Messungen in die Klassen Mono- und Mehrkomponentenfolien eingeteilt wurde. Die Aufnahme der spektralen Daten erfolgte am lehrstuhligen Rutschensortieraggregat *Clarity* der Firma *Binder&Co*. Die Daten der NIR-Zeilenkamera (*EVK G2 Hyperspectral Imaging-Kamera*) wurden direkt über die *Gigecam / GenIcam* Schnittstelle abgegriffen. Die Messmethode wurde von Reflektion auf Transflektion durch Einlegen einer Kupferplatte angepasst. Vorangegangene Arbeiten zeigten, dass dies zu einer höheren Spektralqualität von Folien führt (Koinig u. a. 2022). Über die Rutschenbreite von 80 cm werden 312 Ortspixel aufgenommen. Der Spektralbereich von 991 nm bis 1677 nm wird mit 220 Spektralpixel abgebildet. Die einzelnen Folienstücke wurden nacheinander über die Rutsche fallen gelassen und anschließend die Spektren der einzelnen Objektpixel in Matlab extrahiert. Um die unter- und überbelichteten Pixel aus dem Datenset zu entfernen, erfolgte anschließend eine Mittelwertbildung über den gesamten Spektralbereich der einzelnen Spektren. Spektren mit zu hoher und zu niedriger Intensität wurden entfernt. Die erhaltenen Spektren wurden abgeleitet, normiert und geglättet. Abschließend erfolgte eine Teilung der Spektren in ein Trainings- (80% der Spektren) und ein Testset (20% der Spektren) (Nguyen u. a. 2021).

2.2 Merkmalauswahl und -reduktion

Um eine Klassifikation in Echtzeit zu gewährleisten, muss die Inferenzzeit des Klassifikationsmodells minimiert werden. Eine Methode hierfür ist die Reduktion der Datenmenge, die berechnet werden muss. Dies geschieht durch Auswahl von Merkmalen, die relevante Unterschiede zwischen den zwei Klassen am besten beschreiben. Merkmale, die keinen Beitrag zur Unterscheidung liefern werden in der Klassifikation nicht berücksichtigt. Für die Auswahl von Spektralkomponenten (Wellenlängen) eignet sich der in dieser Arbeit verwendete Minimum redundancy maximum relevancy (MRMR) Algorithmus (Jiang und Li 2015). Dabei werden Spektralkomponenten so nach ihrer Wichtigkeit geordnet, dass die Relevanz für die Vorhersage hoch und die Redundanz minimal ist.

Zur Bestimmung der optimalen Anzahl der wichtigsten Spektralkomponenten wurde ein flaches neuronales Netzwerk (3 Fully Connected Layers mit je 10 Neuronen) iterativ mit ansteigender Anzahl an Spektralkomponenten trainiert. Die Auswahl dieser Spektralkomponenten geschah nach dem erfolgten Ranking der Vorhersagekraft durch den MRMR Algorithmus. Beginnend mit den höchstgewerteten Spektralkomponenten wurde die Anzahl schrittweise erhöht. Mithilfe des erhaltenen Modells wurde das Testset offline klassifiziert und für jede Iteration die Klassifikationsgenauigkeit und die Inferenzzeit aufgezeichnet. Zur Bestimmung der optimalen Anzahl an Spektralkomponenten wurden sowohl die Genauigkeit als auch die Zeit im Verhältnis zu ihren maximal erreichten Werten gesetzt. Zusätzlich wurde die erste Ableitung der

Genauigkeitsfunktion analysiert und der Punkt gefunden, an dem kein signifikanter Zuwachs in erreichter Genauigkeit mehr zu verzeichnen war.

Alle Berechnungen, die für die Merkmalauswahl und -reduktion notwendig waren, wurden in *Matlab R2022b Update 2* auf einem *MacBook Pro*, ausgestattet mit einer *Intel Core I7-CPU* (Quad-Core, 2.2 GHz Taktung) und einer *Intel Iris Pro Grafikkarte* (1536MB) durchgeführt.

3 Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt die Bewertung der einzelnen Wellenlängen durch den MRMR-Algorithmus für die Unterscheidung zwischen Mono- und Mehrkomponentenfolien. Zusätzlich sind auch die Mittelwertspektren der beiden Klassen dargestellt. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass der Algorithmus jene Wellenlängenbereiche hoch bewertet, bei denen auch optisch die größten Unterschiede zwischen den beiden Mittelwertspektren zu sehen sind. Wellenlängen, bei denen sich keine signifikanten Unterschiede ergeben, sind niedrig bewertet. Unabhängig von den jeweiligen charakteristischen Spektren der Kunststoffe wurden die wichtigsten Wellenlängenbereiche (dunkelrot) für die Unterscheidung der beiden Klassen gefunden.

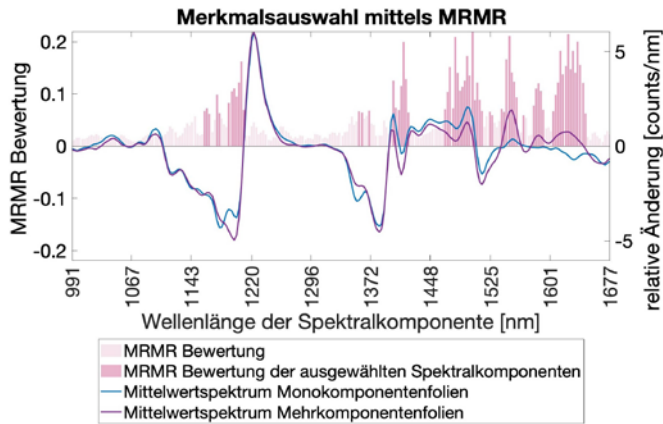


Abbildung 1: Merkmalsauswahl für die Unterscheidung zwischen Mono- und Mehrkomponentenfolien

Abbildung 2 zeigt die grafische Darstellung der Klassifikationsgenauigkeit und der Inferenzzeit in Abhängigkeit der für das Training des neuronalen Netzwerks verwendeten Spektralkomponenten. Dabei beschreibt $n=1$, die vom MRMR-Algorithmus höchstbewertete Spektralkomponente. Die Ergebnisse zeigen, dass die optimale Anzahl an Spektralkomponenten zur Separation von Mono- und Mehrkomponentenkunststofffolien relativ gering ist. Nur 67 der insgesamt 220 Spektralkomponenten reichen aus, um eine Klassifikationsgenauigkeit des flachen neuronalen Netzwerks von 98% für das Offline-Testset zu erreichen. Die Inferenzzeit sinkt auf ca. die Hälfte der Inferenzzeit für die Klassifikation des Testsets mit allen Spektralbanden. In einer weiterführenden Arbeit konnte dadurch erreicht werden, dass das Modell schnell genug für eine Echtzeitklassifikation war. Hierbei wurden 85% der getesteten Folien vom Modell richtig als Mono- bzw. Mehrkomponentenfolie erkannt.

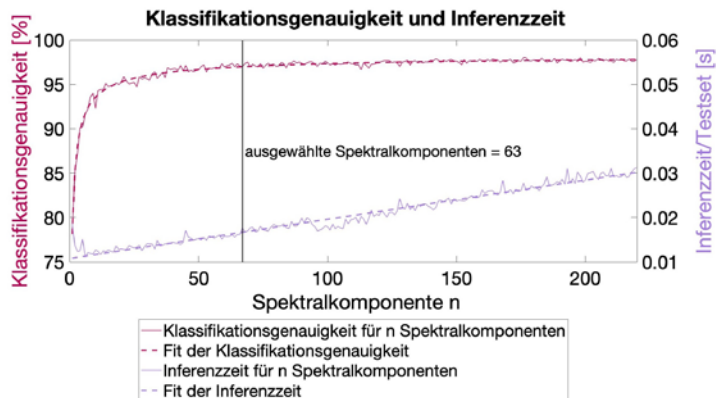


Abbildung 2: Klassifikationsgenauigkeit und Inferenzzeit des falchen neuronalen Netzwerks

Danksagung

Diese Publikation ist im Rahmen des flex4loop Projektes entstanden. Dieses Projekt wird von der Österreichischen Forschungsgesellschaft FFG unterstützt. Wir danken den Fördergebern und den Projektpartnern für ihre finanzielle und nichtfinanzielle Unterstützung.

Literatur/Quellen

- Jiang, Yu, und Changying Li. 2015. „mRMR-based feature selection for classification of cotton foreign matter using hyperspectral imaging“. *Computers and Electronics in Agriculture* 119 (November): 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.10.017>.
- Koinig, G., K. Friedrich, B. Rutrecht, G. Oreski, C. Barretta, und D. Vollprecht. 2022. „Influence of reflective materials, emitter intensity and foil thickness on the variability of near-infrared spectra of 2D plastic packaging materials“. *Waste Management* 144 (Mai): 543–51. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.019>.
- Nguyen, Quang Hung, Hai-Bang Ly, Lanh Si Ho, Nadhir Al-Ansari, Hiep Van Le, Van Quan Tran, Indra Prakash, und Binh Thai Pham. 2021. „Influence of Data Splitting on Performance of Machine Learning Models in Prediction of Shear Strength of Soil“. *Mathematical Problems in Engineering* 2021 (Februar): e4832864. <https://doi.org/10.1155/2021/4832864>.
- Pretz, T., und J. Julius. 2008. „Stand der Technik und Entwicklung bei der berührungslosen Sortierung von Abfällen“. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 60 (7–8): 105–12. <https://doi.org/10.1007/s00506-008-0005-0>.
- Van Eygen, Emile, David Laner, und Johann Fellner. 2018. „Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in Austria“. *Waste Management* 72 (Februar): 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.040>.

Kontakt

Thomas Fink, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Montanuniversität Leoben Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel.-Nr.: +43 3842/402-5101

E-Mail: thomas.fink@unileoben.ac.at

Homepage: www.avaw-unileoben.at

Einflussparameter auf die optische Detektion von Batterien in gemischten Abfallströmen

Abstract: *Der vermehrte Eintrag von unsachgemäß entsorgten Altbatterien erschwert die ökologische und ökonomische Behandlung diverser Abfallströme und stellt die Abfallwirtschaft durch die Zunahme von Brandereignissen vor besondere Herausforderungen. Das Streben der abfallrechtlichen Gesetzgebung zum Wandel in eine Kreislaufwirtschaft erfordert die Steigerung der Sammelmengen von ressourcenintensiven Abfällen wie Batterien. Der Einsatz von optischen Systemen in Kombination mit maschinellem Lernen bietet in den Bereichen der Brandverhütung und der Ausschleusung von Wertstoffen Potenziale für zukünftige Anwendungen in Abfallbehandlungsanlagen. Die vorliegende wissenschaftliche Betrachtung setzt sich in diesem Kontext zum Ziel, grundlegende Kenntnisse über Einflüsse auf die optische Detektion und Datenverarbeitung zu erarbeiten. Die methodische Vorgehensweise zielt auf die Definition von Parametern ab, um das Erstellen einer Batterie-Bilddatenbank für das maschinelle Lernen von Faltbaren Neuralen Netzwerken (Convolutional Neural Network CNN) zu ermöglichen.*

1 Einleitung

Das Bestreben der Europäischen Union zur Klimaneutralität mit dem sogenannten „Grünen Deal“ führt mit dem „Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft“ zur Erneuerung der abfallwirtschaftlichen Regulierung der Bewirtschaftung von Batterien. Batterien stehen durch ihren hohen Ressourcenverbrauch und ihr Kreislaufpotenzial im Fokus, um Maßnahmen zur verbesserten Sammlung und Behandlung von Abfällen umzusetzen (Europäische Kommission, 2020). Sachgemäß entsorgte Altbatterien können nach ihrer Nutzungsphase stofflich verwertet werden und bieten mit ihren Bestandteilen wie Blei, Zink, Mangan, Eisen, Lithium etc. ein großes Rohstoffpotential. Die unsachgemäße Entsorgung von Batterien ist jedoch mit erheblichen Umweltrisiken verbunden (Martens & Goldmann, 2016).

Die steigende Anzahl von Brandereignissen stellt die Abfallwirtschaft zunehmend vor Herausforderungen. Batterien, insbesondere Lithium-Ionen-Batterien, bieten in abfallwirtschaftlichen Prozessen durch die gespeicherte Energie und das Potenzial zur Wärmefreisetzung bei Beschädigungen ein erhebliches Sicherheitsrisiko (Nigl et al., 2020). Wachsende Mengen an in Verkehr gebrachten Gerätebatterien, sowie die durchschnittlich längere Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien, führen zur Steigerung der Mengen an Batterien mit unbekanntem Verbleib. Das Forschungsprojekt BAT-SAFE konnte die Menge an Gerätebatterien in den Abfallfraktionen Restmüll, Leichtverpackungen, Metallverpackungen und Elektrokleingeräte im Jahr 2016 mit rund 800 Tonnen beziffern (Nigl & Pomberger, 2020).

Die vorliegende wissenschaftliche Betrachtung setzt sich in diesem Kontext zum Ziel, grundlegende Kenntnisse über Einflüsse auf die optische Detektion von Batterien in gemischten Abfallströmen zu erlangen. Mit den gewonnenen Erkenntnissen sollen Parameter definiert werden, um eine optimierte Klassifikation mittels Faltbaren Neuronen Netzwerken auf Basis einer Batterie-Bilddatenbank und vortrainierten Netzwerken zu ermöglichen.

2 Vorgehensweise und Methodik

2.1 Evaluierung des Aufnahmesetups zur Erstellung einer Bilddatenbank

Unter Berücksichtigung notwendiger geometrischer Anforderungen an die Detektion von Batterien in realen Abfallbehandlungsanlagen wird der Aufbau eines Aufnahme Rahmens zur Montage von Kameras, Belichtung und Hintergrund definiert. Neben der Variation der geometrischen Anordnung der verschiedenen Komponenten erfolgt die Analyse der Einflüsse von Kameraeinstellungen auf die Aufnahmequalität von Partikeln im Bildfeld. Weiters werden notwendige Hard- und Software-Applikationen zur Detektion und Auswertung in Echtzeit getestet.

2.1.1 Kameraeinstellungen und Belichtung

Das Zusammenspiel der grundlegenden Kameraeinstellungen wie Belichtungszeit, Blendeneinstellung und Bildverstärkung und der Möglichkeiten einer Beleuchtung im Auflicht, Gegenlicht etc. werden durch Versuchsaufnahmen betrachtet. Im Fokus steht die Erkennbarkeit von Partikeln ohne Verzerrungen und Überbelichtung mittels Global-Shutter-Flächenkameras.

2.1.2 Hardware und Software

Die Verwendung eines Einplatinencomputers ermöglicht die Analyse der Leistungsgrenzen der Hard- und Software und deren Einfluss auf die Bildrate (Frames per Second). Die minimale Bildrate wird dabei durch die Notwendigkeit der ganzen Abbildung eines Partikels vorgegeben. Folgende Punkte werden im Detail betrachtet:

- Verknüpfung verschiedener Encoder-Decoder-Kombinationen im Programmcode
- Einfluss der Bildauflösung
- Kameraanzahl und Datentransfer

Die Ableitungen der optimierten Kameraeinstellungen, Positionierung der Belichtung und Definition des Programmcodes bilden die Voraussetzungen für die Aufnahme von manuell vereinzelt Batterien.

2.2 Probenahme und Klassifikation

Um die Heterogenität der Batterietypen in einer Bilddatenbank abzubilden, wird eine quantitative Probenahme von Gerätebatterien durchgeführt. Die Beprobung der Altbatterien folgt hierbei nicht dem Ansatz der mengenmäßigen Darstellung der Grundgesamtheit, sondern versucht durch die ganzheitliche Abbildung der verschiedenen Batteriemerkmale die Repräsentativität zu gewährleisten. Merkmale wie Bautyp, Form, Farbe und Verwendung definieren die benötigte Anzahl an zu beprobenden Altbatterien.

Nach erfolgter Probenahme werden die Batterien in definierten Klassen eingeteilt. Die Einteilung der Batterien anhand verschiedenster Merkmale erfolgt am Beginn der Datenaufnahme in möglichst differenzierte Klassen, um eine spätere Änderung der Klasseneinteilung zu ermöglichen. Weiters kann im Verlauf des Trainingsprozesses von CNN der Einfluss der Klassenbildung auf das Ergebnis der Vorhersagegenauigkeit dieser Netzwerke untersucht werden.

2.3 Erstellung der Bilddaten

Als Vorbereitung auf eine Klassifikation mittels CNN wird eine Batterie-Bilddatenbank erstellt. Die händische Aufgabe der Batterien erfolgt auf ein horizontales Förderband mit gleichbleibender Bandgeschwindigkeit. Zur Vereinfachung der späteren Datenverarbeitung werden die Batterien vereinzelt aufgegeben und mittels definierten Setups (siehe 2.1) aufgenommen. Durch die mehrfache Ablichtung eines Partikels erfolgt bereits während der Aufnahme eine Steigerung der Bildanzahl durch Datenaugmentation. Neben den beprobten Altbatterien werden weitere Aufnahmen von gemischten Abfällen benötigt, um das korrekte Anlernen eines Neuralen Netzes zur Detektion von Batterien in diesen Strömen zu ermöglichen.

3 Ergebnisse und Diskussion

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt befindet sich das Projekt in der Umsetzung, weshalb an dieser Stelle noch keine fertigen Ergebnisse präsentiert werden können.

Die bisherigen Projektarbeiten zeigen jedoch vielversprechende Zwischenergebnisse, wobei das zugrundeliegende Konzept zur Anlagenintegration eine einfache und im Aufbereitungsprozess frühzeitig situierte Implementierung zulässt. Im Projektverlauf geplante Realversuche sollen die Labor- und Technikusergebnisse validieren und das Konzept zur Anlagenintegration überprüfen bzw. bestätigen.

Danksagung

Das Projekt *DeB-AT* wird durch die *Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)* und das *Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)* gefördert. Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle bei den Fördergebern.

Literatur/Quellen

- Europäische Kommission. (2020) Änderung unserer Produktions- und Verbrauchsmuster: neuer Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft ebnet Weg zu klimaneutraler und wettbewerbsfähiger Wirtschaft mit mündigen Verbrauchern [Pressemitteilung].
- Martens, H. & Goldmann, D. (2016). Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis (2. Auflage). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-02786-5>.
- Nigl T., Rübénbauer W., Pomberger R. (2020) Cause-Oriented Investigation of the Fire Incidents in Austrian Waste Management Systems. *Detritus* 9(March): 213–220. DOI:10.31025/2611-4135/2019.13872.

Nigl T., Pomberger R. (2018) Brandgefährlicher Abfall – Über Risiken und Strategien in der Abfallwirtschaft. Konferenzbeitrag. Recy & DepoTech 2018. 7.-9. November, Leoben, Österreich: Seiten 85–102. ISBN: 978-3-200-05874-3.

Kontakt

Elias Grath, B.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW)

Tel.-Nr. +43 3842 / 402-5139

E-Mail: elias.grath@unileoben.ac.at

Homepage: www.avaw-unileoben.at

Untersuchung und Optimierung der Methanbildungsrate an Methanisierungsreaktoren

Abstract: Der menschenbeeinflusste Klimawandel ist und bleibt die Herausforderung der nächsten Jahrzehnte. Um die gesteckten Klimaziele und eine gesicherte, klimaschonende Energieversorgung für eine stetig wachsende und hochtechnologische Gesellschaft und Wirtschaft zu erreichen, müssen wir die Energieerzeugung diversifizieren und Alternativen zur Verbrennung von fossilen Rohstoffen auf ein neues Level führen. Die Umwandlung von Abfall in Energie und damit die Möglichkeit, die vorhandene Infrastruktur nutzen können, stellt zumindest für die nächsten Jahrzehnte das erstrebenswerte Ziel dar. Doch wie soll das erreicht werden? Der biogene Sektor und die Biomethanisierung bieten Chancen, durch deren Ergründung und Ausschöpfung dieses Potentials ein entscheidender Beitrag zur grünen Energieerzeugung geleistet werden kann. Power to Methane, mit der Biomethanisierung als zentrale technologische Säule, ist die Schlüssellösung für die Flexibilisierung des Stromnetzes, da dadurch der Drosslung der Produktion erneuerbarer Energien entgegengewirkt werden kann.

Biomethanisierung ist die Umwandlung von Wasserstoff und Kohlendioxid mittels Mikroben, genauer chemolithoautotropher Archaeen, zu Methan. Dieses grüne Methan kann das fossile Erdgas in dem jeweiligen und auch bereits bestehenden Erdgasnetz ersetzen.

Die Prozesse der Biomethanisierung unterliegen sehr vielen Einflussfaktoren, die sich gegenseitig unterschiedlich stark beeinflussen und so die Prozesse sehr komplex werden lassen. Generell ist das Gebiet der Biomethanisierung, verglichen mit etablierten, fossilen Verbrennungstechnologien, ein noch relativ junges Forschungsgebiet. Daher wurden wichtige Fragen noch nicht ausreichend wissenschaftlich beleuchtet. Die angestrebte Dissertation möchte Problemstellungen erarbeiten und diese fundiert beantworten.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Rahmenbedingungen für einen stabilen, reproduzierbaren und sicheren Biomethanisierungsprozess zu präzisieren und den Betrieb zukünftiger Biomethanisierungsanlagen zu gewährleisten, um so einen weiteren und wichtigen Beitrag zur Biomasse-Nutzung und zur Klimaneutralität von morgen zu leisten.

Um das zu erreichen, wird gerade eine Technikumsanlage, die sogenannte „BioFARM“, auf dem Gelände der Kläranlage Straubing errichtet. An dieser „BioFARM“ wird unter realen Einflüssen geforscht und optimiert.

Hierzu werden unterschiedliche Mikroorganismen verwendet und Prozessparameter wie Temperatur, Druck, Gaszusammensetzung, das Verhältnis von H_2 zu CO_2 , der eingesetzte Klärschlamm als Wachstumsquelle für die Archaeen, dessen pH-Wert und die Rührwerksgeschwindigkeiten variiert, um das bestmögliche System für eine technische Anwendung auszuwählen. Durch die verschiedenen Klärschlämme soll untersucht werden, wie sich die Spurenelementzusammensetzung, z.B. auf die Wachstumsrate oder die Effektivität der Mikroorganismen, auswirken. Über eine Gasmischanlage können verschiedenste Gaszusammensetzungen für die Versuche verwendet werden. So kann nicht nur Klär- oder Biogas genutzt werden, sondern auch synthetisch hergestellte Gase. Durch diese weitere Applikationsmöglichkeit wird erneut aufgezeigt, welche Flexibilität und Innovationskraft von der Technikumsanlage und dem Forschungsvorhaben ausgehen.

Die verschiedenen Gaszusammensetzungen, aber auch das Substrat an sich werden Herausforderungen mit sich bringen. Es soll eine konstante, vergleichbare und sichere Methan-Bildung ermöglicht und die sehr große Palette an Einwirkfaktoren identifiziert werden, um dadurch Verfahrensstandards, Kenngrößen und -werte, wie auch Parameter festlegen zu können.

Im Zuge der Untersuchung gilt es folgende Forschungsfragen zu beantworten:

- Unter welchen Prozess- und Kultivierungsbedingungen wird die optimale Methanbildungsrate erzielt?
- Welche weiteren Einflussgrößen müssen analysiert und definiert werden, damit der Biomethanisierungsprozess stabil ist und die Effektivität sowie die Methanbildungsrate gesteigert werden kann?
- Welche Bedingungen müssen geschaffen werden, um Klärschlamm als Substrat uneingeschränkt verwenden zu können und somit einen zusätzlichen Weg zu vorgefertigten (Salz-) Lösungen zu kreieren?
- Wie lange halten die Spurenelemente aus dem Gärrest für die Kultivierung der Archaeen?
- Kann ein Anwender-Katalog erarbeitet werden?
- Welche weiteren Voraussetzungen müssen geschaffen werden, damit Biomethanisierung wirtschaftlich ist, weiter etabliert wird und genutzt werden kann?

Im Ergebnis soll aus der Untersuchung ersichtlich werden, welche Kenngrößen definiert werden müssen, wie diese im Zusammenhang zueinanderstehen und wie es möglich ist, die bestmögliche Methanbildungsrate zu generieren.

1 Einleitung

Die Bundesrepublik Deutschland war im Jahr 2021 weltweit für ca. 2% der Gesamt-Kohlenstoffdioxid-Emissionen verantwortlich [1]. Kohlendioxid (CO_2) ist in Deutschland, mit einem Gesamtanteil von über 89% aller Treibhausgase im Jahr 2022, das mit Abstand wichtigste Treibhausgas [2]. Weitere wichtige Treibhausgase sind unter anderem Methan (CH_4), Distickstoffmonoxid (N_2O , umgangssprachlich auch als Lachgas bekannt), Ozon (O_3) und Wasserdampf (H_2O). Mit knapp 83,3 Mio. Einwohnern hat Deutschland im Juli 2023 einen Anteil von 1,04% an der Weltbevölkerung [3]. Der durchschnittliche Pro-Kopf-THG-Ausstoß der deutschen Bevölkerung liegt bei 10,6 Tonnen [4]. Somit ist dieser Wert 1,6-mal höher als der weltweite Durchschnitt von 6,7 Tonnen [5]. Die deutsche Energiewirtschaft zählt mitunter zu den größten Erzeugern von CO_2 -Emissionen, ihr Anteil beträgt ungefähr ein Drittel [6], gefolgt von den Sektoren Industrie, Verkehr, Gebäudewirtschaft und der Landwirtschaft [7].

Der europäische Green Deal, durch den die 27 EU-Mitgliedstaaten bis zum Jahre 2050 klimaneutral werden wollen, gibt vor, dass die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber dem Stand aus dem Jahr 1990 sinken müssen [8]. Die deutsche Bundesregierung geht noch einen Schritt weiter. In Deutschland sollen die Emissionen im Jahr 2030 bereits um 65 % im Vergleich zu 1990 sinken, um dadurch die Treibhausneutralität bereits im Jahr 2045 erreichen zu können [9]. Die Erfüllung dieser Ziele bedürfte allerdings weitreichenderer Eingriffe als die gegenwärtigen Anstrengungen und gilt daher als zu ambitioniert [10].

Als weiteren Baustein gibt es seit Mai 2022 den sogenannten REPowerEU – Plan der Europäischen Kommission [11]. Dieser soll darauf hinwirken, Energie einzusparen, die Energieversorgung breiter aufzustellen, die Abhängigkeit von Russland zu reduzieren und die Investitionen in erneuerbare und nachhaltige Energiequellen zu beschleunigen.

Um die visierten Ziele und eine gesicherte, klimaschonende Energieversorgung für eine stetig wachsende und hochtechnologische Gesellschaft und Wirtschaft zu erreichen, bedarf es der Diversifizierung der Energieerzeugung und zum anderen müssen Alternativen zur Verfeuerung von fossilen Rohstoffen auf ein neues Level geführt werden. Neben der Solar- und Windenergie kann und muss dem biogenen Sektor, also damit auch der Abfallwirtschaft und der Verwertung von Abfallstoffen, eine Schlüsselrolle zugesprochen werden. Als ein Teilbereich dieses biogenen Sektors wird die biologische Methanisierung im Rahmen dieser Arbeit genauer analysiert. Sie kann zur Carbon Capture and Utilization (CCU, Kohlenstoffabscheidung und -verwertung) dienen und bietet eine große Leistungsfähigkeit. Hierfür werden ausgehend vom aktuellen Forschungsstand die Unterschiede zur katalytischen Methanisierung herausgearbeitet und die Potenziale der Biomethanisierung hervorgehoben. Durch die Biomethanisierung kann ein signifikanter grüner Beitrag für die oben genannten Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr, Gebäudewirtschaft und Landwirtschaft geleistet und die dringend notwendige Dekarbonisierung vorangetrieben werden. Profiteure dieser Schlüsseltechnologie können hier vor allem Stadtwerke und Betreiber von Gasnetzen sein, die das grüne Methan direkt in die bestehenden Gasnetze zu 100% einspeisen und klimaneutral verwerten können.

Ziel dieser Dissertation ist es, die Lücke zwischen Theorie und der Biomethanisierung auf industrieller Ebene zu überwinden und die Rahmenbedingungen weiter zu präzisieren, damit auf Dauer ein stabiler, reproduzierbarer, kostenoptimierter und sicherer Biomethanisierungsprozess gewährleistet werden kann.

Die grundlegende Technologie zur Produktion von grünem Methan, auch aus Synthesegas mit signifikanten CO-Anteilen, wurde bereits durch vorangegangene Projektvorhaben belegt. Damit wird ein weiterer und wichtiger Beitrag zur Biomassennutzung und zur Klimaneutralität von morgen geleistet.

Gerade entsteht eine Techniksmanlage, ein Research and Development Center, die sogenannte „BioFARM“, auf dem Gelände der Kläranlage Straubing. Die Inbetriebnahme ist in den letzten Zügen und seit Januar 2024 laufen die ersten Versuchskampagnen unter realen Einflüssen.

2 Methodik und Vorgehensweise

Die Promotion wird als Monographie erstellt, die sich in verschiedene Kapitel und mehrere Abschnitte einteilen lässt.

Zuerst werden im Rahmen der Literaturrecherche die theoretischen Grundlagen erläutert. Hier wird unter anderem der Unterschied zwischen der Biomethanisierung zur chemischen Methanisierung aufgezeigt.

Als Zweites wird die aktuelle Technik und der (nationale, wie auch internationale) Forschungsstand zu den verschiedenen Technologien zur Methanisierung betrachtet.

Nachfolgend wird die bald fertiggestellte und einsatzbereite Techniksmanlage näher beschrieben. Die hier aufgeführte Grafik (Abbildung 1) stellt eine sehr gute Zusammenfassung dar. Der gelbe Bereich enthält den eigentlichen Reaktor und die Messtechnik mit benötigter Peripherie. Dort findet die Methanisierung

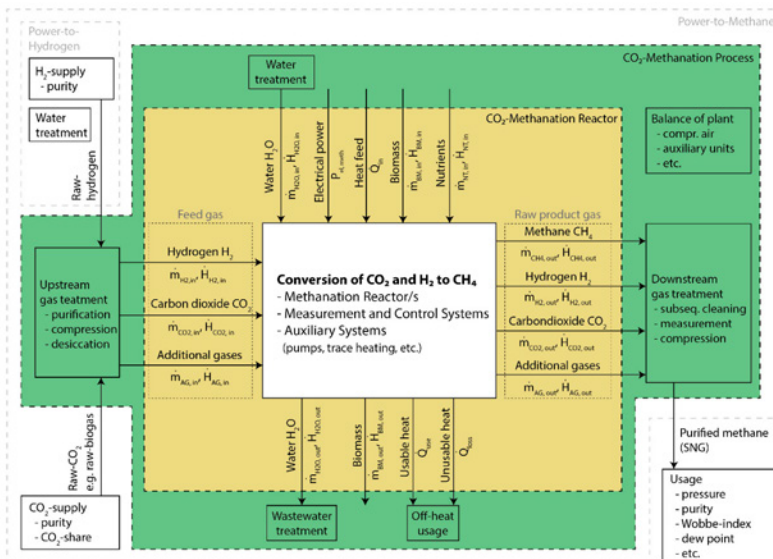


Abbildung 1: Boundaries and mass and energy streams of the systems CO₂-Methanation reactor (yellow), CO₂-Methanation process (green), Power-to-Hydrogen and Power-to-Methane [12].

statt. Auch ist ersichtlich, welche Substrate verwendet werden können. Der grüne Bereich beschreibt die Erweiterung des Systems. Hier ist die notwendige Vor- und Nachbehandlung des zugeführten Gases und des ausgeleiteten Produktgases aufgeführt. Zudem ist die Abführung von Kondensat und der Anfall von Abwasser zu sehen. Um den Wirkungsgrad des Gesamtsystems weiter zu erhöhen, wird auch die prozessbedingte Abwärme aufgezeigt.

In der Technikumsanlage soll das in Klär- oder Biogas enthaltene Kohlenstoffdioxid zusammen mit Wasserstoff, in einen vor Ort integrierten Elektrolyseur (Elektrolysereaktion $2 \text{H}_2\text{O} = 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$), mit Hilfe von geeigneten Mikroorganismen zu Methan verstoffwechselt werden. Dort kann auch Klärschlamm aus den beiden Faultürmen der angrenzenden Kläranlage zusammen mit dem dort produzierten Biogas in einen Bioreaktor eingeleitet werden. Der Klärschlamm würde dann als Spurenstoffquelle für die Mikroorganismen dienen. Zudem erfolgt die Zudosierung von Wasserstoff zum Biogas, bevor dieses in den Bioreaktor geleitet wird. Im Bioreaktor selbst befinden sich methanogene Archaeen, welche aus Wasserstoff und dem im Biogas enthaltenen Kohlenstoffdioxid Methan synthetisieren können. Die angestrebte Methanisierung erfolgt durch die Sabatier-Reaktion ($\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{Wärme}$). Wichtig ist hierbei eine gute Durchmischung der Gase in der Flüssigphase. Dies geschieht in einer Blasensäule unter konstanter Vermischung durch ein Rührwerk. Der Bioreaktor hat ein Flüssigkeitsvolumen von ca. 400 l, in der bis zu 8 Nm³/h Rohbiogas aufbereitet werden können. Die Archaeen wandeln in der wässrigen Phase CO_2 und H_2 in CH_4 und H_2O um. Das durch die Technikumsanlage gewonnene Gas wird zurück in das Kläranlagen-Gassystem gespeist. Bei einer großtechnischen Anwendung soll das Gas dann direkt in eine Erdgasleitung eingespeist werden können, um so fossiles Erdgas durch grünes, nachhaltiges Erdgas zu ersetzen. Dem Bioreaktor ist eine Gasnachbehandlungseinheit nachgeschaltet, welche das Produktgas nach dem Austritt aus dem Bioreaktor behandelt.

Das nächste Kapitel, auch als Versuchsabschnitt oder Forschungsdatenmanagement zu betiteln, wird sich den Versuchskampagnen widmen. Hier werden die Standard-Parameter festgelegt, damit die anschließenden Versuche durchgeführt und ausgewertet werden können und dadurch auch vergleichbar sind. Im Laufe dieser wissenschaftlichen Arbeit und den Versuchskampagnen werden enorm viele Daten, Informationen, Betriebszustände und Parameter erfasst werden. Um die möglichen, gegenseitigen Abhängigkeiten darzustellen und besser zu verstehen, soll das Design of Experience (DoE), also die statistische Versuchsplanung, zur Anwendung kommen. Zusätzlich wird ein Forschungsdatenmanagement notwendig sein, damit all die Mengen an Daten, die gesammelt, generiert und ausgewertet werden, strukturiert und nutzbar gemacht werden. Das Ziel der Datensammlung soll sein, dass auf Basis der gewonnenen Daten die Entwicklung von Anwender-Katalogen und / oder SOPs (Standard Operation Procedures – Standardvorgehensweisen) möglich sind. Für den Fall, dass bei den Versuchen und anschließenden Untersuchungen ggf. neue Abhängigkeiten entdeckt werden, kann dann mit der Akquise weiterer Förderungen begonnen werden.

Direkt im Anschluss wird die Technikumsanlage mit der aktuellen Technik und anderen Technologien verglichen. Es soll die Bewertung mit Marktbegleitern und der (thermo)chemischen Methanisierung erfolgen. Außerdem sollen etwaige, zu erwartende Optimierungsansätze aufgezeigt werden.

Des Weiteren werden die Einflussgrößen betrachtet, welche speziell auf die Methanbildungsrate einwirken.

Abschließend wird die obligatorische Diskussion geführt, die Schlussbetrachtung aufgezeigt, eine Zusammenfassung dargelegt, wie auch eine Bewertung durchgeführt und die Schlussfolgerungen gezogen. Auch wird ein weiterer Ausblick gegeben.

Danksagung

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich, meinem Supervisor, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Pettrak, der Werkleitung der Straubinger Entwässerung und Reinigung, Frau Cristina Pop, Herrn Gianfranco De Feo und der gesamten Firma MicroPyros BioEnerTec GmbH, dem INZIN Institut, hierbei namentlich bei Frau Dr. Ewa Harlacz und allen weiteren Kolleginnen, Kollegen und Wegbegleitern. Mein herzlichster Dank ergeht an meine Frau und unsere Tochter.

Literatur/Quellen

- [1] V. Pawlik, „CO₂-Ausstoß weltweit nach Ländern 2021“, Statista, 1. November 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/179260/umfrage/die-zehn-groessten-c02-emittenten-weltweit/> (zugegriffen 1. September 2023).
- [2] S. Wilke, „Treibhausgas-Emissionen in Deutschland“, Umweltbundesamt, 29. August 2013. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland> (zugegriffen 3. September 2023).
- [3] Autorschaft - 14 Autoren, „Liste von Staaten und Territorien nach Einwohnerzahl“, Wikipedia. 1. September 2023. Zugegriffen: 1. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Liste_von_Staaten_und_Territorien_nach_Einwohnerzahl&oldid=236941255#Liste
- [4] European Commission. Joint Research Centre., GHG emissions of all world: 2021 report. LU: Publications Office, 2021. Zugegriffen: 9. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/173513>
- [5] „Emissionen – Klimadashboard Deutschland“. <https://klimadashboard.de/emissionen> (zugegriffen 9. September 2023).
- [6] V. Pawlik, „Treibhausgasemissionen nach Sektoren in Deutschland 2022“, Statista, 1. August 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/312450/umfrage/treibhausgasemissionen-in-deutschland-nach-quellgruppe/> (zugegriffen 1. September 2023).
- [7] K. K. mdr.de, „Die Top 5 der CO₂-Verursacher Deutschlands | MDR.DE“, 22. Januar 2020. <https://www.mdr.de/wissen/deutschland-top-fuenf-klima-emissionen-100.html> (zugegriffen 3. September 2023).
- [8] Betreiber der Website: Generaldirektion Kommunikation, „Europäischer Grüner Deal“, 14. Juli 2021. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de (zugegriffen 3. September 2023).
- [9] © 2023 Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, „Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045 | Bundesregierung“, Die Bundesregierung informiert | Startseite, 7. November 2022. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (zugegriffen 3. September 2023).

- [10] „Stellungnahme zum Entwurf des Klimaschutzprogramms.pdf“. Zugegriffen: 10. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2023/09/ERK2023_Stellungnahme-zum-Entwurf-des-Klimaschutzprogramms-2023.pdf
- [11] Betreiber der Website: Generaldirektion Kommunikation, „REPowerEU“. Zugegriffen: 5. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_de
- [12] M. Thema u. a., „Biological CO₂-Methanation: An Approach to Standardization“, *Energies*, Bd. 12, Nr. 9, Art. Nr. 9, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12091670.

Kontakt

Christian Großhauser – Projektmanager und Doktorand

Technische Universität Dortmund / INZIN e.V. Institut für die Zukunft der Industriegesellschaft /

MicroPyros BioErtertec GmbH

Tel.-Nr. +49 174 2051164

E-Mail: christian.grosshauser@tu-dortmund.de

Homepage: <https://raumplanung.tu-dortmund.de/>; <https://www.inzin.de/>; <https://micropyros.de/de/>

Feasibility Study of Introducing Deposit-Return System of Polyethylene Terephthalate (PET) Bottles to Non-Food Applications

Abstract: *the dual system and the Deposit Return System (DRS) cover the current management of end-of-life plastic packaging in Germany. While the dual system manages the collection and mechanical recycling of plastic packaging, the DRS, particularly for Polyethylene Terephthalate (PET) bottles, allows for the return, cleaning, and reuse or recycling of these materials. This study examines the potential of expanding the DRS to include non-food applications, specifically in the home-care and body-care sectors. By simulating the lifecycle of bottles through multiple life cycles with various content types, this research evaluates the feasibility of such an extension and its implications for sustainability in plastic packaging management. Preliminary results demonstrate that the washing process maintains the Chemical Oxygen Demand (COD) below the standard for multi-use beverage bottles (15 mg/L) with a noted increase in the last cycle due to large standard deviations. Additionally, surface tension measurements of the rinse water indicate that the washing process delivers cleanliness comparable to new PET bottles (71-72 mN/m). This study underscores the efficiency of the laboratory-scale washing plant and highlights the necessity for further testing to a full simulation of the lifecycle of multi-use PET bottles (i.e. 10 life cycles), thereby providing a comprehensive assessment of the applicability of deposit-return bottles to broader product categories.*

1 Introduction

In Germany, the management of end-of-life plastic packaging is governed by two principal systems: the separate collection system (commonly referred to as the „dual system“) and the Deposit Return System (DRS) (Patel et al. 2000; Rhein and Sträter 2021). Within the dual system, plastic packaging is accumulated in yellow bins, subsequently sorted at Lightweight Packaging (LVP) sorting facilities, and then subjected to mechanical recycling. Conversely, in the DRS, plastic packaging, predominantly PET bottles, is returned to designated collection machines (Picuno et al. 2021b). Within the DRS, bottles are further distinguished as either single-use or multi-use. Single-use bottles undergo shredding and cleaning processes for mechanical recycling (Picuno et al. 2021a). Meanwhile, multi-use bottles are cleaned and refilled, with their refuse serving as input material for mechanical recycling. Energy recovery from plastic primarily targets packaging that is either erroneously discarded into residual waste or deemed non-recyclable during sorting and recycling processes. The overarching management of end-of-life plastic pack-

aging adheres to the waste hierarchy, with 99% of such packaging being reused, recycled, or recovered for energy (Schmidt and Laner 2023b).

Comparative analysis of different management strategies reveals that the DRS yields a superior quality of recycled products and demonstrates heightened efficiency in material utilization. The collection rate for overall Lightweight Packaging (LVP) is reported at 78%, with 63% of collected PET undergoing recycling. For multi-use DRS, the reuse rate soars to 96%, denoting a more efficient material utilization and a reduced environmental footprint (Picuno et al. 2021a; Schmidt and Laner 2021).

Presently, the DRS is predominantly implemented for beverage applications, accounting for 25% of total plastic packaging consumption. However, a mere 4% of total plastic packaging stems from the multi-use DRS system (Schmidt and Laner 2023a). To increase the adoption of the multi-use DRS system, it may be beneficial to extend its application to non-food sectors, where roughly 10% of materials are bottles and other forms of rigid packaging suitable for a DRS. This study aims to assess the feasibility of integrating the DRS into home and body care applications by simulating their multiple life cycles. Such an endeavor seeks to enhance the sustainability and efficiency of plastic packaging management.

2 Material and Methods

2.1 Life-Cycle Simulation

In this experiment, four different market-common body and home care products are alternated in different cycles. The bottles are filled with the content assigned to each life cycle. After the sample filling, seven days of aging at 48°C is carried out to simulate the storage and shelf life of the body and home care products.

Initially four different lifecycles tests are simulated to verify the feasibility, it is worth to mention that the multi-used PET bottles are expected to be capable of being reused for more life-cycles (i.e. 15 times reuse). 12 pieces of 1 L PET bottles are initially used. After each washing cycle, three bottles are removed for analysis, and the remaining bottles are refilled with a different content for further washing experiments.

2.2 Experiment Set-up

The washing steps involves pre-soaking, water jetting, alkalic soaking, alkalic jetting and post-cleaning. The exact process parameters cannot be detailed listed due to confidential protection reason. After each washing cycle, a thorough qualitative examination is conducted to assess any residual odor, surface scratches, and potential changes in shape or color of the washed bottles.

2.3 Analysis Methods

After each round of washing, three bottles are taken out by random sampling method. Deionized water equals 10% of the total bottle volume is filled into the sample bottles. After closure and shaking along the long axis of the bottle with deionized water, the water samples are used for examining the cleaning effect.

2.3.1 Chemical Oxygen Demand (COD)

To investigate the residue content after washing, the Chemical Oxygen Demand (COD) of the rinsing water was measured. The COD determination is performed with a cuvette rapid test with test kit LCI400 (HACH, Germany), which can measure the oxygen demand in the range of 0-100 mg/L. 2 mL of a water sample is added to a cuvette. It is then heated in a high-temperature thermostat (HT200S, HACH, Germany) at 140 °C for 2 hours and subsequently cooled to room temperature. The cuvette is placed in the spectral photometer (DR 3900 HACH), which determines the COD by measuring the extinction of the oxidizing agent.

2.3.2 Surface Tension

To investigate the residues of the content and washing additive from the bottle, a surface tension test is conducted using a Krüss BP 100 tensiometer. For the analysis of surface tension, the plate method is applied. Approximately 50 mL of water from the rinsing process of the bottle after washing is placed in the test dish.. Five measurement points are taken throughout the duration of the test. The average value of the five measurement points is automatically calculated.

3 Results and Discussion

The outcomes of the washing experiments are quantitatively presented in Figure 1. Analysis of Figure 1(a) reveals that during the first three washing cycles, the Chemical Oxygen Demand (COD) content remained below the stipulated test standard of 15 mg/L for multi-use beverage bottles. However, the fourth cycle exhibited an elevated COD value, which can be attributed to a significant standard deviation observed in the data. Concurrently, Figure 1(b) depicts the surface tension values of the rinse water. A markedly lower surface tension in comparison to the blank sample indicates residual content within the bottle post-washing. The data from all four samples indicate that the surface tension values are marginally higher than that of demineralized water and slightly lower than that of rinse water from a new Polyethylene Terephthalate (PET) bottle. This suggests that the washing process is effectively delivering bottles with a degree of cleanliness comparable to new PET bottles.

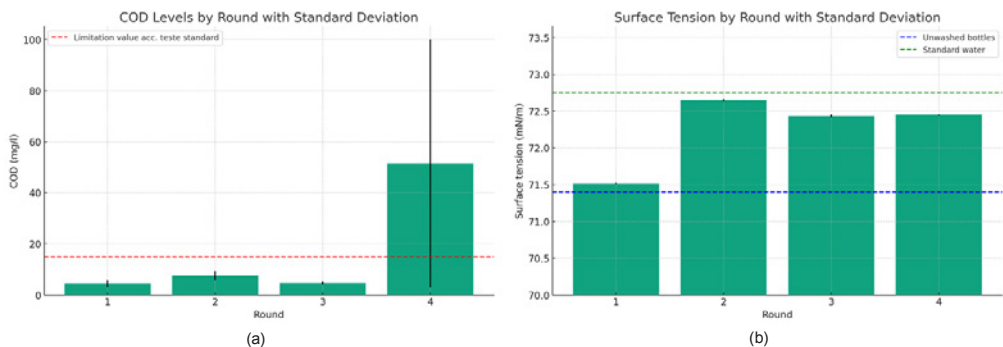


Figure 1 – (a) Chemical oxygen demand (COD), (b) Surface tension after each washing round

4 Conclusion

The results of the washing experiment were pivotal in assessing the viability of implementing a multi-use deposit return system beyond the food sector, encompassing home-care and personal body-care products. Furthermore, the findings corroborate the efficacy of the laboratory-scale washing plant, confirming its capacity to achieve adequate cleaning outcomes. Nonetheless, it is important to note that the experiment is currently in progress. The four completed cycles of testing do not fully represent the entire lifecycle of multi-use Polyethylene Terephthalate (PET) bottles. Consequently, further test with varied contents for (i.e. 10 cycles) is imperative to ensure a comprehensive evaluation.

Acknowledgement

The project is funded by the Hamburg Innovation and Development Bank as part of the Profi-Umwelt program.

References

- Patel, Martin; Thienen, Norbert von; Jochem, Eberhard; Worrell, Ernst (2000): Recycling of plastics in Germany. In *Resources, Conservation and Recycling* 29 (1-2), pp. 65–90. DOI: 10.1016/S0921-3449(99)00058-0.
- Picuno, Caterina; Alassali, Ayah; Chong, Zhi Kai; Kuchta, Kerstin (2021a): Flows of post-consumer plastic packaging in Germany: An MFA-aided case study. In *Resources, Conservation and Recycling* 169, p. 105515. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105515.
- Picuno, Caterina; van Eygen, Emile; Brouwer, Marieke T.; Kuchta, Kerstin; van Thoden Velzen, Eggo U. (2021b): Factors Shaping the Recycling Systems for Plastic Packaging Waste—A Comparison between Austria, Germany and The Netherlands. In *Sustainability* 13 (12), p. 6772. DOI: 10.3390/su13126772.
- Rhein, Sebastian; Sträter, Katharina Friederike (2021): Intended and unintended effects of statutory deposit return schemes for single-use plastic bottles: Lessons learned from the German experience. In *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 30 (4), pp. 250–256. DOI: 10.14512/gaia.30.4.8.
- Schmidt, Sarah; Laner, David (2021): The multidimensional effects of single-use and packaging plastic strategies on German household waste management. In *Waste management (New York, N.Y.)* 131, pp. 187–200. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.06.003.
- Schmidt, Sarah; Laner, David (2023a): Materialeffizienz und Umweltauswirkungen der Kunststoffverpackungsabfallwirtschaft in Deutschland. Status quo und Optimierungspotenziale. In *Müll und Abfall* 12. Available online at <https://www.muellundabfall.de/>.
- Schmidt, Sarah; Laner, David (2023b): The environmental performance of plastic packaging waste management in Germany: Current and future key factors. In *J of Industrial Ecology* 27 (6), pp. 1447–1460. DOI: 10.1111/jiec.13411.

Contact

M.Sc. Jinyang Guo, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Universität / Institution: Technische Universität Hamburg, Circular Resource Engineering and Management (CREM)

Tel.-Nr. +49 040 42878 3108

E-Mail: jy.guo@tuhh.de

Homepage: <https://www.tuhh.de/crem/willkommen>

FFG Innovationscamp Kreislaufmanager*in im Bauwesen

Abstract: Der kontinuierliche Anstieg des Baubedarfs verursacht einen problematischen Ressourcenverbrauch und zunehmende Umweltbelastungen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, soll das Konzept der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen umgesetzt werden.

Um Akteure in der Baubranche auf diesen Wechsel vorzubereiten, bedarf es zum einen dahingehender Bildung der Bauexperten und Vernetzung besagter Personen. So kann ein schnellstmöglicher Übergang in Richtung einer Ressourcenschonenden, Emissionsoptimierten Baubranche stattfinden. Um diesen Wechsel voranzutreiben, veranstaltet die Universität Innsbruck das „FFG Innovationscamp KreislaufmanagerIn im Bauwesen“.

Dieser, von der Forschungsförderungsgesellschaft geförderte Ausbildungskurs, gibt Teilnehmenden von 44 österreichischen Bauunternehmen die Gelegenheit, sich sowohl mit dem Stand der Wissenschaft in Sachen Nachhaltigem Bauen vertraut zu machen, als auch die treibenden Unternehmen der innovativen Baubranche in Österreich kennenzulernen. So sollen Kenntnisse für die Identifikation möglicher Optimierungen, für die Rückgewinnung und Wiederverwendung von Baumaterialien sowie für nachhaltige Designansätze vermittelt werden.

Im Rahmen des zweijährigen Ausbildungskurses „FFG Innovationscamp KreislaufmanagerIn im Bauwesen“ können Teilnehmende an 24 Seminartagen teilnehmen, um Expertise in ihren eigenen Feldern auszubauen oder um sich mit neuen Themengebieten vertraut zu machen.

Aufgrund des hohen Bedarfs an Nachhaltigkeitsbildung der Akteure in der Baubranche sollen die Kurse nach dieser ersten Abhaltung von einem privaten Unternehmen weitergeführt werden.

1 Einleitung

Abfälle aus dem Baubereich stellen den größten Abfallstrom in Österreich dar. Im Rahmen einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Entwicklung müssen diese Abfallmengen reduziert und die Verwertungsquote gesteigert werden. Denn die Kreislaufwirtschaft führt nicht nur zu einer deutlichen Entlastung der Umwelt, sie hat auch klare wirtschaftliche Vorteile. In dem Maß, in dem es den Bauunternehmen gelingt, wertvolle Rohstoffe im Kreislauf zu halten, sinkt die Abhängigkeit von teuren Rohstoffimporten. Um Kreisläufe zu schließen, bedarf es spezifisches Know-how. Deshalb wird eine Informationsvermittlung zur Kreislaufwirtschaft Bau in Aus- und Weiterbildung dringend benötigt. Die Zielsetzung dieses Innovationscamps ist es, 77 Mitarbeiter*innen von 25 KMUs und 19 GUs der Baubranche (Bauingenieurbüros, Bauunternehmen, Dämmhersteller, Betonhersteller, Beratungsbüros, Holzbauunternehmen, Architekten, Bauauftraggeber (Wiener Linien, Innsbrucker Immobilien)) forschungsorientiertes Wissen, Fallstudien und konkrete Handlungsempfehlungen für eine kreislauforientierte Zukunft zu vermitteln.

Neben dem direkten Einfluss des gewonnenen Wissens auf die Umsetzung im eigenen Unternehmen fördert „Kreislaufmanager*in im Bauwesen“ den Erfahrungsaustausch und die Kooperation aller beteiligten Partner und kann infolgedessen zu weiteren nachhaltigen Netzwerken führen. Der Nutzen für die wissenschaftlichen Partner liegt auf der Wissensvermittlung von aktuellen und relevanten Themen im Bereich Kreislaufwirtschaft im Bauwesen und der Sensibilisierung für die Themen von der Forschung in die Praxis. Die Unternehmen sehen den Aufbau von Kreislaufmanagement-Know-how als Schlüssel für eine erfolgreiche, nachhaltige Transformation und legen daher hohen Wert auf eine entsprechende Qualifizierung ihrer Mitarbeiter*innen. Sie verbessern durch die Teilnahme ihre Beratungskompetenz, um noch besser die Wünsche ihrer Kund*innen nach nachhaltigen Bauten umsetzen zu können. Sie erhöhen ihr Wissen in Bezug auf nachhaltige Gebäude-Zertifizierungen und können das Know-how direkt auf ihre Produkte und Prozesse umlegen.

2 Methodik

2.1 Durchführung Schulungsmaßnahmen

Die Qualifizierungsmaßnahme gliedert sich in ein verpflichtendes Basismodul B und drei darauf aufbauende Vertiefungsmodul V1 – V3, in denen die Teilnehmer*innen die Möglichkeit haben, entsprechend ihrer Interessen und Tätigkeitsschwerpunkte ausgewählte Bereiche zu vertiefen. Mindestens drei Kurse aus den Vertiefungsmodulen müssen besucht werden. Maximal können 20 Kurse gewählt werden.

Das Basismodul B „Kreislaufwirtschaft im Bauwesen“ versetzt die Teilnehmer*innen in die Lage, Kreislaufwirtschaft in ihrem gesamten Kontext zu verstehen. In insgesamt fünf Schultagungen werden in sechs halb- bis ganztägigen Kurseinheiten (B1 – B6) die wichtigsten Grundlagen einer kreislauforientierten Bauwirtschaft vermittelt. Neben Social Urban Mining werden erste Einblicke in Bewertungssysteme gegeben, Maßnahmen zur Klimaresilienz von Gebäuden werden vorgestellt und erste Digitalisierungspotentiale erläutert. Außerdem im Basismodul enthalten ist die zweistündige Schultungseinheit „Ganzheitliche Strategie: Chancengleichheit“, um genderspezifische Aspekte, die gerade im Baubereich sehr relevant sind, zu thematisieren. Im Vertiefungsmodul V1 „Kreislauffähiges und ressourcenschonendes Bauen“ beschäftigen sich die Teilnehmer*innen intensiv mit wirtschaftlichen und umweltspezifischen Aspekten des Bauens. In insgesamt vier Schultagungen werden in vier ganztägigen Kurseinheiten (V1.1 – V1.4) Geschäftsmodelle dargestellt (Lebenszykluskosten von Immobilien, Kreislaufprozesse im Unternehmen) und auch alternative Bauwerke diskutiert. Die Versiegelung von Boden und alternative Grünraumkonzepte werden ebenso betrachtet.

Das Vertiefungsmodul V2 „Bewertung von Kreislauffähigkeit und digitale Möglichkeiten“ versetzt die Teilnehmer*innen in die Lage, verschiedene Bewertungskriterien für Gebäude und Baustoffe zu verstehen. In insgesamt fünf Schultagungen werden in fünf ganztägigen Kurseinheiten (V2.1 – V2.5) Ökobilanzen und CO₂-Fußabdrücke von Gebäuden anhand neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse diskutiert. Die Digitalisierung als Basis zur Darstellung von Wertschöpfungskreisläufen wird anhand von Fallbeispielen dargestellt. Die digitale Erfassung verbauter Materialien und Produkte steht einen Tag im Mittelpunkt.

Im Vertiefungsmodul 3 „Betrachtung ausgewählter Stoffströme (Beton/Stahl, Ziegel/Lehm, Photovoltaik, Holz, Dämmmaterialien)“ beschäftigen sich die Teilnehmer*innen intensiv mit ausgewählten Stoffströmen

über ihren Lebensweg. In insgesamt zehn Schulungstagen werden in fünf jeweils zweitägigen Kurseinheiten (V3.1 – V3.5) die Herstellungsprozesse, die Betriebsphase und die aktuellen Verwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten samt ihren Umweltauswirkungen dargestellt. Außerdem werden gemeinsam Handlungsstrategien und Optimierungsmöglichkeiten erarbeitet.

Das Hauptziel ist die Vermittlung von forschungsorientiertem Wissen an Mitarbeiter*innen der Baubranche und die Förderung des Wissenstransfers und der Kooperation zwischen Wissenschaft und Bauwirtschaft.

Kontakt

MSc, Julius Hecher, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Umwelttechnik

Tel.-Nr. +43 512 50762170

E-Mail: julius.hecher@uibk.ac.at

Homepage: https://www.uibk.ac.at/umwelttechnik/research/projects_waste/ffginno.html

Fertilization Potential of Recovered Sulfur in Loaded Filter Material from Biogas Purification Process

Abstract: Sulfur deficiency affects a large area of sandy soils in Central Vietnam, exacerbated by intense summer rainfall and low organic matter. On the other hand, the high concentration of hydrogen sulfide gas (H_2S) in small-scale biogas plants poses health risks and is not effectively removed from the biogas before using for household cooking. This study explores using recovered sulfur from biogas purification process to use as a fertilizer for cabbage growth, providing an eco-friendly solution to sulfur deficiency and addressing H_2S problems in biogas plants. The filter material FerroSorp® S (FS) after being fully loaded with H_2S from biogas purification was used in this study. A pot experiment with three soil mixtures (mineral fertilizer, compost, and cow manure) and four sulfur fertilizer treatments ($CaSO_4$ and three FS doses) revealed no growth difference, but a correlation between sulfur concentration and FS doses. Up to 70% of sulfur from loaded FS transferred to plants, showing its comparable fertilizing effect to $CaSO_4$. Loaded FS met Pak Choi's sulfur requirement at a 4.4g dose. Adsorption of elemental sulfur on the filter material surface occurred, requiring oxidation to sulfate for plant availability. FerroSorp® S offers time-efficient sulfur fertilization in Vietnam's intense rainfall conditions, but further research is needed to explore oxidation factors and assess economic feasibility.

1 Introduction

Sulfur deficiency in agricultural soils presents a significant challenge for crop production worldwide. In Central Vietnam, where sandy soils with low organic matter content are prevalent, this issue is particularly pressing due to the country's heavy summer rainfall and the resulting leaching of essential nutrients (Hoang et al., 2021). Sulfur plays a vital role in plant growth, and its scarcity can severely limit crop yields and nutritional quality. In parallel, Vietnam has more than 500000 small-scale biogas plants primarily used for daily household cooking (Pirelli et al., 2018), and the high concentration of H_2S in biogas pose health risks for biogas users and accelerates the corrosion of biogas appliances (Technische Universität Berlin, 2018). This dual challenge of sulfur deficiency in soils and high H_2S level in biogas calls for innovative solutions that can enhance agricultural sustainability while mitigating health risks.

This study aims to address these interconnected issues by exploring the potential of recovered sulfur from biogas purification as a fertilizer for cabbage cultivation crops. To achieve this, we investigated the fertilization potential of loaded FerroSorp® (FS) – an H_2S filter material in biogas purification process by

evaluating the impact of FS-derived sulfur fertilizers on cabbage growth in sandy soils. Our objectives in this study are as follows: 1. Evaluate the impact of FS-derived sulfur fertilizers on biomass yield and 2. Determine the optimal dosage of FS for cabbage cultivation.

2 Material and Method

2.1 Fertilizer mixtures

FerroSorp® S (FS) (HeGo Biotech GmbH) is a filter material primarily composed of iron hydroxide, applied in gas treatment processes for desulfurization. The notable capacity of FS to absorb sulfur indicates its potential suitability for plant sulfur fertilization. In this study, (FS) was collected from a biogas plant in Brandenburg and ground into powder form for mixing with various substrates. Three fertilizer mixtures were developed using FS: one with mineral fertilizer (MS), another with compost (CP), and a third with cow manure (CM). Sulfur levels in 3 mixtures were adjusted with four different FS dosages: FS0 (0.9g CaSO₄), FS2 (2.1g FS), FS4 (4.2g FS), and FS12 (12.6g FS). A fixed ratio of 1500 mg of N per plant was established for all mixtures. The sulfur requirement for Pak Choi plants was assumed to be 250-400 mg per plant over the 5-week experimental period.

2.2 Experimental set up and analysis

To investigate the potential of biogas residues as a sulfur fertilizer, a pot experiment in an opened green house was conducted at the Leibniz Institute for Vegetable and Ornamental Crops (IGZ) e.V. in Großbeeren, Germany. The experiment comprised 12 different fertilization variants (3 fertilizer mixtures and 4 FS dosages) replicated five times setup in a completely randomized design. For the test, Pak Choi (Japanese Mustard Greens, *Brassica rapa* L. ssp. *chinensis* cv. Joi Choi, Kiepenkerl, Bruno Nebelung GmbH) was chosen as the test plant. The seedlings germinated in potting soil until they reached the three-leaf stage (23 days, April 29 – May 21, 2021). Subsequently, the plants (with an average weight of approximately 45 g) were transplanted into the experimental substrates using 1 plant per one 4L-pot and nurtured until the harvest on June 29, 2021 (40 days after transplantation or 62 days after sowing). Planted pots were regularly watered with distilled water.

After harvesting, the plants were measured for their fresh weight, and subsequently, the shoots and roots were separated. These components were then chopped and placed in an oven at 60°C for a duration of three days to determine the dry matter. Upon obtaining the dry matter weight measurements, the dried material was further processed by grinding for the subsequent analysis of total sulfur and sulfate content.

The statistical significance of differences between treatments were determined by Tukey HSD test for multiple comparisons after analysis of variance (ANOVA), using JASP. All tests including correlation were performed at a significance level of $P < 0.01$.

3 Results and Discussion

3.1 Dry matter yield

The shoot dry matter yield was significantly different ($p < 0.001$) between the three mixtures, but no difference was observed between the 4 dosages of FS within each mixture. The average shoot dry masses were considerably higher in MF mixture at 53.48 g (± 2.85 g) compared to CP mixture (24.70 g ± 1.76 g) and CW mixture (14.81 g ± 5.30 g) (Figure 1).

3.2 Sulfur fertilization effect

Table 1 presents the analysis results of shoot sulfur concentrations for the variants of the three mixtures. While the sulfur concentrations in all variants of MF and CP were ranging between 0.25% and 1.00%, the values for CM were notably higher. In MF, the sulfur concentration differed across all variants ($p < 0.001$), with the highest concentration observed in FS12. In CP, the sulfur concentration for the FS0, FS2, and FS4 variants was not significantly different, but it was higher in FS12 compared to FS0 ($p < 0.001$) and FS2 or FS4 ($p < 0.05$). In CM, the sulfur concentration in the FS4 and FS12 variants was higher than in FS0 ($p < 0.05$), while the variants with FS did not differ from each other. This demonstrates a correlation between sulfur concentrations in the shoots and the increase in FS concentration in the substrate. Additionally, the sulfur concentration in the shoots was higher when using the higher FS dosage compared to plants fertilized with CaSO_4 . It showed that FS can be effectively utilized as a sulfur fertilizer.

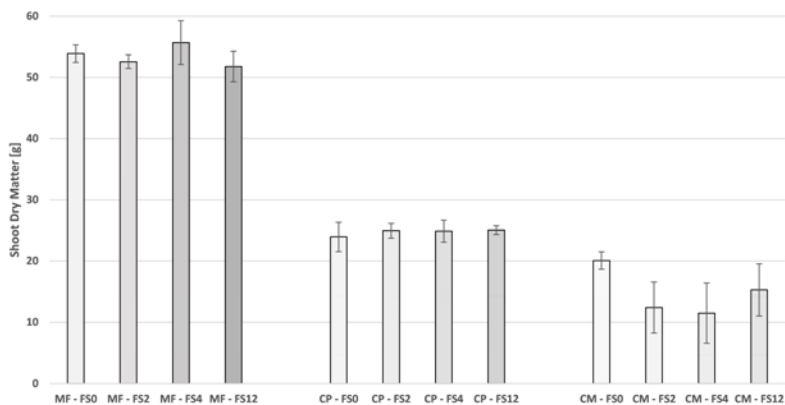


Figure 1. Biomass yield of the Pak Choi shoots [g dry matter] (with standard deviation, $n=5$) for the 12 variants in the pot experiment. MF: mixture of FerroSorp® (FS) with mineral fertilizer, CP: FS with compost, CM: FS with cow manure. FS0: sulfur fertilization with 0.9 g calcium sulfate dihydrate. FS2, 4, and 12: sulfur fertilization with 2.1 g, 4.2 g, and 12.66g FS

Table 1. Sulfur concentration in Pak Choi shoots [% S] (with standard deviation, n=5) for the 12 variants in the pot experiment. MF: mixture of FerroSorp® (FS) with mineral fertilizer, CP: FS with compost, CM: FS with cow manure. FS0: sulfur fertilization with 0.9 g calcium sulfate dihydrate. FS2, 4, and 12: sulfur fertilization with 2.1 g, 4.2 g, and 12.66g FS

	MF [% S]	CP [% S]	CM [% S]
FS0	0,38 ± 0,02	0,58 ± 0,06	1,12 ± 0,09
FS2	0,57 ± 0,04	0,62 ± 0,07	1,32 ± 0,13
FS4	0,75 ± 0,06	0,67 ± 0,06	1,42 ± 0,22
FS12	0,93 ± 0,04	0,78 ± 0,05	1,43 ± 0,11

The total sulfur content of the initial substrates differed between the mixtures and was approximately 2.1 times higher for CP and about 1.3 times higher for CM compared to MF. Compared to CaSO_4 , the sulfur input with FS dosages was higher, approximately 1.6, 3.3 and 9.8 times higher for FS2, FS4 and FS12 respectively. There was an increase in sulfur content in the plants of MF between the concentration levels FS2 and FS4 and compared to FS0, while the significantly higher sulfur supply at FS12 did not cause a corresponding increase in the plants. This pattern was also observed in CP variants, with the influence of FS being significantly lower.

The fact that the sulfur content of the plants could be increased by increasing the sulfur supply in the variants with FS confirms, on one hand, the usability of the sulfur contained in it. On the other hand, it also suggests that the chosen CaSO_4 dosage, especially in the FS0 variant of CP, may have been too low to fully meet the nutrient requirements of the plants. In contrast, the relatively small change in sulfur content of the plants with the increase in sulfur supply through FS suggests that a saturation of the sulfur demand in this experiment was achieved with a dosage of FS between FS4 (4.2 g FS) and FS12 (12.6 g FS) for CP mixture.

4 Conclusion

This study demonstrated the potential of loaded FerroSorp® S – a by-product of biogas desulfurization process as an effective sulfur fertilizer. Between the three mixtures of FS with co-substrates, the mineral fertilizer outperformed the two organic alternatives in terms of biomass yield. Although sulfur concentration did not directly impact plant growth, a clear correlation between shoot sulfur concentration and FS dosage was observed. The loaded FS mixtures matched the fertilization efficacy of sulfate minerals, with FS4 dosage (4.2g FS) meeting sulfur requirements of Pak Choi plants. FS offers a promise for improving agricultural productivity in sulfur-deficient, rainfall-prone regions, while also addressing biogas desulfurization. Since elemental sulfur absorbed to the FS material necessitated oxidation to sulfate for plant uptake, further research is recommended to control sulfur release of FS-derived fertilizers in the soil through particle size.

Acknowledgements

This study was conducted under the framework of PICO project. We thank the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action for funding the PICO project.

References

- Hoang, T. T. H., Do, D. T., Nguyen, H. N., van Nguyen, B., Mann, S., & Bell, R. W. (2021). Sulfur management strategies to improve partial sulfur balance with irrigated peanut production on deep sands. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(11), 1465–1478. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1798412>
- Pirelli, T., Rossi, A., & Miller, C. (2018). Sustainability of biogas and cassava-based ethanol value chains in Viet Nam: Results and recommendations from the implementation of the Global Bioenergy Partnership indicators. Environment and natural resources management working paper: Vol. 69. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Technische Universität Berlin. (2018). Abschlussbericht: UKAVita Projekt: Umwelt- und klimaschonende Anpassung von Biogasanlagen in Vietnam.

Contact

Trang Hoang

Prof. Dr. Ing. Vera Susanne Rotter

Fachgebiet Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie, Technische Universität Berlin

Tel.-Nr. +49(0)30 314 28512

E-Mail: t.hoang@tu-berlin.de, vera.rotter@tu-berlin.de

Homepage: <https://www.tu.berlin/circulareconomy>

Bioabbaubar gleich kompostierbar? – Wie die initial notwendige abiotische Hydrolyse den Abbau von PLA in der Kompostierung und der Natur beeinflusst

Abstract: Auf der Suche nach einer nachhaltigen Kunststoffalternative wird an Bio-Kunststoffen geforscht, die entweder alle oder nur einige der folgenden Eigenschaften aufweisen: biobasiert, bioabbaubar und/oder kompostierbar. Für die Nachhaltigkeitsbewertung und das Stoffstrommanagement ist es notwendig, dass die chemischen Prozesse, die zum Abbau der Kunststoffe führen, vollständig verstanden werden. Anhand von Polymilchsäure (PLA) lässt sich nachvollziehen, wie insbesondere Aussagen zur Bioabbaubarkeit und Kompostierbarkeit unterschiedliche Schlussfolgerungen zulassen. Obwohl in der Literatur ein enzymatisch/mikrobieller Abbau von PLA beschrieben wird, wird PLA im Boden und Meer nur langsam abgebaut. Die häufig dem biologischen Abbau gleichgesetzte Eigenschaft der Kompostierbarkeit hingegen scheint auf eine abiotische Hydrolyse zurückzuführen zu sein, welche oberhalb der Glasübergangstemperatur die amorphen Bestandteile zersetzt und anschließend auto-katalytisch den weiteren Abbau beschleunigt. Bei der Herstellung von neuen Produkten, wie Holz-Kunststoff-Verbunden, müssen somit End-of-Life Szenarien genau überdacht werden.

1 Einleitung

Plastikverschmutzung in der Umwelt, deren Auswirkung auf das Ökosystem sowie die Begrenztheit von fossilen Ressourcen haben die Entwicklung von Bio-Kunststoffen vorangetrieben. Der Begriff „Bio-Kunststoff“ beschreibt jedoch drei unterschiedliche Eigenschaften, welche alle an verschiedenen Stellen im Lebenszyklus auf ihre Umweltfreundlichkeit geprüft werden müssen und sich auf die Stoffstromführung auswirken. Im Rahmen dessen muss auch diskutiert werden, ob Bio-Kunststoffe wirklich eine Lösung für die eingangs angesprochenen Probleme bieten.

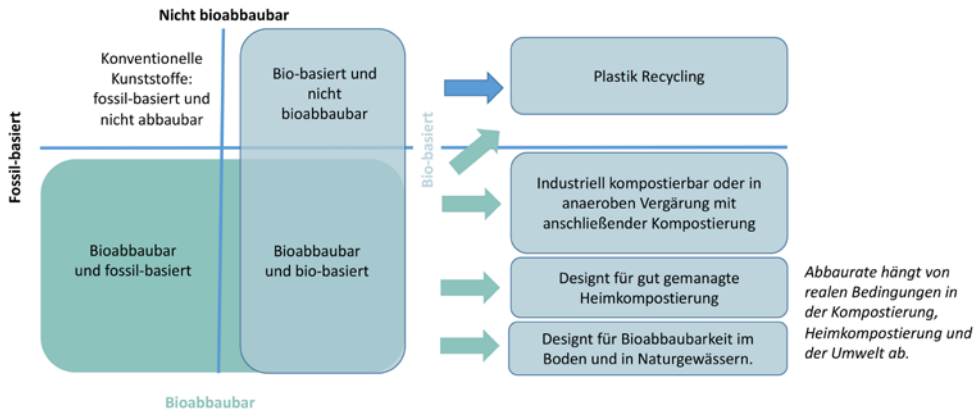


Abbildung 1: Bio-basierte, bio-abbaubare und kompostierbare Kunststoffe (nachgestellt und übersetzt von ETC/WMGE & EEA 2020).

Nach dem European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy der Europäischen Umweltagentur ist zwischen bio-basierten, bio-abbaubaren und kompostierbaren Kunststoffen zu unterscheiden (ETC/WMGE & EEA, 2023). In Abb. 1 ist die dazu veröffentlichte Graphik der EEA zu sehen. Hierbei ist besonders die Einordnung rechts unten bezüglich der Kompostierbarkeit und Bioabbaubarkeit von Interesse. Es wird unterteilt in industriell-kompostierbar, heim-kompostierbar und bioabbaubar in Boden und Frischwasser. Für Anaerobe Behandlung wird eine nachgeschaltete Kompostierung als Bedingung gesetzt. Auch wenn es im Alltagssprachgebrauch vorerst nicht auffällt, so handelt es sich hierbei um eine bewusste Wortwahl. Am Beispiel von dem biobasierten Kunststoff Polymilchsäure (PLA, engl. Poly lactic acid) lässt sich die Notwendigkeit der Differenzierung für die Stoffstromführung erklären.

2 Fallbeispiel Polymilchsäure (PLA)

Da PLA entweder als bioabbaubar oder kompostierbar vermarktet wird (siehe greenbox, 2024, Pack-Verde, 2024, Rausch, 2024, UBA, 2023), liegt die Annahme nahe, dass es durch mikrobielle Aktivität abgebaut wird. Untersuchungen zum Abbau von PLA zeigen jedoch, dass für einen schnellen Abbau zuerst eine (abiotische) Hydrolyse die Kettenlänge von PLA verringern muss (Auras et al. 2004; Gorrasi & Pantani 2017, Teixeira et al. 2021). Bevor im Folgenden der Abbauprozess und dessen Einflussfaktoren beschrieben werden, müssen zuerst einige Grundinformationen über PLA gegeben werden.

2.1 Grundlegende Informationen über PLA

Aufgrund seines chiralen Zentrums besitzt PLA zwei Enantiomere: D- und L-Milchsäure bzw. PDLA und PLLA. Auch eine Mischung der beiden Formen im Polymer bis hin zu einer racemischen Mischung (PDLLA) ist möglich (Auras et al. 2004; Masutani & Kimura 2018).

Der Ausgangsmonomer Milchsäure kann auf zwei Wege gewonnen werden: 1. Chemisch synthetisiert aus Petro-Chemikalien; 2. Mikrobielle Fermentation von Biomasse (z. B. Mais). Bei Letzteren entsteht fast homopolymeres PLLA oder PDLA, welches aufgrund seiner gleichen Ausrichtung iso-taktisch ist und einen hohen Kristallisationsgrad/eine hohe Dichte vorweist. Durch die Einbindung des jeweils anderen Enantiomers entstehen ataktische Bereiche, welche amorph sind. (Auras et al. 2004; Masutani & Kimura 2018).

PLA kann durch das Polymerisieren von Milchsäuremonomeren oder eine Ringöffnungspolymerisation (ROP) mit Lactat als Zwischenprodukt hergestellt werden. Bei Letzteren entsteht PLA mit hohem Molekulargewicht (M_w). Aufgrund der längeren Ketten wirken starke Van-der-Waals-Kräfte weswegen der Polymer hydrophob ist (Hartmann 1998; Masutani & Kimura 2017; Tan et al., 2018, Byers et al., 2018).

2.2 Abbauprozess von PLA

Da es für den mikrobiellen Abbau notwendig ist, dass die Substanz in gelöster Form über die Zellmembran aufgenommen wird, sind sowohl große wie auch hydrophobe Stoffe schlecht abbaubar für Mikroorganismen. Hochmolekulare Verbindungen müssen daher vorher durch die Abgabe von extra zellulären Enzyme hydrolysiert werden (Stadtmüller, 2004, Sargan, 2020).

Wie in 2.1 beschrieben ist PLA hochmolekular und hydrophob und somit ohne vorangehende Hydrolyse nicht mikrobiell abbaubar. Enzymatisch ist PLA u. a. durch Lipase, Esterase und alkane Protease hydrolysierbar. Jedoch zeigen Abbauuntersuchungen im Boden und Naturgewässern einen langsamen (1,5 Jahre) bis nicht vorhandenen Abbau. Das weist darauf hin, dass die enzymatische Hydrolyse und damit der mikrobielle Abbau nur gehindert stattfindet (Karamanlioglu et al., 2017, Löw et al. 2021, Ohkita, T. Lee, S.-H., 2006, Reeve et al., 1994, Teixeira et al., 2021, Tsuji & Suzuyoshi, 2002a, 2002b, Zaaba & Jaafar, 2020).

Deutlich schnellere Abbauraten werden im Rahmen von Kompostierungsexperimenten erreicht (2-6 Monate). Zusätzlich zu enzymatischen und mikrobiellen Abbauprozessen wird PLA hier durch eine abiotische Hydrolyse der amorphen Stellen im Bereich der Glasübergangstemperatur abgebaut. Dies äußert sich in einem Anstieg des Kristallisationsgrades (da der amorphe Anteil abgebaut wird), einer Änderung des Molekulargewichtes sowie eines Anstieges der Carboxyl- und Hydroxyl-Gruppen (Kale et al., 2007, Karamanlioglu et al., 2017, Teixeira et al., 2021; Löw et al., 2021). Letzteres fördert den Abbau der kristallisierten Abschnitte, wodurch dieser auto-katalytisch abläuft. Bei ca. einem $M_w > 140.000$ g/mol wird der Effekt durch Hydroxyl-Gruppen vernachlässigbar im Verhältnis der wiederholenden Ester zu den Kettenenden (Abe et al, 2004). Bei der Kompostierung kommt es somit zu einer schnelleren Bulk Erosion von innen nach außen, statt nur einer reinen Oberflächenerosion der äußersten Schicht, wie sie enzymatisch stattfindet (Göpferich, 1996, Reeve et al., 1994).

Es wurde zudem beobachtet, dass bei alkalischem pH-Wert des umliegenden Mediums die Hydrolyse schneller abläuft (de Jong et al., 2001, Jung et al., 2006, Ghorpade et al., 2001, Gorassi & Pantani, 2017). De Jong et al. (2001) stellt hierzu die Hypothese auf, dass im alkalischen Medium Lactat und Nicht-Milchsäure abgespalten wird, was den Abbau beschleunigt.¹

¹ Die Beobachtungen wurde anhand von Oligomeren mit 7 Monomereinheiten gemacht.

2.3 PLA im BioRePly-Projekt

Im BioRePly-Projekt wird untersucht, ob Polyethylen (PE) durch PLA in Holz-Plastik-Verbunden (WPC, engl. Wood Plastic Composites) ersetzt werden kann und wie sich dies auf die Nachhaltigkeit des Produktes auswirkt. Neben bekannten Lebenszyklus-Überlegungen bezüglich des Herstellungsmethodenvergleichs von fossilen und biobasierten Stoffen soll auch die Entsorgung über die Biotonne oder den Wertstoffhof und der anschließenden biologischen Behandlung überlegt werden.

Hierfür wurden u. a. drei Versuchsreihen mit insgesamt zehn Kompostern (Neudroff DuoTherm 530L) in den Frühjahren (FJ) 2022 und 2023 sowie Herbst (H) 2022 durchgeführt. Als Medium wurden Bioabfälle aus der Haushalts- und Stadtgrünsammlung eines lokalen Entsorgers verwendet, welcher entsprechend der Jahreszeit unterschiedliche Zusammensetzungen und somit Eigenschaften aufwies (FJ 2022: Mischung aus Küchen- und Gartenabfällen; H 2022: sehr hoher Struktur-/Holzanteil; FJ 2023: hoher Grasanteil).

Durch eine optische Ansprache nach jeweils 2, 5 und 10 Wochen konnten folgende Beobachtungen gemacht werden: Beim FJ 2022 und 2023 Versuch konnten bereits beim ersten Ausbau der Platten nach zwei Wochen die Holzverbunde an den feuchten Stellen voneinander getrennt werden. Hingegen nicht voneinander lösbar waren WPCs in der H 2022 Miete, welche aufgrund des hohen, unzerkleinerten Holzanteils² eine schlechte Wasseraufnahmekapazität aufwies; die WPC waren optisch bis auf die Schmutzanhafungen nicht verändert. Proben, die erst nach 2 Wochen der Miete hinzugefügt wurden, blieben ebenfalls unverändert.³

Bei den Proben, die feuchte Stellen hatten, an denen der Verbund voneinander trennbar war, zeigten auch optische Änderungen des PLAs auf. Das eingangs transparente PLA war weißlich und auch nur noch stellenweise auf der Platte erkennbar.

Anhand des in Teil 2.2 beschriebenen Abbauprozesses lässt sich vermuten, dass in den feuchten Mieten in der Abbau- und Hygienisierungsphase der Kompostierung durch die Überschreitung der Glasübergangstemperatur ($T > 58^{\circ}\text{C}$), die amorphen Anteile des PLAs hydrolysiert wurden. Dies würde auch die Veränderung von einem transparenten Werkstoff zu einem weißen erklären. Die Platten(abschnitte), welche aufgrund der Heterogenität der Miete oder des hohen Holzanteils nicht innerhalb der ersten zwei Wochen feucht waren, wurden nicht chemisch hydrolysiert und änderten sich rein optisch somit nicht. Gleiches gilt für die Proben, die im dritten Versuch erst nach der ersten Umbauphase hinzugefügt wurden.

Es ist auch zu vermuten, dass der alkalische pH-Wert am Ende der Kompostierung wie durch de Jong et al. (2001) beschrieben durch die Abspaltung von Lactat den Abbau der Oglomere weiter beschleunigt haben könnte. Der pH-Wert des Sickerwassers von der FJ2022/2023 Miete war dauerhaft alkalisch. Insbesondere die FJ 2023 Miete, die aufgrund des hohen Grasanteiles einen hohen Stickstoffwert aufwies, befand sich dauerhaft im alkalischen Bereich (pH 8.3-9.0), wodurch die WPC teilweise voneinander gelöst waren. Für eine bessere Quantifizierung wären weitere Experimente (u. a. in einem homogenen Medium) sowie

2 Das Inputmaterial war bewusst nicht zerkleinert worden, um die schlechteren Bedingungen bei einer Heimkompostierung, wo eine Vorzerkleinerung nicht zwingend stattfindet, nachzustellen. Das Temperaturprofil war aber aufgrund der Inputmenge von 200 L trotzdem vergleichbar mit dem einer industriellen Kompostierungsanlage (u. a. $T \leq 70^{\circ}\text{C}$ in der 1 Woche).

3 Nur bei dem dritten Versuch wurden vier Proben nach 2 Wochen zusätzlich hinzugefügt, um die Ergebnisse der parallelen Literaturrecherche bezüglich der abiotischen Hydrolyse (siehe Teil 2.2) zu testen.

eine analytische Auswertung anhand von TGA, DSC, FTIR zur Nachvollziehung der Änderung des Kristallisationsgrades und des Molekulargewichtes sinnvoll. Es wäre jedoch zu überlegen, inwieweit das Holz im Stoffverbund dies erschwert und die Experimentbedingungen müssten die Bedingungen einer industriellen und/oder Heimkompostierung darstellen. Insgesamt könnten durch Versuchsreihen mit unterschiedlichen Wassergehalten und Temperaturprofilen mehr Aussagen zum Verhalten des PLAs in biologischen Behandlungsanlagen und der Natur getroffen werden. Auch mögliche Auswirkungen der Prozessführung während der Herstellung und dem damit verbundenen Kristallisationsverhalten in der Abkühlungsphase sind von Interesse, da sich der Kristallisationsgrad primär auf den Abbau auswirkt.

3 Fazit und Ausblick

Sollte PLA sich nicht innerhalb einiger Monate abbauen, ist nicht auszuschließen, dass es sich in der Umwelt anreichert, welches neben Auswirkung auf das Wassermanagement und der Ästhetik, sich auch negativ auf das Ökosystem auswirken könnte. Neben Ersticken und Verschlucken ist auch ein toxischer Effekt von PLA als Mikroplastik zu untersuchen. Während PLA-Mikroplastik für Landlebewesen unproblematisch scheint, so wurden toxische Effekte auf die Meeresbiologie beobachtet, die dem von fossilen Mikroplastik gleichkommt (Ali et al., 2023, König Kardgar et al., 2023, Zhang et al., 2023).

Der Wunsch die Langlebigkeit und wasserabweisenden Eigenschaften als Produkteigenschaften beizubehalten, setzt bereits voraus das schnell-abbaubarer Kunststoffe einen Trigger benötigen, um diesen Abbau am Lebensende zu initiieren, da sonst die Eigenschaften nicht miteinander vereinbar sind. Bei PLA ist dieser Trigger die Glasübergangstemperatur in einer feuchten Umgebung. Diese ist jedoch nur relevant wenn ein Gemisch der beiden Enantiomere vorliegt, da diese zu ataktischen, amorphen Bereiche führen. Hierbei ist auch zu bedenken, dass der Kristallisationsgrad sich auf die Glasübergangstemperatur und auf die Carboxyl-Konzentration durch abgebaute amorphe Abschnitte auswirkt. Somit darf nicht allein durch die Nutzung von PLA seine Kompostierbarkeit angenommen werden, sondern bei der Zulassung bzw. Label-Vergabe muss die genaue Form bekannt sein und/oder produktspezifische Experimente durchgeführt werden. Außerdem sollte sichergestellt werden, dass als kompostierbar nachgewiesenes PLA auch einer Kompostierung zugeführt wird und es nicht durch die Betitelung als bioabbaubar zur Entsorgung in die Umwelt kommt. Bei einer Behandlung in der Biogasanlage wird in der Regel nicht die notwendige T_g erreicht, weswegen hier die abiotische Hydrolyse nicht stattfindet. Wie in der Folge 20 des DGAW-Podcasts (DGAW 2023) jedoch beschrieben, kann der Abbau in der Nachrotte im Anschluss an die anaerobe Behandlung schneller ablaufen. Dies ist vermutlich auf die gute Durchnässung des PLAs in der Biogasanlage zurückzuführen, wenn die Nachrotte anschließend warm genug wird. Durch Beimischung von anderen (Kunst)stoffen ist auch ein Abbau in der Umwelt oder in der Heimkompostierung denkbar (Balla et al, 2021).

Insgesamt wird eine klare Kommunikation der unterschiedlichen Bedingungen und Stoffzusammensetzungen notwendig sein, um PLA richtig zu managen. Dies könnte durch ein mangelndes Interesse an der Naturwissenschaft Chemie und der teilweisen Abneigung in der Bevölkerung gegenüber synthetisch hergestellten Stoffen erschwert werden.

Danksagung

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

Literatur/Quellen

- Abe, H.; Takahashi, N.; Kim, K.J.; Mochizuki, M.; Doi, Y. Thermal Degradation Processes of End-Capped Poly(L-lactide)s in the Presence and Absence of Residual Zinc Catalyst. *Biomacromolecules* 2004, 5, 1606–1614.
- Ali, W.; Ali, H.; Gillani, S.; Zinck, P.; Souissi, S. (2023): Polylactic acid synthesis, biodegradability, conversion to microplastics and toxicity: a review. *Environmental Chemistry Letters* 21: 1761-1786.
- Auras, R.; Harte, B.; Selke, S. (2004): An Overview of Polylactides as Packaging Materials. *Review. Macromolecular Bioscience* 4: 835-864.
- Balla, E.; Daniilidis, V.; Karlioti, G.; Kalamas, T.; Stefanidou, M.; Bikiaris, N.D.; Vlachopoulos, A.; Koumentakou, I.; Bikiaris, D.N. (2021): Poly(lactic Acid): A Versatile Biobased Polymer for the Future with Multifunctional Properties—From Monomer Synthesis, Polymerization Techniques and Molecular Weight Increase to PLA Applications. *Polymers* 13, 1822.
- De Jong, S.; Arias, E.; Rijkers, D.; Van Nostrum, C.; Kettenes-Van Den Bosch J.; Hennink W. (2001): New Insights into the hydrolytic degradation of poly (lactic acid): participation of the alcohol terminus. *Polymer* 42: 2795-2802.
- Di Lorenzo, M. L.; Androsch, René (2018): Synthesis, Structure and Properties of Poly(lactic acid). *Advances In Polymer Science*, Springer Nature.
- DGAW (2022): Ressourcen.Neu.Denken. Fachlicher Input zu Trends der Kreislaufwirtschaft. Folge 14 vom 06.07.2022: Hat Bioplastik noch eine Zukunft? - Zu Gast: David Wilken und Jöran Reske. Online: <https://www.dgaw.de/de/dgaw-podcast/resourcenneudenken>; 01.07.2024.
- ETC/WMGE; EEA (2020): Biodegradable and compostable plastics - challenges and opportunities. Briefing. Letzte Änderung: 13.02.2023. Online: <https://www.eea.europa.eu/publications/biodegradable-and-compostable-plastics>, 07.01.2024.
- Ghorpade, V.M.; Gennadios, A.; Hanna, M.A. Laboratory composting of extruded poly(lactic acid) sheets. *Bioresour. Technol.* 2001,76, 57–61.
- GreenBox (2024): PLA/Biokunststoffe. Online: <https://www.biologischverpacken.de/blog/materialien/pla-biokunststoff>; 07.01.2024.
- Gorrasi, G.; Pantani, R. (2017): Hydrolysis and Biodegradation of Poly(lactic acid). IN: Di Lorenzo, M. L.; Androsch, René (2018): Synthesis, Structure and Properties of Poly(lactic acid). *Advances In Polymer Science* 279, Springer Nature: 119-152.
- Göpferich, A. (1994): Mechanisms of polymer degradation and erosion. *Biomaterials* 17: 104-114.
- Hartmann, M.H. (1998). High Molecular Weight Polylactic Acid Polymers. In: Kaplan, D.L. (eds) *Biopolymers from Renewable Resources. Macromolecular Systems — Materials Approach*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Jung, JH.; Ree, M.; Kim, H. (2006): Acid- and base-catalyzed hydrolyses of aliphatic polycarbonates and polyesters. *Catal Today* 115(1-4): 284-287.

- Kale, G.; Kijchavengkul, T.; Auras, R.; Rubino, M.; Selke, S. E.; Singh, S. P. (2007): Compostability of Bioplastic Packaging Materials: An Overview. *Macromolecular Bioscience* 7: 255-277.
- Karamanlioglu, M.; Preziosi, R. Robson, G. D. (2017): Abiotic and biotic environmental degradation of the bioplastic polymer poly(lactic acid): A review. *Polymer Degradation and Stability* 137: 122-130.
- König Kardgar, A.; Ghosh, D.; Sturve, J.; Agarwal, S.; Almroth, B. C. (2023): Chronic poly(L-lactide) (PLA)-microplastic ingestion affects social behavior of juvenile European perch (*Perca fluviatilis*). *Science of the Total Environment* 881: 163425.
- Löw, C.; Prakash, S.; Stuber-Rousselle, K. (2021): Why are biobased and biodegradable plastic not part of the solution to reduce plastic waste?. Checking the facts. GiZ (Hrsg). In Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut e. V.
- Masutani, K.; Kimura, Y. (2017): Present Situation and Future Perspectives of Poly(lactic acid). IN: Di Lorenzo, M. L.; Androsch, René (2018): Synthesis, Structure and Properties of Poly(lactic acid). *Advances In Polymer Science* 279, Springer Nature: 1-26.
- Ohkita, T.; Lee S.-H. (2006): Thermal Degradation and Biodegradability of Poly(lactic acid)/Corn Starch Biocomposites. *Applied Polymer Science*, 100:3009-3017.
- PackVerde (2024): Materialkunde PLA - alles Wissenswerte über den Biokunststoff. Online: <https://www.pack-verde.com/blog/de/materialkunde/materialkunde-pla-alles-wissenswertes-ueber-den-biokunststoff/>; 01.07.2024.
- Rausch (2024): PLA: von der Pflanze zur Kunststoff-Verpackung. Online: <https://www.rausch-packaging.com/blog/de/materialkunde/materialkunde-pla-biokunststoff/>; 07.01.2024.
- Reeve, M. S.; McCarthy, S. P.; Downey, M. J.; Ross, R. A. (1994): *Macromolecules* 27: 825-831.
- Sargan, Molly (2020): How Microbes Grow. Harvard University. Online: <https://sitn.hms.harvard.edu/flash/2020/how-microbes-grow/>; 07.01.2024.
- Stadtmüller, Ulrike (2004): Grundlagen der Bioabfallwirtschaft. Lehr- und Handbuch. TK Verlag, Neuruppin: 189-205.
- Teixeira, S.; Eblagon, K. M.; Miranda, F.; Pereira, M. F. R.; Figueiredo, J. L. (2021): Towards Controlled Degradation of Poly(lactic) Acid in Technical Applications. Review. MDPI, *Journal of Carbon Research* 7, 42.
- Tsuji, H.; Suzuyoshi, K. (2002a): Environmental degradation of biodegradable polyesters 1. Poly(e-caprolactone), poly[(R)-3-hydroxybutyrate], and poly(L-lactide) films in controlled static seawater. *Polymer Degradation and Stability* 75: 347-355.
- Tsuji, H.; Suzuyoshi, K. (2002b): Environmental degradation of biodegradable polyesters 1. Poly(e-caprolactone), poly[(R)-3-hydroxybutyrate], and poly(L-lactide) films in natural dynamic seawater. *Polymer Degradation and Stability* 75, 2: 357-365.
- UBA, Umweltbundesamt (2023): Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/biobasierte-biologisch-abbaubare-kunststoffe#haufig-gestellte-fragen-faq>; 01.07.2024.
- Zaaba, N.F.; Jaafar, M. (2020): A review on degradation mechanisms of polylactic acid: Hydrolytic, photo-degradative, microbial, and enzymatic degradation. *Polym. Eng. Sci.* 60, 2061–2075.
- Zhang, C.; Li, F.; Liu, X.; Xie L.; Zhang, Y. T.; Mu, J. (2023): Polylactic acid (PLA), polyethylene terephthalate (PET), and polystyrene (PS) microplastics differently affect the gut microbiota of marine medaka (*Oryzias latipes*) after individual and combined exposure with sulfamethazine. *Aquatic Toxicology*, 259: 106522.

Isla Hodgkinson

Kontakt

M. Sc., Isla Hodgkinson, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Technische Universität Dresden / Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft

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

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

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

AquaHealth – Utilizing Bioactive Molecules from Microalgae Microbiomes for Sustainable Health Management in Aquaculture

Abstract: *Aquaculture plays a key role in the provision of fish products and is a rapidly growing industry. However, infectious diseases pose significant challenges to finfish aquaculture systems. Consequently, sustainable and effective health management is critical. Although vaccinations serve as an effective measure for disease prevention, some diseases cannot be prevented this way, and certain vaccines are ineffective. As such, the development and use of novel, effective, and sustainable countermeasures is crucial. Therefore, the AquaHealth project funded by the BlueBio Cofund (ERA-NET) investigated microalgae microbiomes as a natural disease prevention and treatment method. Marine and freshwater microalgae and their associated microbiomes were investigated employing DNA sequence mining and several other omics' approaches. Subsequently, microalgal biomass, extracts, supernatants, as well as separated bioactive molecules were examined for their potential to inhibit microbial and viral biofilms. Two of the most promising microalgal strains were used to upscale the cultivation and downstream processes. Concluding, microalgal biomass was tested in growth performance tests on rainbow trout and a prospective technology assessment was conducted on the integration of microalgae in aquaculture health management using novel ex-ante life cycle assessment approaches. The investigated microalgae and microalgae-based products revealed significant potential to inhibit the biofilm formation of various fish pathogens. However, the extent of effects heavily depends on the investigated pathogens and examined microalgal products. In case of upstream and downstream processing, among the tested reactors, flat panel airlift reactors were found to provide the highest biomass productivities, while the productivities in the open pond were the lowest. Regarding downstream processing, cell disruption and drying via rotary ball milling and spray drying, respectively, were found to be the most efficient and energy conserving techniques. The use of microalgae as a nutritional additive showed no clear effect during the subsequent growth performance tests. Lastly, employing a prospective technological assessment allowed the determination of key parameters influencing the environmental performance of such a system, culminating in a novel algorithmic procedure for ex-ante LCA of technological concepts under deep uncertainty.*

1 Introduction

Aquaculture plays a key role in the food industry, considering the global population increase and the increased demand for sustainably produced proteins. However, aquaculture operations deal with considerable obstacles, as infectious diseases caused by viruses, bacteria, fungi, or eukaryotic pathogens threaten whole cultures posing a significant economic and environmental burden (Stentiford et al., 2017; The Norwegian Ministry of Fisheries and Coastal Affairs, 2009). Although most diseases are treated by vaccination or quarantine in Europe, in some parts of the world antibiotics are still heavily used, adding to the antimicrobial resistance issue. Despite widespread application, some diseases cannot be prevented by vaccination, some vaccinations were found to be ineffective, and certain aquatic species cannot be vaccinated due to lack of an adaptive immune system (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018). Therefore, more effective and sustainable treatment and prevention methods need to be explored. Microalgae and their associated microbiomes were found to exert positive health effects on finfish, as increased growth, feed utilization, and physiological function were reported (Krohn-Molt et al., 2013; Roy and Pal, 2015). Microalgae are mostly unicellular microorganisms present in all aquatic environments, where they usually are the basis of the food web and thus present themselves as a potentially more natural disease prevention and treatment method. Moreover, microalgae usually live in symbiosis with a variety of microorganisms, their microbiomes. The potential of these microalgae-associated microbiomes remains largely untapped, potentially offering a rich reservoir of biodiversity (Ramanan et al., 2016). Recognized for producing high-value compounds like carotenoids, lipids, and vitamins, some of these constituents in microalgae have been identified to possess antibiotic, antiviral, or antifungal properties in aquaculture systems (Austin, 2012), highlighting their vast potential.

The mutualistic relationship between microalgae and bacteria has a combined effect, shaping the physiology and metabolism of both entities (Ramanan et al., 2016; Cooper und Smith, 2015). For specific strains like *Chlorella*, *Scenedesmus*, and *Micrasterias*, it's been observed that they harbor unique microbiomes. These assist in warding off microbial biofilm build-up and preventing biofouling by other bacteria (Krohn-Molt et al. 2013; Krohn-Molt et al. 2017).

The AquaHealth project funded by the BlueBio Cofund (ERA-NET) investigated microalgae microbiomes for their potential application in finfish aquaculture health management. The results of this project are presented in the following, with a particular focus on upscaling the cultivation, drying, and cell disruption process of microalgae, as well as the growth performance tests on rainbow trout.

2 Project Structure and Methodology

2.1 Project Objectives, Organization, and Structure

The AquaHealth project aimed to address issues with sustainability in aquaculture health management by investigating novel biofilm-inhibiting and antimicrobial enzymes, as well as antiviral candidates derived from microalgae and their associated microbiomes. The project's approach was to harness these biore-sources to develop prebiotic cultures, essentially forming a natural, precautionary treatment method for enhancing the resilience and health of aquaculture systems. The research consortium comprised six partners, each bringing distinct expertise to the project. The participating organizations include the Institute of

Circular Resource Engineering and Management from the Hamburg University of Technology (Hamburg, Germany), the Department of Biotechnology and Nanomedicine from SINTEF (Trondheim, Norway), the Institute of Plant Science and Microbiology from the University of Hamburg (Hamburg, Germany), Sea & Sun Organic from Sea & Sun Technology GmbH (Trappenkamp, Germany), and both the Department of Chemistry and Bioscience and the Department of Planning from Aalborg University (Aalborg, Denmark). This collaboration ensured a diverse and comprehensive approach towards the project's research goals. In order to effectively address the objectives, the AquaHealth project was organized into seven distinct yet interconnected work packages (Figure 1). While WP1 focused on overall project management and workflow organization, WP2 concentrated on the isolation and in-depth study of microalgae microbiomes. WP3 took a molecular approach to the project, sequencing DNA and RNA to identify and characterize potential biomolecules. In WP5, the primary tasks involved processing of microalgae, scaling up production systems, and assessing the potential of microalgae as a nutritional additive for rainbow trout. The search for biofilm-inhibiting proteins was carried out in WP4, which implemented a screening protocol among microalgae communities. Finally, using the data generated from WP5, a technological assessment was conducted, evaluating the feasibility and implications of producing and using such microalgae-based biomolecules.

2.2 Methodology

In the very first step of the screening activity, microalgae and their microbiomes were sampled, cultivated, and taxonomically characterized for further omics analyses. For the identification of potential candidates, over 25 marine and freshwater microalgae were tested by UHH in preliminary biofilm inhibition screening involving various bacterial strains. In addition, biofilm samples were collected from a recirculating aquaculture system (RAS) to assess potential fish pathogens. Subsequently, 16S rRNA gene sequencing and shotgun sequencing was performed by SINTEF to analyze the biofilm community composition. The metagenomes of six promising microalgae and their microbiomes were then sequenced to identify potential enzyme candidates. These candidates were used for up- and downregulation of specific genes of model organisms. A bioinformatics pipeline was then established by SINTEF to assess the diversity and potential of enzymes with antimicrobial and antiviral properties. Finally, static biofilm-inhibition tests were conducted employing BacTiterGlo and crystal violet staining. In addition, an antiviral-cytotoxicity assay was established using fish cell line CHSE-214 and Infectious Pancreatic Necrosis Virus (IPNV).

Based on the results of the previous work packages, WP 5 was designed to develop a cultivation strategy and downstream processing for microalgae strains which exhibited bioactive effects. The first task was to adapt pilot-scale cultivation strategies to the specific needs of six microalgae candidates, namely *Tetrademus obliquus*, *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus acuminatus*, *Tetraselmis chuii*, and *Nannochloropsis salina*. Therefore, different nutrient media were tested in duplicate lab-scale cultivation experiments. To achieve a better handling in large scale cultivations, predominantly media compositions based on commercial fertilizers were investigated, i.e. media based on the fertilizer Ferty Basis II (Planta Düngemittel GmbH, Regenstauf, Germany) according to Leupold et al. (2013) and media based on the trace elements fertilizer Ferty Spezial 10 (Planta Düngemittel GmbH, Regenstauf, Germany) according to Francke et al. (2022). During the lab-scale cultivation experiments, all environmental parameters were constant, i.e., a light intensity of 800 , a light/dark cycle of 16:8, a broth temperature of 30 , and a CO₂ supply of 10% (v/v) via a mixture of compressed air and CO₂. The process scale up was carried out for two promising strains, *T. obliquus* and *C. sorokiniana*, starting with inoculum preparation in laboratory

glass bottles (LGBs). Subsequently, microalgal cultures were transferred to 30 L flat panel airlift (FPA) reactors, prior to cultivation in a 100 L vertical tubular reactor, a 180 L FPA, and finally a 6000 L open raceway pond (OPR). During the cultivation processes, critical process parameters were monitored on a regular basis, i.e., biomass concentration, irradiance, broth and ambient temperature, energy consumption, and other. For the development of a downstream processing scheme, biomass harvest and preliminary water separation was conducted by employing a disc separator, whereas three cell disintegration and two drying methods were tested. In particular, cell disruption efficiency of a rotary ball mill, a planetary ball mill, and a high-pressure homogenizer was investigated. The disintegration efficiency was evaluated by counting disintegrated cells using a light microscope and a Neubauer counting chamber. Two drying processes were investigated, freeze drying on the one hand and spray drying on the other hand.

Prior to examining the effects of microalgal biomass in growth performance tests (GPTs) on rainbow trout, samples of *T. obliquus* and *C. sorokiniana* were sequenced by SINTEF to analyze the bacterial community composition (16S rRNA) and the purity of the microalgae culture (18S rRNA). Lastly, processed *T. obliquus* and *C. sorokiniana* biomass, as well as spray-dried and lysed *H. pluvialis* biomass before and after supercritical CO₂ extraction was examined for its nutritional profile and employed in GPTs conducted by Fraunhofer Research Institution for Individualized and Cell-based Medical Engineering (IMTE). Therefore, 5% (w/w) of microalgal biomass was integrated iso-nutritively into fish feed for rainbow trout. The growth performance was compared to a positive and negative control, i.e., conventional aquaculture fish feed based on fish meal and fish oil (FMFO) and soy-based fish feed, respectively. The rainbow trout were then fed daily up to apparent satiation for 10 weeks and growth parameters such as daily feed intake (DFI), food conversion ratio (FCR), and specific growth rate (SGR) were determined. Additionally, a histological analysis was conducted to assess the effects of microalgal biomass on fish health.

Finally, the potential environmental impacts and the associated uncertainties of the system scaleup and market introduction were evaluated based on the cultivation and downstream data recorded in WP 5. Therefore, a novel consequential ex-ante LCA model was developed for microalgae cultivation in Europe and the hypothetical application of a yet undiscovered microalgae-based bioactive molecule in finfish aquaculture, considering deep uncertainty and its propagation as well as primary data provided by rainbow trout farmers in Denmark and Italy (Jouannais et al., 2022; Jouannais and Pizzol, 2022; Jouannais et al., 2023).

3 Results and Discussion

Initial biofilm inhibition tests revealed significant impacts of *T. chuii* and *N. salina* supernatants on the analyzed pathogens. Following this, the six most promising microalgae underwent deeper examination, showing differing levels of biofilm inhibition. In addition, a hydrolase was identified that notably hindered the biofilm formation of certain fish pathogens. Some of the studied microalgae also demonstrated pronounced antiviral properties. Comprehensive findings can be found in Bergmann et al. (2024) with additional publications set to be released by the participating partners in early 2024.

The evaluation of the cultivation media revealed that the formulation based on commercial fertilizer Fertyl II yielded the highest volumetric productivities for all investigated microalgae species, with productivities ranging between 0.53 to 1.06 g L⁻¹ d⁻¹. In contrast, the Basal medium showed the lowest productivities,

ranging between 0.06 and 0.58 g L⁻¹ d⁻¹. Given these findings and due to easier handling, the Ferty II medium was selected for all subsequent scale-up experiments. Regarding the lab-scale cultivations of *T. obliquus* and *C. sorokiniana*, cultivation in LGBs and the 30 L FPA yielded the lowest biomass concentrations. However, these stages were the first steps for subsequent upscaling, as they were serving primarily for inoculum provision for the larger-scale reactors. In stark contrast, for both outdoor PBRs - the tubular reactor and the 180 L FPA - high biomass concentrations were recorded, reaching up to 4.9 g L⁻¹ and 6.18 g L⁻¹ for *T. obliquus* and 1.79 g L⁻¹ and 4.53 g L⁻¹ for *C. sorokiniana*, respectively. The open pond system yielded lower concentrations, however, given its larger volume, the open pond produced the greatest quantity of raw biomass, making it the concluding phase in the upscaling experiments. For both investigated strains, the highest volumetric productivities were recorded for the cultivation in outdoor FPAs, with values up to 0.75 g L⁻¹ d⁻¹ for *T. obliquus* and 1.5 g L⁻¹ d⁻¹ *C. sorokiniana*. Although these biomass productivities heavily depend on the environmental conditions, the distinct reactor design facilitates high productivities due to an optimal light path and sufficient mixing. In contrast, cultivations in the OP were found to exhibit the lowest volumetric productivities (0.14 g L⁻¹ d⁻¹ for *T. obliquus* and 0.26 g L⁻¹ d⁻¹ for *C. sorokiniana*), which can be related to the increased light path and suboptimal mixing.

In developing a downstream process, the focus was on energy efficiency and high disintegration rates to improve product yield and digestibility in trout and increase economic viability. Freeze drying resulted in lower residual water content (0.1%-0.3%) than spray drying (2%-4%), but spray drying was preferred for its energy efficiency, scalability, and continuous operation suitability. In cell lysis, rotary and planetary ball mills outperformed high-pressure homogenization, with disintegration rates over 90%. Consequently, the rotary ball mill was chosen as the optimal method for *T. obliquus* biomass due to its better scalability and energy efficiency. In the downstream processing of *C. sorokiniana*, freeze drying and spray drying resulted in residual water contents of 0.02%-0.3% and 2.6%-3%, respectively. However, cell disruption with mills was less effective for *C. sorokiniana* than *T. obliquus*, achieving disintegration rates of up to 82% with the planetary ball mill and 72% with the rotary ball mill, possibly due to *C. sorokiniana*'s tendency to form agglomerates.

A significant change in community composition was noted when scaling up from LGBs to ORP, with only 50% of the microalgae in ORP being *C. sorokiniana*, most likely due to system openness and starting culture contaminations. Before the GPTs on rainbow trout, the composition of dried and disintegrated biomass of various microalgae was analyzed (Figure 1).

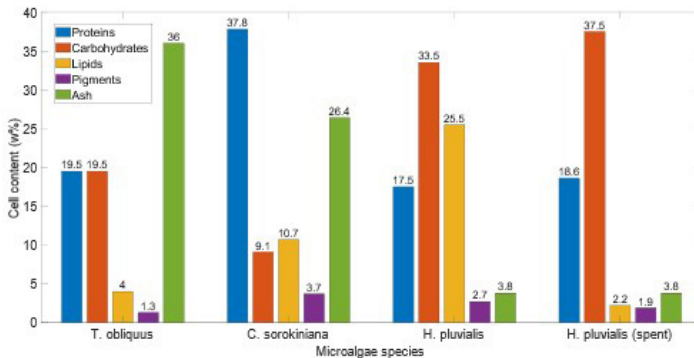


Figure 1: Cell composition of *Tetradesmus obliquus*, *Chlorella sorokiniana*, *Haematococcus pluvialis*, and spent *Haematococcus pluvialis* biomass after pigment extraction

C. sorokiniana had the highest protein (37.8%) and pigment (3.7%) content. In contrast, spent *H. pluvialis* biomass had the highest carbohydrate but lowest lipid content due to prior pigment extraction and fatty acid recovery. *T. obliquus* showed the highest ash content (36%), with *C. sorokiniana* also high at 26.4%, likely due to contamination in their open cultivation systems. Cell composition varies with cultivation conditions and growth stages.

Concerning the GPTs, the microalgal biomass under investigation displayed a higher feed conversion ratio (FCR) compared to both the negative (soy) and positive (fish meal) controls across all species, suggesting a reduced efficiency (Figure 2). While the variance between the microalgal biomass and the negative control is marginal, it's noteworthy that the rainbow trout exhibited symptoms of diarrhea when fed soy, likely due to the reduced digestibility of plant proteins and the carbohydrates content. In terms of the specific daily growth rate (SGR), a rate of 2.82% was recorded for conventional fish meal, whereas *H. pluvialis* biomass registered the lowest at 2.22%. This disparity is plausibly attributed to the low protein concentration observed in the *H. pluvialis* biomass. Among the assessed microalgae, *T. obliquus* demonstrated the most substantial growth rate, which is comparable to the negative control (2.5% and 2.53%, respectively). Regarding daily feed intake (DFI), the traditional fish meal was consumed more extensively in contrast to the other feed variants studied, with an daily intake rate of 3.19%. Conversely, the *H. pluvialis* biomass exhibited the least DFI as shown in Figure 2. Significantly, *T. obliquus* showed a DFI of 3.14%, almost on the same level as the fish meal and marking the highest intake among the evaluated algae. This can be attributed to either a more palatable taste or the pronounced ash content in the *T. obliquus* biomass, which would naturally necessitate greater feed consumption. Health parameter and histological studies, conducted to gauge the health implications of the tested algae, revealed no discernible health issues irrespective of the feed type. No disease was registered during the 10 weeks experimental duration and the mortality was low in all groups and within the range of commercial rainbow trout production. However, the histological examination showed the presence of apoptotic cells/inclusions to varying extent, for which the reason and the effect on fish health remains unclear.

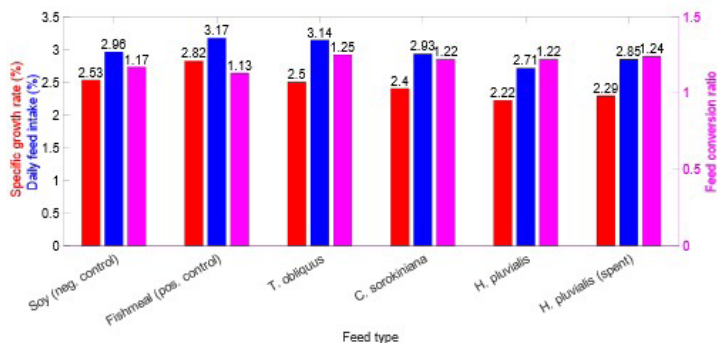


Figure 2: Specific growth rate, daily feed intake, and feed conversion ratio of investigated feed types in trout growth performance tests

Regarding the prospective technology assessment, there was a notable difference in potential environmental impacts from microalgae cultivation between sites in Spain and Denmark (Jouannais et al. 2022). When assessing impacts from producing an unspecified compound from various microalgae strains in different locations across Europe, the variations were even more pronounced. The median global warming impact across these variables in Europe was 80 kg of CO₂ equivalent per kg of the compound (Jouannais und Pizzol 2022). Notably, it was found that reducing trout mortality in studied fish farms could decrease environmental impacts by 5%, however this requires a microalgal biomass containing at least 18% of the bioactive compound (Jouannais et al. 2023)

4 Conclusion

Microalgae and their associated microbiomes were investigated for the application in a sustainable health management in finfish aquaculture. Although specific enzymes, microalgal biomass, extracts, and supernatant showed promising inhibition effects of microbial and viral biofilms, further research must be conducted to determine additional compounds with inhibiting effects. The cultivation of microalgae was scaled to pilot-scale, revealing flat panel airlift reactors to be the most efficient one of all investigated reactor systems in terms of volumetric productivity and thus should be used for large-scale production of high value products due to lower contamination risks. However, considering the operational and capital costs open ponds are a viable option for the production of large biomass quantities if contaminations are irrelevant. Moreover, the investigation and upscaling of downstream processing techniques showed rotary ball milling for cell lysis and spray drying as the most efficient and economically feasible downstream processing methods. In particular, both techniques can be used in a continuous or semi-continuous way and allow for the processing of large biomass quantities. It must be noted, however, that the most appropriate downstream processing techniques heavily depend on the microalgal cell wall, biomass behaviour, and the desired product. Considering potential health effects of microalgal biomass as a nutritious additive to fish feed, it must be noted that the results are unclear and that further research must be conducted. Nevertheless, the addition of small microalgal biomass quantities generally was found to exhibit a lower specific growth rate and a lower daily feed intake compared to the positive and negative control, except for *T. obliquus* which was found to have an elevated daily feed intake rate. The feed conversion ratio, on the other hand, was higher for all investigated alternative feed. Henceforth, the application of microalgal biomass in aquaculture health management requires an improved implementation strategy to overcome these barriers.

Acknowledgements

The AquaHealth project was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) (161B0945C), Research Council of Norway (RCN), Innovation Fund Denmark (IFD).

References

- Austin, B. (Hg.) (2012): Infectious disease in aquaculture. Prevention and control. Oxford, Philadelphia: Woodhead Pub. Ltd (Woodhead publishing series in food science, technology and nutrition, no. 231). Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780857090164>.
- Bergmann, L., Balzer Le, S., Hageskal, G. *et al.* New diene lactone hydrolase from microalgae bacterial community-Antibiofilm activity against fish pathogens and potential applications for aquaculture. *Sci Rep* 14, 377 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50734-9>
- Cooper, Matthew B.; Smith, Alison G. (2015): Exploring mutualistic interactions between microalgae and bacteria in the omics age. In: *Current opinion in plant biology* 26, S. 147–153. DOI: 10.1016/j.pbi.2015.07.003.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2018): The State of World Fisheries and Aquaculture 2018: Meeting the Sustainable Development Goals.
- Francke, Leonard; Löhn, Sarah; Weiderer, Philipp; Kosheleva, Arina; Wiecek, Nils; Kuchta, Kerstin (2022): A novel tubular photobioreactor immersed in open waters for passive temperature control and operated with the microalga *Tetradismus obliquus*. In: *Algal Research* 67, S. 102832. DOI: 10.1016/j.algal.2022.102832.
- Jouannais, Pierre; Gibertoni, Pier Paolo; Bartoli, Marco; Pizzol, Massimo (2023): LCA to evaluate the environmental opportunity cost of biological performances in finfish farming. In: *Int J Life Cycle Assess.* DOI: 10.1007/s11367-023-02211-8.
- Jouannais, Pierre; Hindersin, Stefan; Löhn, Sarah; Pizzol, Massimo (2022): Stochastic LCA Model of Upscaling the Production of Microalgal Compounds. In: *Environmental science & technology* 56 (14), S. 10454–10464. DOI: 10.1021/acs.est.2c00372.
- Jouannais, Pierre; Pizzol, Massimo (2022): Stochastic Ex-Ante LCA under Multidimensional Uncertainty: Anticipating the Production of Undiscovered Microalgal Compounds in Europe. In: *Environmental science & technology* 56 (22), S. 16382–16393. DOI: 10.1021/acs.est.2c04849.
- Krohn-Molt, Ines; Alawi, Malik; Förstner, Konrad U.; Wiegandt, Alena; Burkhardt, Lia; Indenbirken, Daniela *et al.* (2017): Insights into Microalga and Bacteria Interactions of Selected Phycosphere Biofilms Using Metagenomic, Transcriptomic, and Proteomic Approaches. In: *Frontiers in microbiology* 8, S. 1941. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01941.
- Krohn-Molt, Ines; Wemheuer, Bernd; Alawi, Malik; Poehlein, Anja; Güllert, Simon; Schmeisser, Christel *et al.* (2013): Metagenome survey of a multispecies and alga-associated biofilm revealed key elements of bacterial-algal interactions in photobioreactors. In: *Applied and environmental microbiology* 79 (20), S. 6196–6206. DOI: 10.1128/AEM.01641-13.
- Leupold, Marco; Hindersin, Stefan; Gust, Giselher; Kerner, Martin; Hanelt, Dieter (2013): Influence of mixing and shear stress on *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, and *Chlamydomonas reinhardtii*. In: *J Appl Phycol* 25 (2), S. 485–495. DOI: 10.1007/s10811-012-9882-5.
- Ramanan, Rishiram; Kim, Byung-Hyuk; Cho, Dae-Hyun; Oh, Hee-Mock; Kim, Hee-Sik (2016): Algae-bacteria interactions: Evolution, ecology and emerging applications. In: *Biotechnology advances* 34 (1), S. 14–29. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2015.12.003.
- Roy, Sudeshna Sen; Pal, Ruma (2015): Microalgae in Aquaculture: A Review with Special References to Nutritional Value and Fish Dietetics. In: *Proc Zool Soc* 68 (1), S. 1–8. DOI: 10.1007/s12595-013-0089-9.

Stentiford, Grant D.; Sritunyalucksana, Kallaya; Flegel, Timothy W.; Williams, Bryony A. P.; Withyachumnarnkul, Boonsirm; Itsathitpaisarn, Orn; Bass, David (2017): New Paradigms to Help Solve the Global Aquaculture Disease Crisis. In: *PLoS pathogens* 13 (2), e1006160. DOI: 10.1371/journal.ppat.1006160.
The Norwegian Ministry of Fisheries and Coastal Affairs (2009): Strategy for an Environmentally Sustainable Norwegian Aquaculture.

Contact

M. Sc., Alexander Hofmann, wissenschaftl. Mitarbeiter

Hamburg University of Technology (TUHH), Institute of Circular Resource Engineering and Management (CREM)

Tel.-Nr.: +49 40 42878 4650

E-Mail: alexander.hofmann@tuhh.de

Homepage: <https://www.tuhh.de/crem>

Unveiling the Biochar Potential: Lowering Greenhouse Gas Emissions across the Biogas Supply Chain

Abstract: *The carbon-rich material known as biochar is the product of pyrolysis – a thermochemical conversion of biomass in the absence of oxygen. Given its characteristics, including long-term stability and sorption capacity, biochar has received increasing attention as a promising tool for addressing climate change and enhancing the production of biogas. This work combines both functions by examining, through different application scenarios, the potential role of biochar in mitigating greenhouse gas (GHG) emissions across the biogas supply chain. The wood-derived and high pyrolyzed biochar CarboFerm® was used as an example biochar for application in four different scenarios:*

(1) Application to soil without fertilizer, (2) application to soil with fertilizer, (3) application to biogas fermenter, (4) application to digestate treatment. The GHG mitigation was calculated by applying the methodology of the Renewable Energy Directive II (RED II). The scenario comparison resulted in GHG mitigation effectiveness of 0.03, 0.01, 0.06, and 0.03 g CO₂eq / MJ biogas / t biochar, respectively. Thus, this study recommends using biochar in biogas fermenters and subsequently applying the biochar-enriched digestate to agricultural soil to reduce GHG emissions from biogas production. Furthermore, it is suggested that the mitigation potential of biochar may not be fully recognized in the RED, potentially resulting in an underestimation of its effectiveness.

1 Introduction

The carbon-rich material known as biochar is described as “a solid material obtained from thermochemical conversion of biomass in an oxygen-limited environment”(IBI 2015). Biochar properties can vary significantly with the choice of biomass and pyrolysis temperature (Tomczyk, Sokółowska, and Boguta 2020). Biochar’s most prominent characteristic is its stability. The pyrolysis process converts biomass, which may be decomposed within relative short time, into a long-lasting material, which can persist in soils for centuries (Wang, Xiong, and Kuzyakov 2016). The stability of carbon-structures in the biochar prevents carbon (C) being converted into CO₂ by microbial mineralization and released as a GHG into the atmosphere. By applying biochar to soils, significant contributions can be made to C sequestration in terrestrial C sinks (Wang, Xiong, and Kuzyakov 2016). Therefore, biochar has been described as a C negative technology (Smith 2016). Furthermore, biochars may exhibit characteristics such as high porosity and sorption capacity. Both of those characteristics make biochar a viable additive to anaerobic digestion (AD) for enhancing the production of biogas (Osman et al. 2022).

In the last decades the ever-growing pressure of climate change made it crucial to engage in a transition away from fossil fuels towards renewable energy sources. Estimates suggest that biogas and biomethane production could potentially reduce global GHG emissions by 3.29-4.36 Gt of CO₂eq, which is equivalent to approximately 7-9% of current anthropogenic GHG emissions (Chiappero, Fiore, and Berruti 2022). However, the production of biogas itself is associated with GHG emissions. Consequently, the European Union (EU) has established thresholds in the RED II, specifying the required reduction in GHG emissions achieved through biogas production and utilization. This is supposed to ensure the sustainability of biogas production in terms of GHG emissions. The savings are measured by comparing the use of a biomass fuel (e.g., biogas) in relation to their fossil fuel comparators (e.g., natural gas). This determines the extent to which biogas reduces GHG emissions when replacing fossil fuels. According to the RED II the thresholds apply to all operators whose plants have a total rated thermal ≥ 2 MW and started operating after 01.01.2021. The directive defined a GHG emission saving threshold of 70% for plants that started operating from 01.01.2021 (EC 2018). Plants that started operating after 20.11.2023 must comply with an 80% GHG emission saving threshold. Facilities that started operating before 01.01.2021 must comply with a threshold of 80% GHG emission savings 15 years after they started operating, but earliest 01.01.2026 (EC 2023).

This study was conducted to explore potential approaches for utilizing biochar, a C negative technology, for mitigating GHG emissions associated with biogas production.

2 Methods

Primary data on used substrates per year were collected from an example biogas facility. Standard values on the substrates' characterization and GHG emissions associated with their cultivation were extracted from multiple sources (KTBL 2023; Moosmann et al. 2022; BioGrace 2021; FNR 2016). The RED II methodology was used for the quantification of GHG emission associated with the production of biogas. Considered GHG emission categories from the RED II methodology were emissions from, cultivation and extraction (e_{ec}), transport and distribution (e_{td}), processing (e_p), and fuel in use (e_u). Additionally, GHG emission savings through soil C accumulation were considered (e_{sca}). e_{ec} , e_{td} , and e_{sca} are substrate-dependent, while e_p and e_u are substrate-independent. All emissions and savings are expressed in g CO₂eq MJ⁻¹. A baseline scenario was established by using the data on the substrates in conjunction with the RED II methodology. Furthermore, four scenarios for the application of biochar within the biogas supply chain were established: (1) Application to soil without fertilizer, (2) application to soil with fertilizer, (3) application to biogas fermenter, (4) application to digestate treatment (Fig.1). Scenario 2 explored the mitigation of soil N₂O emissions. Only N₂O emissions from the cultivation of maize were considered, due to a lack of data on the other substrates. The wood-derived and high pyrolyzed biochar CarboFerm® was used as an example biochar, since the GHG mitigation potential of biochar can vary strongly with its characteristics. Relevant literature concerning each scenario was reviewed to reveal potential GHG mitigation mechanism, which could be triggered through the application of CarboFerm®. Findings extracted from the literature review were employed in tandem with the RED II methodology. Finally, an attempt was made to quantify the GHG mitigation potential of CarboFerm® in each scenario in the most accurate way according to primary data and literature values.

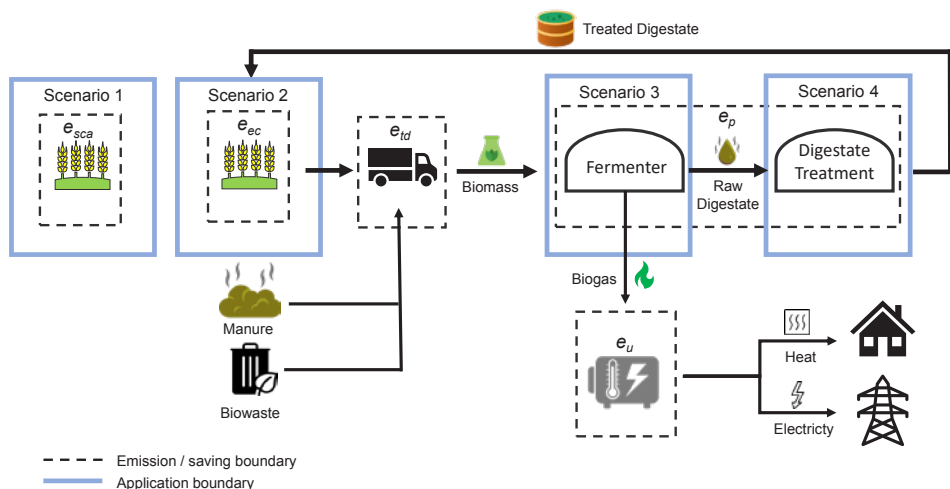


Fig. 1: Biogas supply chain with emission categories (e_{ec} , e_{td} , e_p , and e_u), saving category (e_{sca}), and biochar application scenarios 1-4. Scenario 1 assumes a biochar application to agricultural soil without fertilizer and examines a reduction in emissions through the accumulation of soil carbon, which is accounted for in e_{sca} . Scenario 2 assumes a biochar application to agricultural soil with fertilizer and examines the potential reduction of emissions from cultivation (e_{ec}). Scenario 3 assumes a biochar application to the fermenter and examines the potential of emission reduction through process enhancement and higher energy yield. Scenario 4 assumes a biochar application to the digestate treatment and examines a reduction through fertilizer treatment prior to its application to the soil. (Visual data was retrieved from <https://icons8.de/>).

3 Results

The utilized substrates in the example biogas plant were maize (16404 t), chicken manure (5479 t), pig manure (5221 t), grain as whole-plant-silage (WPS) (1829 t), sugar beet (1121 t), and grain in form of grounded seeds (20 t). The emission savings (e_{sca}) in the baseline scenario only applied to pig and chicken manure, as the use of manure as substrate for AD comes with an emission saving bonus of $-45 \text{ g CO}_2\text{eq MJ}^{-1}$ or $-54 \text{ kg CO}_2\text{eq (t FM)}^{-1}$ (EC, 2018). This resulted in a final value of $20.38 \text{ g CO}_2\text{eq MJ}^{-1}$ for the produced biogas. When compared to the fossil fuel comparator's value of $183 \text{ g CO}_2\text{eq MJ}^{-1}$, savings of 79.82% and 83.63% were identified for the produced electricity and heat, respectively.

In scenario 1, CarboFerm® is assumed to be applied to agricultural soil without the addition of fertilizer. The accumulation of soil C through the cultivation of a substrate leads to an e_{sca} value for the corresponding substrate. The quantification of the potential of CarboFerm® on soil C accumulation is based on its EBC-certified C-sink potential (EBC 2020). The expected increase in soil C, 10 years after the of application of CarboFerm® (EC 2022) is assumed to be $2.82 \text{ t CO}_2\text{eq (t FM)}^{-1}$. This considers the 7.6% moisture content of CarboFerm®, an assumed transport distance of 500 km between pyrolysis plant and biogas facility, and an annual degradation rate of 0.3% (EBC 2020). The current amount of CarboFerm® used by the biogas facility is

26.07 t FM a⁻¹. If those are applied to the soil for the use of soil C accumulation, a GHG reduction of 0.74 g CO₂eq MJ⁻¹ would be reached. This would lead to a final value of 19.64 g CO₂eq MJ⁻¹ and emission saving values of 80.56% and 84.23% for generated electricity and heat, respectively.

Scenario 2 assumed a combined application of CarboFerm® and fertilizer. In this scenario CarboFerm® is examined for its potential impact on the GHG emission category e_{ec} by directly mitigating soil borne N₂O emissions. Findings from the literature regarding biochar's impact on soil N₂O and NH₃ emissions were applied to the methodology for measuring soil borne N₂O emissions (IPCC 2006), which was adopted by the EU (EC 2022). According to the literature findings, a 38% reduction of N₂O emissions from inorganic fertilizer (Borchard et al. 2019) and a 30% reduction of NH₃ emissions from overall fertilizer use (Liu et al. 2018) were assumed through the application of CarboFerm®. However, N₂O emissions were found to be only significantly affected at higher biochar application rates (10–20 t ha⁻¹) (Borchard et al. 2019). Thus, an application rate of 15 t ha⁻¹ CarboFerm® was assumed. This resulted in a total amount of 5468 t of CarboFerm® being applied to the cultivation area of maize and would subsequently lead to an e_{sca} value of 220.39 g CO₂eq MJ⁻¹. However, the maximum e_{sca} value, that can be claimed annually through the application of biochar, is capped at 45 g CO₂eq MJ⁻¹ (EC 2022). This value would be already reached at an applied amount of 1285.65 t CarboFerm®. This limits scenario 2 and resulted in a final value of -11.83 g CO₂eq MJ⁻¹ with saving values of 111.72% and 109.50% for generated electricity and heat, respectively.

Scenario 3 assumes the application of CarboFerm® into the fermenter as an additive to AD. In this scenario GHG emission reduction relies on AD process enhancement and thus a higher yield in CH₄, while the input material and associated GHG emissions remain the same. This subsequently changes the GHG emission to energy output ratio (g CO₂eq MJ⁻¹). Moreover, this scenario envisions the subsequent application of the remaining digestate as fertilizer at a later stage in the supply chain. It is assumed that all CarboFerm® will be retained within the digestate, subsequently transforming CarboFerm® into a C sink when utilized alongside the digestate as fertilizer in agricultural soil. The quantification of this scenario was done through comparison of the estimated energy output according to substrate data (KTBL, 2023) and the actual energy output retrieved through primary data from the example biogas plant. The comparison showed a 6.18% higher energy yield than predicted by KTBL (2023). This increase is assumed to be related to the application of CarboFerm® and thus reduces the GHG emission to MJ ratio of the substrate-specific emission categories e_{ec} and e_{fd} . Furthermore, an e_{sca} value due to soil C accumulation, as presented in scenario 1, was considered. This resulted in a final value of 18.85 g CO₂eq MJ⁻¹ and emission savings for generated electricity and heat of 81.33% and 84.86%, respectively.

In scenario 4 CarboFerm® is assumed to be applied to the digestate treatment, aiming to mitigate GHG emissions during the treatment process. According to primary data the biogas facility was left with 6135 t of solid digestate after AD of the substrates. A total amount of 920.25 t of CarboFerm® is assumed to be applied to the composting process of the 6135 t of solid digestate, to reach the recommended application rate of 15% (Zhou et al. 2022). However, the quantification of this scenario was very limited since, the scope of the RED II methodology does not include GHG emissions from digestate treatment (Moosmann et al. 2022). Nevertheless, implementing a biochar-enriched composting method to treat digestate, followed by its subsequent application as a fertilizer in agricultural soil, would lead to the development of a biochar-based C sink. Thus, it is assumed that in this scenario the GHG mitigation potential for CarboFerm® would be limited to its mere C-sink potential. Therefore, it only differs from

scenario 1 due to the increased amount of applied CarboFerm®. This resulted in a final value of $-5.76 \text{ g CO}_2\text{eq MJ}^{-1}$ and emission savings of 105.71% and 104.63% for generated electricity and heat, respectively.

A comparison was made to examine the effectiveness for GHG emission mitigation per applied tonne of CarboFerm® in each scenario. This was necessary since different scenarios required varying amounts of CarboFerm® to trigger specific mitigation mechanisms. The scenario comparison (Table 1) showed that the GHG emission mitigation potential per t CarboFerm® was highest in scenario 3. This was due to the utilization of multiple mitigation mechanisms, while also requiring lower amounts of CarboFerm® to trigger those mechanisms. Scenario 2 was most ineffective, as a high amount of CarboFerm® was needed to trigger the explored mitigation mechanism. Furthermore, it by far exceeded the maximum amount of biochar which can be used for increasing the e_{sca} value. The effectiveness in scenario 1 and scenario 4 did not differ, due to the lack of accountability of the explored mitigation mechanisms in scenario 4.

Table 1: Comparison of the baseline scenario and scenarios 1-4 in terms of total amount of CarboFerm® applied (t), final value (g CO₂eq / MJ), GHG emission mitigation (g CO₂eq / MJ), and GHG mitigation effectiveness per t of applied CarboFerm® (g CO₂eq / MJ / t)

Scenario	CarboFerm® amount applied (t)	Final value (g CO ₂ eq / MJ)	GHG emission mitigation (g CO ₂ eq / MJ)	GHG mitigation effectiveness (g CO ₂ eq / MJ / t)
Baseline	0	20.38	0	0
1	26.07	19.64	0.74	0.03
2	5468	-11.83	32.21	0.01
3	26.07	18.85	1.52	0.06
4	920.25	- 5.76	26.14	0.03

4 Discussion

The results showed that the application of biochar, such as CarboFerm®, can effectively mitigate GHG emissions associated with the generation of biogas and thus make it a more sustainable source of renewable energy. However, it is important to note that the RED II methodology considers GHG emissions as the sole indicator for sustainability of biogas. As such, additional assumptions regarding the overall sustainability of biogas are constrained by the scope of this study. The reviewed literature indicated that biochar is a long-lasting C-rich material, which can be used as an effective tool for mitigating climate change through a variety of different mechanisms throughout the biogas supply chain. However, so far, the RED II does not consider biochar as a means for GHG emission mitigation apart from its use for soil C accumulation. Thus, the influence of biochar is officially only accountable within the emission saving category e_{sca} . Other biochar-induced mitigation mechanisms, such as the mitigation of N₂O emissions or the enhancement of AD productivity, are not directly considered within the

RED II calculation. Consequently, the role of biochar in the RED II could be considered as underestimated. However, as biochar and its mitigation mechanisms are still subject to research and impacted by a variety of different variables, it may be difficult to establish clear regulations on those mechanisms for GHG emission mitigation at this point. It needs to be emphasized that the calculations carried out in this study are primarily based on assumptions rather than actual values based on primary data. For instance, the effect of CarboFerm® on emission savings (e_{sca}), first introduced in scenario 1, is entirely based on assumed soil C accumulation through CarboFerm®'s EBC-based C-sink potential.

The scenario comparison found scenario 3 to be the most effective scenario. This was due to the use of the two mitigation mechanisms of AD process enhancement and establishment of a biochar-based C sink, of which AD process enhancement contributed most to the mitigation of GHG emissions per produced MJ of biogas. To quantify the potential reduction in GHG emissions due to AD process enhancement, it was assumed that the increased energy yield was attributed to the use of CarboFerm®. This allowed the illustration of the potential emission mitigation in this scenario. However, it needs to be emphasized that this scenario as well is solely based on the assumed relation between higher energy yield and application of CarboFerm®. While data from KTBL (2023) initially suggested a lower biogas production and energy yield than observed, the actual biogas yield still falls within the expected range for the given feedstocks. Although there is a possibility that the increased energy yield is associated with the application of CarboFerm®, this connection has not been conclusively demonstrated.

5 Conclusion

This study emphasizes the effectiveness of biochar in mitigating GHG emissions across the entire biogas supply chain, thereby strengthening the position of biogas as a sustainable renewable energy source. However, current regulations narrowly focus solely on the mitigation mechanism of soil C accumulation, potentially underestimating biochar's overall mitigation potential. Among the various mitigation mechanisms identified, the application of biochar to AD systems emerged as particularly beneficial, as it harnesses a synergistic relationship between climate change mitigation and enhancement of renewable energy production. Nevertheless, biochar-induced mechanisms, specifically in AD systems, remain incompletely understood, underscoring the importance of further research to optimize its application, and unlocking further potential. Future investigations should prioritize refining biochar application in AD systems as well as exploring its combination with organic fertilizers, aiming to enhance renewable energy production and facilitate the implementation of a circular economy.

References

- BioGrace. 2021. *BioGrace II Calculation Rules. Harmonised Greenhouse Gas Calculations for Electricity, Heating and Cooling from Biomass* (version 4a). www.biograce.net.
- Borchard, Nils, Michael Schirrmann, Maria Luz Cayuela, Claudia Kammann, Nicole Wrage-Mönnig, Jose M. Estavillo, Teresa Fuertes-Mendizábal, et al. 2019. Biochar, Soil and Land-Use Interactions That Reduce Nitrate Leaching and N₂O Emissions: A Meta-Analysis. *The Science of the Total Environment* 651 (Pt 2): 2354–64.

- Chiappero, Marco, Silvia Fiore, and Franco Berruti. 2022. Impact of Biochar on Anaerobic Digestion: Meta-Analysis and Economic Evaluation. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 10 (6): 108870.
- EBC. 2020. *Certification of the Carbon Sink Potential of Biochar*. Version 2.1E of 1st February 2021. Arbaz, Switzerland: Ithaka Institute.
- EC. 2018. Directive (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources. *Official Journal of the European Union* L 328: 82–209.
- EC. 2022. COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2022/996 on Rules to Verify Sustainability and Greenhouse Gas Emissions Saving Criteria and Low Indirect Land-Use Change-Risk Criteria." *Official Journal of the European Union* L 168.
- EC. 2023. DIRECTIVE (EU) 2023/2413 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 October 2023 Amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as Regards the Promotion of Energy from Renewable Sources, and Repealing Council Directive (EU) 2015/652. *Official Journal of the European Union*
- FNR. 2016. *Leitfaden Biogas*. Vol. 7. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR).
- IBI. 2015. Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil. *Int. Biochar Initiat.*
- IPCC. 2006. Chapter 11: N₂O Emissions from Managed Soils, and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application. In *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*, edited by Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. Japan: IGES.
- KTBL. 2023. Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas. Version: Kuratorium Für Technik Und Bauwesen in Der Landwirtschaft e.V. 2023. <https://daten.ktbl.de/biogas/startseite.do?zustandReq=1&selectedAction=sowMonA#start>.
- Liu, Qi, Yanhui Zhang, Benjuan Liu, James E. Amonette, Zhibin Lin, Gang Liu, Per Ambus, and Zubin Xie. 2018. How Does Biochar Influence Soil N Cycle? A Meta-Analysis. *Plant and Soil* 426 (1): 211–25.
- Moosmann, David, Stefan Rauh, Nadja Rensberg, and Stefan Majer. 2022. ZertGas - Implementierung der RED II und Entwicklung von praktikablen Zertifizierungslösungen und Handlungsoptionen für Betreiber von Biogas- und Biomethananlagen. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum.
- Osman, Ahmed I., Sameer Fawzy, Mohamed Farghali, Marwa El-Azazy, Ahmed M. Elgarahy, Ramy Amer Fahim, M. I. A. Abdel Maksoud, et al. 2022. Biochar for Agronomy, Animal Farming, Anaerobic Digestion, Composting, Water Treatment, Soil Remediation, Construction, Energy Storage, and Carbon Sequestration: A Review. *Environmental Chemistry Letters* 20 (4): 2385–2485.
- Smith, Pete. 2016. Soil Carbon Sequestration and Biochar as Negative Emission Technologies. *Global Change Biology* 22 (3): 1315–24.
- Tomczyk, Agnieszka, Zofia Sokołowska, and Patrycja Boguta. 2020. Biochar Physicochemical Properties: Pyrolysis Temperature and Feedstock Kind Effects." *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 19 (1): 191–215.
- Wang, Jinyang, Zhengqin Xiong, and Yakov Kuzyakov. 2016. Biochar Stability in Soil: Meta-analysis of Decomposition and Priming Effects. *Global Change Biology. Bioenergy* 8 (3): 512–23.
- Zhou, Shunxi, Fanlong Kong, Lun Lu, Ping Wang, and Zhixiang Jiang. 2022. Biochar - An Effective Additive for Improving Quality and Reducing Ecological Risk of Compost: A Global Meta-Analysis. *The Science of the Total Environment* 806 (Pt 4): 151439.

Nils Jansen, Christian Abendroth

Contact

M.Sc. Nils Jansen, akademischer Mitarbeiter / Projektmitarbeiter

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg / LUCRAT GmbH

e-Mail: nils.jansen@b-tu.de / n.jansen@lucrat.de

Hygienisches Nährstoffrecycling durch thermophile Kompostierung von Trockentoiletteninhalten

Abstract: Das Projekt *zirkulierBAR* untersucht das Potenzial der Kompostierung von menschlichen Ausscheidungen aus Trockentoiletten als wertvolle Ressource im nachhaltigen regionalen Nährstoffkreislauf. Hierfür werden in der Region Barnim Methoden zur Herstellung hygienisch sicherer Recyclingdünger erforscht, wobei soziale Akzeptanz, rechtliche Aspekte und die technische Integration in die kommunale Abfallwirtschaft berücksichtigt werden. Forschende des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) und der Technischen Universität Berlin (TUB) wenden den Standard DIN SPEC 91421:2020 an, um den Gehalt an Nährstoffen, Schwermetallen, organischen Schadstoffen sowie Hygieneparameter zu bewerten. Vorläufige Ergebnisse zeigen eine effektive Entfernung von Krankheitserregern und Verunreinigungen während des zweistufigen Verwertungsprozesses, wobei eine signifikante Reduktion von Bakterienzahlen festgestellt wurde. Es bestehen Optimierungsmöglichkeiten in den Prozessbedingungen und Probenahme-Methoden. Der hergestellte organisch-mineralische Dünger entspricht den geforderten Grenzwerten, bedarf jedoch regulatorischer Anpassungen zur Einbeziehung in Düngemittelvorschriften.

1 Einleitung

Nachhaltiges Management von Nährstoffen ist ein wichtiger Schwerpunktbereich für Forschung und Politik. Viele der derzeitigen Agrarpraktiken haben schädliche Auswirkungen auf die Umwelt, und die Notwendigkeit, den künftigen Zugang zu Düngemitteln sicherzustellen, drängt sich zunehmend auf. Systemanalysen haben wiederholt eine bedeutende, aber oft übersehene Ressource für den Nährstoffkreislauf identifiziert: Sanitärrückstände (Krause et al., 2021a). Insbesondere getrennt gesammelte menschliche Ausscheidungen aus Trockentoiletten gelten als wertvolle Ressource für die integrierte Rückgewinnung von Phosphor, Stickstoff und anderen Nährstoffen in einer regionalen Kreislaufwirtschaft zwischen Landwirtschaft und Konsument:innen. Durch die Nutzung der Inhalte aus Trockentoiletten können der Nährstoff- und Wasserverbrauch reduziert, die Treibhausgasemissionen verringert und die Pflanzenproduktion gesteigert werden (Kraus et al., 2019). Die Minimierung von Krankheitserregern für einen hygienischen Umgang mit den Recyclingdüngern stellt eine bedeutende Voraussetzung für diese Nutzung dar und wurde bereits in anderen Studien nachgewiesen (Häfner et al., 2023).

In der Region Barnim (Brandenburg) wird im Rahmen des Projekts *zirkulierBAR* ein Kreislaulabor zur Herstellung von hygienisch unbedenklichem und qualitätsgesichertem Recyclingdünger, einschließlich Kompost aus festen Materialien und Flüssigdünger aus Urin, eingerichtet. Praktiker:innen entwi-

ckeln technische Elemente, um Trockentoiletten und die anschließende Verwertung der gesammelten Inhalte in die kommunale Abfallwirtschaft zu integrieren. Das Projekt untersucht die landwirtschaftlichen, ressourcenbezogenen und sozioökonomischen Anforderungen für die Ausweitung dieses Ansatzes. Darüber hinaus werden die soziale und politische Akzeptanz für die Herstellung von Recyclingdünger aus Trockentoiletteninhalten und deren anschließende Anwendung in der Landwirtschaft evaluiert. Das Projekt *zirkulierBAR* wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Programms *REGION.innovativ* gefördert.

2 Methodik

2.1 Umfassende Analyse und Validierung der Verwertungsmethoden

Forschende des DBFZ und der TUB führen seit 2021 Materialanalysen durch und validieren Analysemethoden, um den Kompostierungsprozess und die Produktqualität zu überwachen. Die erste Kampagne (Untersuchung von fünf Kompostmieten mit je ca. 50 m³) fand von Juli 2021 bis Dezember 2022 in der Pilotanlage der Finizio GmbH und der Kreiswerke Barnim in Eberswalde statt. Eine zweite Kampagne mit weiteren sieben Mieten in 2023 wird derzeit ausgewertet. Der angewandte Kompostierungsprozess besteht aus zwei Schritten: (1) Wärmebehandlung durch aktive Belüftung und mikrobielle Aktivität in einem isolierten und belüfteten Behälter für mindestens sieben Tage bei 70 °C und (2) thermophiler Kompostierungsprozess in offenen Mieten für acht bis zehn Wochen. Die trockene Toiletteninhalte bestehen aus Fäkalien sowie Toilettenpapier und Strohhäcksel, die durch Urin als Perkolat befeuchtet werden. Sie machen etwa die Hälfte der Anlage aus und stammen von Trockentoiletten, die auf verschiedenen Veranstaltungen und öffentlichen Plätzen in Berlin und Brandenburg aufgestellt sind. Weitere Einsatzstoffe für die Kompostanlage sind Stroh und Grünschnitt, Lehmboden sowie Pflanzenkohle in unterschiedlicher Zusammensetzung. Neben der Verwertung der Trockeninhalte wird in einer separaten Aufbereitungsanlage eine Umwandlung von Perkolat und Reinurin zu stickstoffbetontem Flüssigdünger durchgeführt. Mit Hilfe eines Belebtschlammbeckens zur Nitrifikation, gefolgt von einer Aktivkohlefiltration zur Eliminierung wasserlöslicher Arzneimittelrückstände und einer Destillationsanlage zur Entwässerung und Entkeimung wird ein Flüssigdünger hergestellt. Eine angepasste Probenahme- und Analysestrategie für die Flüssigsubstrate ist derzeit in Arbeit.

2.2 Überwachung des Reifungsprozesses von Kompost und Qualitätssicherungsmaßnahmen

Nach dem Ansetzen wird der Kompost in zunächst kürzeren (1-2 Tage) und später längeren Abständen maschinell gewendet, regelmäßig bewässert und unter einem atmungsaktiven Gewebe gelagert. Temperatur und Kohlendioxidgehalt des Substrats werden gemessen, bis es alle physikalischen, optischen und olfaktorischen Kriterien eines reifen Komposts erfüllt. Die repräsentative Beprobung der Eingangs- und Ausgangssubstrate erfolgt nach der offiziellen Verfahrensrichtlinie LAGA PN 98 (LAGA, 2004). Dazu werden 12 gleichmäßig auf dem Haufen verteilte Proben von je einem Kilogramm gesammelt, auf einer Plane vereinigt und anschließend zerkleinert. Methodisch wird der Standard DIN SPEC 91421:2020 angewendet, der entwickelt wurde, um bestehende Regelungslücken für die Herstellung und Verwendung von qualitätsgesichertem Recyclingdünger aus Trockentoiletten zu schließen. Neben den allgemeinen physikalischen Eigenschaften des Produkts werden u.a. die Gehalte an Nährstoffen, Schwermetallen, organischen Schadstoffen sowie Hygieneparameter und pharmazeutische Kontaminanten analysiert, um die

Qualität und Eignung der Recyclingprodukte als Düngemittel zu beurteilen und zu sichern (DIN SPEC 91421, 2020). Die Norm wird im Hinblick auf ihre Umsetzung in der Praxis überprüft und kontinuierlich weiterentwickelt, um die Methodik und die festgelegten Grenzwerte an die realen Bedingungen anzupassen.

3 Vorläufige Ergebnisse

Die angewandte Kompostierungsmethode und die Materialien bilden einen festen Dünger, der den Boden mit ausreichenden und pflanzenverfügbaren Makro- und Mikronährstoffen versorgt (durchschnittlich 1,65 % TM Gesamtstickstoff, 1,77 % TM Gesamtphosphat, 1,44 % TM Gesamtkaliumoxid). Weiterhin können die Entfernung aller relevanter Schadstoffe und pharmazeutischer Rückstände sowie der meisten Krankheitserreger nachgewiesen werden. Enterokokken, Escherichia coli und Salmonellen sind im Düngemittelprodukt nicht oder nur in vernachlässigbaren Spuren nachweisbar. Zwei von fünf Probenahmekampagnen zeigen jedoch erhöhte Werte bezüglich des anaeroben, sporenbildenden, pathogenen Bakteriums Clostridium perfringens (<10 und 1.500 KBE/g FM, Überschreitung des Grenzwertes von 0 KBE/g FM aus DIN SPEC 91421:2020). Bezüglich der somatischen Coliphagen kann noch keine Aussage über die Hygienisierungsleistung getroffen werden, da in Europa bisher kein akkreditiertes Labor für die Analyse dieses Parameters zur Verfügung steht.

4 Diskussion

Optimierungspotenziale für den Prozess der Verwertung von Trockentoiletteninhalten wurde insbesondere hinsichtlich des Rohstoffverhältnisses, des Umfangs der Bewässerung und der allgemeinen Standortbedingungen identifiziert. Ein entscheidender Faktor ist die Minimierung der anaeroben Zonen im Prozess durch eine ausreichende Belüftung, die durch eine glattere und stärker geneigte Unterkonstruktion erreicht werden könnte. Die Umstellung auf ein halbautomatisches, mehrstufiges, niederschlagsunabhängiges Humusregal anstelle der Kompostierung auf Betonplatten soll in den kommenden Monaten hierbei Abhilfe schaffen. Für die Beprobung der Ausgangssubstrate stellt die Inhomogenität der Inputmaterialien eine Herausforderung dar. Es müssen noch geeignete Probenahmegeräte und -verfahren entwickelt werden, um eine gleichzeitig repräsentative und arbeitsschutzgerechte Probenahme zu gewährleisten.

Die Gehalte an Nähr- und Fremdstoffen entsprechen der Düngemittelverordnung (DüMV) sowie der Bioabfallverordnung (BioAbfV) und zeigen ein Produkt, das die Nachfrage nach nährstoffreichen, bodenverbessernden Düngemitteln in der landwirtschaftlichen Anwendung bedienen könnte (vgl. Häfner et al., 2023). Der fertige Kompost dient als organisch-mineralischer Dünger, dessen Stickstoffgehalt vermutlich durch die Zugabe von Urin während des Kompostierungsprozesses oder die Kombination von flüssigem und festem Dünger später auf dem Feld noch erhöht werden könnte. Die Wechselwirkungen dieser Stoffe und die Auswirkungen auf die Ernteergebnisse müssten jedoch noch untersucht werden.

Erste Vergleiche der Input- und Output-Substrate des Kompostierungsprozesses zeigen eine deutliche Reduktion der Gesamtkeimzahl und relevanter Hygieneparameter. Diese Veränderung wurde auch bei früheren mikrobiellen Analysen von Salmonellen und E. coli aus der thermophilen Kompostierung von

menschlichen Fäkalien beobachtet (Werner et al., 2022; Krause et al., 2021b). Weitere Untersuchungen und eine bewusste Keimbeimpfung des Rohsubstrats würden weitere Erkenntnisse über die Effizienz des zirkulierBAR-Verfahrens ermöglichen. Sporen von *C. perfringens* können gegenüber höheren Temperaturen resistent sein, sodass es auch bei sorgfältiger Prozessführung zu einer Wiederbesiedlung in anaeroben Zonen kommen kann. Die Überschreitung des Grenzwerts für *C. perfringens* von 0 KBE/g FM erscheint sehr naheliegend, da das Bakterium in der Natur allgegenwärtig ist und als normaler Bestandteil verrottender Biomasse gefunden werden kann (Kiu und Hall, 2018). Daher stellt das Forschungsteam seine Eignung als Dekontaminationsindikator in anstehenden Überarbeitungen der DIN SPEC 91421 in Frage.

Insbesondere im Hinblick auf den Recycling-Dünger als Ersatz für Klärschlamm und synthetischen Dünger sprechen die Ergebnisse der Qualitätsanalyse für einen Einsatz in der landwirtschaftlichen Praxis. Die Ausweitung der rechtlichen Definition von „Bioabfall“ auf menschlichen Urin und Fäkalien sowie die Aufnahme menschlicher Ausscheidungen in die Düngemittelverordnung wären notwendige politische Schritte, um diese Kreislauflösung zu verwirklichen. Nach den vorläufigen Erkenntnissen ermöglicht die getrennte Sammlung menschlicher Ausscheidungen eine gezielte Behandlung konzentrierter Abfallströme und bietet das Potenzial, Nährstoffdefizite in Böden auszugleichen, doch müssen die derzeitigen rechtlichen Hürden angepasst werden, um eine kommerzielle Handhabung und Verwendung als Recycling-Dünger zu ermöglichen.

Literatur/Quellen

- DIN SPEC 91421:2020-12 (2020): Qualitätssicherung von Recyclingprodukten aus Trockentoiletten zur Anwendung im Gartenbau. Deutsches Institut für Normung e.V.
- Häfner, F., Monzon, Diaz O.R., Tietjen, S., Schröder, C. and Krause, A., (2023): Recycling fertilizers from human excreta exhibit high nitrogen fertilizer value and result in low uptake of pharmaceutical compounds. *Front. Environ. Sci.* 10:1038175.
- Kiu, R., Hall, L. J., (2018): An update on the human and animal enteric pathogen *Clostridium perfringens*. *Emerging Microbes & Infections.* 7 (141): 141.
- Krause, A., von Hirschhausen, C., Schröder, E., Augustin, F., Häfner, F., Bornemann, G., Sundermann, G., Korduan, J., Udert, K.M., Deutsch, L., Reinhardt, M.L., Götzenberger, R., Hoffmann, S., Becker-Sonnenschein, S., (2021a): Ressourcen aus der Schüssel sind der Schlüssel – Wertstoffe zirkulieren, Wasser sparen und Schadstoffe eliminieren. Diskussionspapier zur Sanitär- und Nährstoffwende. Berlin, Hamburg, Zürich
- Krause, A., Häfner, F., Augustin, F., et al.. (2021b): Qualitative Risk Analysis for Contents of Dry Toilets Used to Produce Novel Recycling Fertilizers. *Circ.Econ.Sust.* 1, 1107–1146.
- Kraus, F., Zamzow, M., Conzelmann, L., Remy, C., Kleyböcker, A., Seis, W., Mieke, U., Hermann, L., Kabbe, C., (2019): Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung. Umweltbundesamt. ISSN 1862-4804
- Landesarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), (2004): LAGA PN 98 - Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen. Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz.

Werner, K.A., Poehlein, A., Schneider, D., El-Said, K., Wöhrmann, M., Linkert, I., Hübner, T., Brüggemann, N., Prost, K., Daniel, R. and Grohmann, E. (2022): Thermophilic Composting of Human Feces: Development of Bacterial Community Composition and Antimicrobial Resistance Gene Pool. *Front. Microbiol.* 13:824834.

Kontakt

Elsa Jung, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Technische Universität Berlin

Tel.-Nr. +4930 - 314 70109

E-Mail: e.jung@tu-berlin.de

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

Methodenentwicklung zur digitalen Abfallanalytik für nicht gefährliche gemischte Gewerbeabfälle

Abstract: Aufwand und Kosten für Laboranalysen zur Qualitätsbestimmung von Ersatzbrennstoffen sind ein wesentlicher Anreiz für ein System zur sensorischen Echtzeitqualitäts-sicherung, welche mit digitaler Abfallanalytik erreicht werden kann. Damit das effektiv und effizient funktioniert, müssen sich Anlagen dorthin entwickeln, Abfälle auf Partikelebene zu charakterisieren, autonom in Echtzeit auf sie zu reagieren und produzierte Qualitäten und auftretende Abweichungen frühzeitig zu erkennen und zu beeinflussen. Der Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben hat die Forschungsanlage Digital Waste Research Lab zur Charakterisierung und Sortierung von Schüttgütern in Betrieb genommen. Die Anlage ist neben geschwindigkeitsvariabler und teilweise mobiler Fördertechnik mit unterschiedlichen Sensoren zur Materialcharakterisierung ausgestattet und soll unter anderem zur digitalen Materialanalyse genutzt werden. Hierfür gilt es, Methoden zu entwickeln, damit konventionelle Laboranalysen ergänzt und bis zu einem gewissen Grad ersetzt werden können. Erste Versuche befassen sich mit einem Konzept zur geeigneten Vereinzelung des Materialstromes am Analyseband und der Beschreibung des Zusammenhangs zwischen händischer und sensorischer Sortieranalyse.

1 Einleitung

Probenahmen mit anschließenden Materialanalysen (Sieb-, Sortier-, chemische Analysen) sind essenzieller Bestandteil zur Bestimmung von Qualitätsparametern (z.B. Korngrößenverteilungen, Zusammensetzung, chem. Parameter etc.) von Abfällen. Besonders relevant ist eine gesicherte Qualitätsbestimmung beispielsweise bei Ersatzbrennstoffen und Rezyklaten, da diese definierte Kriterien erfüllen müssen, um für den geplanten Zweck eingesetzt werden zu dürfen bzw. (ideal) eingesetzt werden zu können. Zusätzlich ist eine Materialanalyse auch für die Bewertung von Prozessverhalten in einer Anlage relevant, um Einflüsse von Maschineneinstellung und Material bewerten zu können. Speziell im Bereich gemischter Abfälle ist der Aufwand einer repräsentativen Materialanalyse durch die Inhomogenität des Materials (Aldrian 2017; Khodier et al. 2020) sehr hoch. Mit der fortschreitenden technologischen Entwicklung im Bereich der Sensortechnik zur Materialcharakterisierung sowie Aufwand und Kosten, welche mit der repräsentativen Probenahme und Analyse einhergehen (Aldrian 2017), ist eine automatisierte Materialanalyse ein wesentlicher Anreiz für eine digitale Abfallanalytik.

In den letzten Jahren ist in der Abfallwirtschaft ein Trend in Richtung Digitalisierung erkennbar, wodurch Daten über Materialien, Maschinen und Prozesse ein unumgänglicher Bestandteil eines Behandlungspro-

zesses in einer Aufbereitungsanlage für feste, gemischte Abfälle werden (Curtis et al. 2021; Khodier et al. 2019; Sarc et al. 2019; Kroell et al. 2022). Sensorische/digitale Materialstromüberwachung findet bereits in mehreren Fällen in realen abfallwirtschaftlichen Anlagen Anwendung, um Prozesse zu digitalisieren und Vorgänge mit Daten zu beschreiben (Kroell et al. 2023; Kroell et al. 2024; Kroell et al. 2021; Kandlbauer und Sarc 2023). Dabei sind aktuell vor allem Nahinfrarot (NIR)-Sensoren im Einsatz, um die Zusammensetzung eines Materialstromes zu erfassen. Zusätzlich erlaubt die NIR-Technologie die Echtzeit-Bestimmung von Parametern für feste Sekundärbrennstoffe (Deutsches Institut für Normung e. V. 2022).

2 Methodik

Die Forschungsanlage Digital Waste Research Lab (DWRL) des Lehrstuhles für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben ermöglicht eine Charakterisierung und Sortierung von Schüttgütern. Die neue Anlage ist neben geschwindigkeitsvariabler und teilweise mobiler Fördertechnik mit unterschiedlichen Sensoren zur Materialcharakterisierung ausgestattet (Kandlbauer et al. 2023) und soll unter anderem zur digitalen Materialanalyse genutzt werden, wofür einheitliche Methoden zu entwickeln sind, damit konventionelle Laboranalysen ergänzt und bis zu einem gewissen Grad ersetzt werden können.

Um die digitale Abfallanalyse im DWRL zu entwickeln, ist es anfänglich notwendig, ein einheitliches (Beschickungs-)Verfahren inkl. definierten Anlagenparametern (Geschwindigkeitseinstellungen für Fördertechnik, maximale Probemenge etc.) zu definieren, damit Materialströme in der Anlage zur sensorischen Analyse sinnvoll am Analyseband vereinzelt werden. Danach soll über praktische Untersuchungen ermittelt werden, wie oft ein Materialstrom bzw. dessen Partikel im Kreislauf vermessen werden muss (wiederholte Charakterisierung des gleichen Materials bzw. Partikel), um ausreichend genaue Ergebnisse für den jeweiligen Anwendungsfall zu erhalten. Im Fokus stehen Untersuchungen mit Modellmischungen aus weniger Materialklassen (z.B. Mischung aus Holz und Kunststoff), sowie aufbauend darauf Szenarien mit gemischten Gewerbeabfällen in unterschiedlichen Korngrößenklassen.

Für die sensorische Überwachung ist NIR-Sensorik sowie eine Farbkamera und ein Volumenstrommesssystem vorgesehen (Kandlbauer et al. 2023).

3 Ausblick

Für Q1/24 sind bereits Versuche geplant, um ein geeignetes Beschickungsverfahren der Anlage inkl. Anlageneinstellungen für unterschiedliche Materialströme zu beschreiben. Daraus sollen Ablaufschemata entwickelt werden, um zukünftig eine digitale Materialanalyse durchführen zu können. Im ersten Schritt sollen aus den sensorischen Ergebnissen der Materialzusammensetzung (NIR-basiert) vergleichend mit den Ergebnissen der händischen Analyse mathematische Zusammenhänge hergestellt werden, welche die manuelle Sortieranalyse hinfällig machen. Dafür ist auch die Integration des Massebezuges von Relevanz (z.B. über Flächengewichte). Weitere Ideen gehen in Richtung Messung der Korngrößenverteilung eines Materialstromes über sensorisch messbare Parameter (vgl. Kandlbauer et al. (2021)), die Messung von Brennstoffparametern (Brennwert, Heizwert) über NIR-Sensorik, sowie Untersuchungen betreffend der Sensorfusion.

Danksagung

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

Literatur/Quellen

- Aldrian, A. (2017): Lösungskonzepte für die Probenahme, Probenaufbereitung und Analytik von grobstückigen und heterogenen festen Abfällen. Dissertation. Montanuniversität Leoben. Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft.
- Curtis, Alexander; Küppers, Bastian; Möllnitz, S.; Khodier, Karim; Sarc, Renato (2021): Real time material flow monitoring in mechanical waste processing and the relevance of fluctuations. In: *Waste Manag* 120, S. 687–697. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.10.037.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2022): DIN 54390:2022-12 Feste Sekundärbrennstoffe - Echtzeit-Bestimmung von Parametern mittels Nahinfrarotspektroskopie.
- Kandlbauer, L.; Khodier, Karim; Ninevski, D.; Sarc, Renato (2021): Sensor-based Particle Size Determination of Shredded Mixed Commercial Waste based on two-dimensional Images. In: *Waste Manag* 120, S. 784–794. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.11.003.
- Kandlbauer, L.; Sarc, R. (2023): Opportunities from sensory retrofitting in mechanical waste treatment plants - real-time quality determination via digital material flow monitoring. In: CISA Publisher (Hg.): *Proceedings SARDINIA 2023*.
- Kandlbauer, Lisa; Sarc, Renato; Pomberger, Roland (2023): Großtechnische experimentelle Forschung im Digital Waste Research Lab und Digitale Abfallanalytik und -behandlung. In: *Österr Wasser- und Abfallw*. DOI: 10.1007/s00506-023-00999-1.
- Khodier, Karim; Curtis, Alexander; Sarc, Renato; Lehner, M.; O'Leary, P.; Pomberger, Roland (2019): Smart Solid Waste Processing Plant Vision and Pathway. Conference Contribution ISWA world congress 2019.
- Khodier, Karim; Viczek, Sandra A.; Curtis, Alexander; Aldrian, A.; O'Leary, P.; Lehner, M.; Sarc, Renato (2020): Sampling and analysis of coarsely shredded mixed commercial waste. Part I: procedure, particle size and sorting analysis. In: *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 17 (2), S. 959–972. DOI: 10.1007/s13762-019-02526-w.
- Kroell, Nils; Chen, Xiaozheng; Greiff, Kathrin; Feil, Alexander (2022): Optical sensors and machine learning algorithms in sensor-based material flow characterization for mechanical recycling processes: A systematic literature review. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 149, S. 259–290. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.05.015.
- Kroell, Nils; Chen, Xiaozheng; Küppers, Bastian; Lorenzo, Julius; Maghmoumi, Abtin; Schlaak, Matthias et al. (2023): Near-infrared-based determination of mass-based material flow compositions in mechanical recycling of post-consumer plastics: Technical feasibility enables novel applications. In: *Resour Conserv Recycl* 191, S. 106873. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.106873.
- Kroell, Nils; Chen, Xiaozheng; Maghmoumi, Abtin; Koenig, Morgane; Feil, Alexander; Greiff, Kathrin (2021): Sensor-based particle mass prediction of lightweight packaging waste using machine learning algorithms. In: *Waste Manag* 136, S. 253–265. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.10.017.

Kroell, Nils; Maghmoumi, Abtin; Dietl, Tobias; Chen, Xiaozheng; Küppers, Bastian; Scherling, Tabea et al. (2024): Towards digital twins of waste sorting plants: Developing data-driven process models of industrial-scale sensor-based sorting units by combining machine learning with near-infrared-based process monitoring. In: *Resour Conserv Recycl* 200. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.107257.

Sarc, Renato; Curtis, Alexander; Kandlbauer, L.; Khodier, Karim; Lorber, K. E.; Pomberger, Roland (2019): Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management - A review. In: *Waste Manag* 95, S. 476–492. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.035.

Kontakt

Dipl. Ing., Lisa Kandlbauer, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel. Nr.: 03842/402 5140

E-Mail: lisa.kandlbauer@unileoben.at

Homepage: <https://www.avaw-unileoben.at>

Vergärung, HTL oder beides? Bewertung der energetischen Verwertung von Reststoffbiomasse

Abstract: Die Entsorgung von Gärresten aus der anaeroben Vergärung verursacht ein ökonomisches wie ökologisches Problem, insb. bei konzentrierten Betrieben. In der vorliegenden Arbeit wird die hydrothermale Verflüssigung als potenzielle Behandlungstechnologie des Gärrests betrachtet und mit der hydrothermalen Verflüssigung der Ausgangsmaterialien vor der Vergärung verglichen. Die hydrothermale Verflüssigung ermöglicht die energetische Wertschöpfung feuchter Biomassen durch Produktion eines sog. Biocrude, einer Kraftstoffvorstufe. Mithilfe experimenteller Ergebnisse wird eine Prozesssimulation zur Dimensionierung von Apparaten und einer Kostenschätzung aufgebaut, um den Prozess techno-ökonomisch zu bewerten.

1 Einleitung

Eines der etabliertesten Verfahren zur Umwandlung nachhaltiger Biomasse in Energie ist die anaerobe Vergärung (eng. *anaerobic digestion*, AD) zur Gewinnung von Biogas. Das unvermeidliche Nebenprodukt, sog. Gärrest, enthält noch etwa 50 % der ursprünglich in der Biomasse enthaltenen Energie und des Kohlenstoffs (Eboibi et al., 2015). Stand der Technik ist die Ausbringung auf landwirtschaftliche Flächen, doch die Menge, die auf die Felder gebracht werden kann, ist aufgrund von Überdüngung und Treibhausgasemissionen gesetzlich begrenzt, was zu Lagerung und Transport führt und erhebliche Kosten verursacht (Wulf et al., 2002; Hoffmann et al., 2013). Um diese Hindernisse zu überwinden und sowohl die Energiegewinnung als auch das Nährstoffrecycling bei gleichzeitiger Minimierung der Umweltauswirkungen zu verbessern, sind innovative Behandlungsmethoden erforderlich.

Die hydrothermale Verflüssigung (HTL) kann als alternative Technologie zur Behandlung und Valorisierung von Gärresten eingesetzt werden. Bei unterkritischen Bedingungen (647 K, 22 MPa) wird Biomasse zersetzt und rekombiniert, wobei ein energiereiches Biocrude, eine wässrige Phase (AP), die reich an kurzketziger Organik ist, und eine nährstoff- und kohlenstoffreiche Hydrokohle entsteht. Anhand experimenteller Daten wurde ein Prozessmodell erstellt. Integrierte Kostenschätzungsmethoden und eine Unternehmensbefragung wurden eingesetzt, um die Investitions- und Betriebskosten der beiden Bioraffineriekonzepte (1) „AD + HTL“ und (2) „nur HTL“ zur Erzeugung von Biogas und Biocrude als Hauptenergieprodukte zu schätzen und die beiden Konzepte vergleichend techno-ökonomisch zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen unterschiedliche Pfade für die untersuchten Szenarien.

2 Methodik

2.1 Durchführung der hydrothermalen Versuche

Gärreste auf Basis von Bioabfall, Klärschlamm und einer Mischung aus Stroh/Gülle sowie ihre jeweiligen unbehandelten Pendanten wurden ausgewählt, um drei der wichtigsten Szenarien für anaerobe Vergärung in Deutschland abzubilden. Die sechs Ausgangsstoffe wurden getrocknet und zerkleinert und unter Anwendung von Kaliumhydroxid als Katalysator bei 300 °C, 325 °C und 350 °C für jeweils 20 min in Mini-Batch-Reaktoren hydrothermal behandelt. Das Produktgemisch wurde mittels Zentrifugation, Filtration und Dichlormethan-Extraktion in die Produkte Biocrude, AP und Hydrokohle getrennt. Die Gasphase wurde lediglich durch Wiegen bestimmt. Die Ausbeuten aller Phasen bezogen auf die jeweilige trockene Einwaage wurden berechnet. Die Biogasausbeute wurde durch Betreiberdaten bestimmt.

Die Ausgangsstoffe wurden hinsichtlich Rohfett, Rohfaser, Proteingehalt, Säure-Detergenzien-Faser, Neutral-Detergenzien-Faser und stickstofffreier Extrakte (NfE) bestimmt. Der Kohlenhydratgehalt wurde durch Summieren von NfE und Rohfaser berechnet. Die Elementaranalyse (C, H, N, S) der Biomassen, Biocrudes und Hydrokohlen wurde nach DIN EN 15104 durchgeführt. Der Aschegehalt der Ausgangsstoffe und Hydrokohle wurde gravimetrisch durch Veraschen bei 550 °C bestimmt. Der Sauerstoffgehalt wurde folglich aus der Differenz berechnet. Anhand dieser Daten wurde der Brennwert (HHV) anhand der Korrelation von Channiwala & Parikh (2002) berechnet. Des Weiteren wurde der chemische Sauerstoffbedarf sowie der Gesamtkohlenstoff der wässrigen Phase bestimmt.

2.2 Prozesssimulation und Kostenschätzung

Die Prozesssimulation erfolgte mit Aspen Plus® (v10, Aspen Technology Inc., Bedford, MA USA). Das Flussdiagramm ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Eingangsmassenstrom betrug in allen Fällen 10 kt a⁻¹ Frischmasse. Sowohl der Fermenter wie auch der HTL-Rohrreaktor wurden als *RYield*-Reaktoren unter Verwendung der experimentell ermittelten Daten simuliert. Zur Wärmeintegration wurden zwei Wärmeübertrager vorgesehen, die die Abwärme der Produktströme zum Aufwärmen der Eduktströme nutzen. Die Fest-Flüssig-Trennung nach der HTL erfolgt mittels eines Hydrozyklons, nach Abkühlen und Entspannen der Produktmischung erfolgt die Flüssig-Flüssig-Trennung des unpolaren Biocrude und des Prozesswassers in einem Absetzbecken.

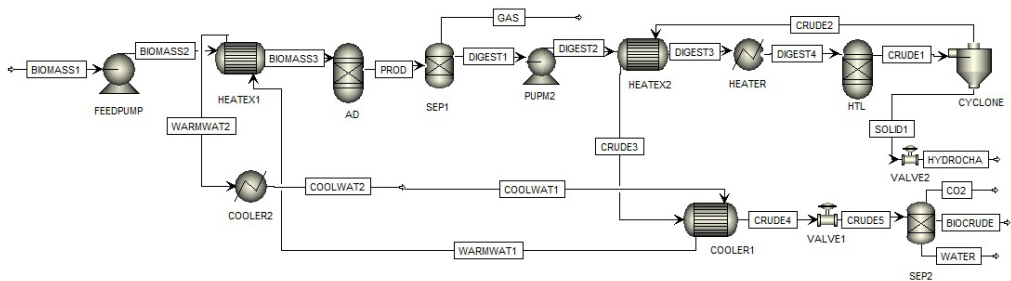


Abbildung 1 Flussdiagramm des vorgeschlagenen Biorefineriekonzepts aus AD und HTL

Soare-Redlich-Kwong (SRK) wurde als Zustandsgleichung verwendet. Die Ausgangsstoffe und Hydrokohlen wurden mittels der Modelle HCOALGEN und DCOALIGT mit ihren Elementar- und Immediatanalysen initialisiert. Das Biocrude wurde anhand von GC-MS-Messungen zur Zusammensetzung als Gemisch aus Hexan, Catechol und Indol simuliert, als Stellvertreter des komplexen Gemisches im Prozesswasser wurden Essigsäure und 5-Hydroxymethylfurfural ausgewählt. Die Wärmeübertrager wurden mittels Aspen Exchanger Design & Rating ausgelegt.

Zur Kostenschätzung des Gesamtprozesses wurde der Aspen Economic Analyzer verwendet. Zur besseren Kostenschätzung der anaeroben Stufe wurden die in Aspen Plus® gewonnenen Daten in den Wirtschaftlichkeitsrechner der KTBL eingegeben. Für weitere Ausrüstungskomponenten wurde auf das Kalkulationstool der McGraw-Hill Higher Education zurückgegriffen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr im Rahmen des Projektes „Pilot-SBG-Bioressourcen und Wasserstoff als Rohstoff für Methan als Kraftstoff – Konzeption und Realisierung einer Pilotanlage“ und durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft durch institutionelle Förderung des DBFZ.

Literatur/Quellen

- Channiwala, S. A.; Parikh, P. P. (2002): A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. In: *Fuel* 81 (8), S. 1051–1063. DOI: 10.1016/S0016-2361(01)00131-4.
- Eboibi, Blessing E.; Lewis, David M.; Ashman, Peter J.; Chinnasamy, Senthil (2015): Integrating anaerobic digestion and hydrothermal liquefaction for renewable energy production. An experimental investigation. In: *Environ. Prog. Sustainable Energy* 34 (6), S. 1662–1673. DOI: 10.1002/ep.12172.
- Hoffmann, Jessica; Rudra, Souman; Toor, Saqib S.; Holm-Nielsen, Jens B.; Rosendahl, Lasse A. (2013): Conceptual design of an integrated hydrothermal liquefaction and biogas plant for sustainable bioenergy production. In: *Bioresource technology* 129, S. 402–410. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.11.051.
- Wulf, S.; Maeting, M.; Clemens, J. (2002): Application technique and slurry co-fermentation effects on ammonia, nitrous oxide, and methane emissions after spreading. II. Greenhouse gas emissions. In: *Journal of environmental quality* 31 (6), S. 1795–1801. DOI: 10.2134/jeq2002.1795.

Kontakt

Christian Klüpfel, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Deutsches Biomasseforschungszentrum

Tel.: +49 (0)341 2434 436

E-Mail: christian.kluepfel@dbfz.de

Homepage: www.dbfz.de/htp

Bekleidungsaccessoires von Alttextilien in der automatisierten NIR-Sortierung

Abstract: Der vorliegende Beitrag zeigt die Herausforderungen in der automatisierten NIR-Sortierung von Alttextilien, die sich aus der Vielfalt von funktionellen und dekorativen Accessoires ergeben, mit denen Kleidungsstücke versehen werden. Zudem erfolgt eine systematische Erfassung der Häufigkeiten, mit denen Accessoires in bestimmten Bekleidungsprodukten auftreten. Mithilfe der FTIR-Spektroskopie erfolgt die Charakterisierung der Accessoire-Materialien, während für die Untersuchung der Erkennbarkeit der Accessoires in einem sensorgestützten Sortierer die NIR-Spektroskopie verwendet wird.

1 Einleitung

Für das Recycling von Alttextilien ist eine korrekte Identifizierung der Fasertypen und eine Sortierung der Textilien notwendig (Bonifazi et al., 2022). Kleidungsstücke bestehen jedoch oft nicht nur aus den Textilfasern, sondern werden während ihrer Herstellung mit funktionalen (z.B. Knöpfe, Verschlüsse etc.) oder dekorativen Accessoires (z.B. Aufdrucke, Stickereien etc.) versehen (Engineering Textile, 2023). Diese zusätzlichen Komponenten können die stoffliche Verwertung limitieren, weshalb eine automatisierte Erkennung (z.B. mittels Nahinfrarot- (NIR-)Sensoren) essenziell ist. Ziel einer Masterarbeit zu diesem Thema ist eine systematische Erfassung der Häufigkeit, mit der spezifische Accessoire-Kategorien in bestimmten Produktgruppen vorkommen. Außerdem soll die Schaffung einer Datenbasis, welche Accessoires mittels NIR-Sortiertechnologie erkannt werden können oder im Rahmen der Erkennung problematisch sein könnten, geschaffen werden.

2 Methodik

2.1 Häufigkeit von Bekleidungsaccessoires

Zur Erhebung der Häufigkeit, mit der bestimmte Bekleidungsaccessoires auftreten, wurden die Herbst- und Winterkollektionen der Onlineshops von drei Modeunternehmen analysiert. Um verschiedene Preisniveaus abzudecken, wurden die Marken Primark, H&M und Hugo Boss ausgewählt. Diese Onlineshops bieten eine breite Produktpalette und gehören zu den 20 umsatzstärksten Modemarken in Europa im Jahr 2021 (Statista, 2022). Durch eine systematische Zählung wurde ermittelt, wie viele Produkte innerhalb einer bestimmten Produktkategorie (z.B. Hemden) eine spezifische Art von Accessoire (z.B. Knöpfe) aufweisen.

2.2 Spektroskopische Untersuchungen

Zur Bestimmung der Materialvielfalt von Alttextilien wurden 80 Kleidungsstücke aus der getrennten Sammlung und dem privaten Umfeld ausgewählt und alle Komponenten (Nähte, Etikett, Accessoires etc.) mittels Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) analysiert. Bei der Auswahl der Proben wurde darauf geachtet, eine breite Palette verschiedener Accessoire-Arten und -Materialien abzudecken. Die metallischen Komponenten wurden mittels eines Magneten überprüft. Basierend auf den FTIR-Auswertungen wurden 13 Proben für weiterführende Untersuchungen mit einem sensorgestützten NIR-Sortierer ausgewählt. Ziel der Messungen war die Ermittlung, welche Accessoires von einem NIR-Sortierer erkannt oder nicht erkannt werden können. Die Auswertung erfolgte auf qualitativer Ebene.

3 Ergebnisse

3.1 Häufigkeit von Bekleidungsaccessoires

In Tabelle 1 sind die ermittelten Häufigkeiten von Bekleidungsaccessoires in bestimmten Produktgruppen dargestellt. Dabei wurden folgende Produktkategorien zusammengefasst: Die Kategorie „Pullover (P)“ beinhaltet Pullover, Hoodies, Strick- und Kapuzenjacken. Die Kategorie „Jacken (J)“ umfasst Jacken, Sportjacken, Mäntel und Blazer. „Unterteile (U)“ bezieht sich auf Hosen, Jeans, Shorts und Röcke, während „Oberteile (O)“ Tops, T-Shirts, Bodies und Blusen umfasst. Die Kategorie „Sportbekleidung (S)“ beinhaltet Jogginghosen, Leggings, Sportober- und -unterteile. Die prozentuale Gesamtberechnung berücksichtigt zusätzlich die Häufigkeiten der Kategorien Kleider, Nacht- und Unterwäsche. Diese Darstellung umfasst ausschließlich Kleidungsstücke, die von den Onlineshops als „für Frauen“ klassifiziert wurden. Es wurde weiters angenommen, dass alle Produkte die Komponenten „Nähgarn“ und „Label“ aufweisen. Diese funktionalen Accessoires wurden daher nicht in die Matrix aufgenommen.

Tabelle 1 verdeutlicht die Vielfalt und Menge an Accessoires, die an Kleidungsstücken angebracht sein können. Die Modemarke mit den billigsten Produkten, Primark, verwendet in ihrer Produktpalette am wenigsten Accessoires. Bei dem Modeunternehmen mit den teuersten Produkten, Hugo Boss, findet sich bei vielen Produkte das Markenlogo als Aufdruck, Stickerei oder Label an der Außenseite. Die am häufigsten auftretenden Accessoires (abgesehen von den Komponenten Nähgarn und Label) sind Knöpfe, gefolgt von eingearbeiteten Gummibändern und Reißverschlüssen. Dekorative Accessoires wie Pailletten oder Strasssteine treten nur vereinzelt auf.

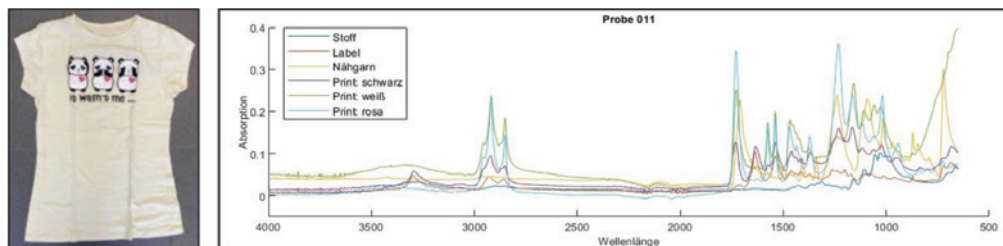


Abbildung 1: FTIR-Spektren der Komponenten eines T-Shirts mit Aufdruck (Probe 11)

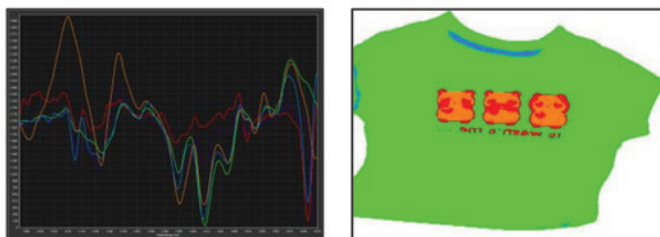


Abbildung 2: NIR-Spektren der Komponenten eines T-Shirts mit Aufdruck (Probe 11)

Die Spektren in Abbildung 1 zeigen, dass eine spektrometrische Unterscheidung des Aufdrucks vom Stoff möglich sein sollte. Diese Ergebnisse stimmen mit den Spektren überein, die mit dem NIR-Sortierer aufgenommen wurden (Abbildung 2). Das Label auf der Innenseite der Probe ist für den NIR-Sensor nicht sichtbar und konnte somit nicht erkannt werden. Das Nähgarn ist nur an Stellen, an denen es verdichtet erscheint, erkennbar. Das in diesen Bereichen aufgenommene Spektrum wird jedoch als Polyester-Baumwoll-Mix erkannt und nicht als reine Polyesterfasern.

In den FTIR-Untersuchungen wurde festgestellt, dass das Nähgarn bei 90 % der analysierten Proben aus Polyester besteht. Des Weiteren zeigte sich, dass der Großteil aller Labels (85,1 %) ebenfalls aus Polyester besteht. Andere Materialien, aus denen Labels bestanden, waren Baumwolle, Nylon, Acetatfasern oder synthetisches Leder. Die untersuchten Kunststoffknöpfe bestanden hauptsächlich aus Alkyd- oder Polyamidharzen. Unter den geprüften metallischen Accessoires befanden sich sowohl magnetische als auch nicht magnetische Metalle. Am NIR-Sortierer konnten, anders als bei Probe 11, aufgrund unzureichender Spektralinformationen nicht alle untersuchten Aufdrucke erkannt werden. Gleiches gilt für Pailletten, wobei jedoch ein Unterschied zum umliegenden Stoff festgestellt wurde. Die analysierten Strasssteine konnten nicht erkannt werden, da sie zu klein sind, um vom Sensor erfasst zu werden. Stickereien wurden ab einer Größe eines Pixels gut erkannt. Diese Untersuchungen bilden die Grundlage für weitere Forschungen im Bereich der automatisierten NIR-Sortierung und Erfassung von Bekleidungsaccessoires.

Danksagung

Wir danken dem österreichischen Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort, der Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung und der Christian-Doppler-Forschungsge-

sellschaft für die finanzielle Unterstützung. Darüber hinaus bedanken wir uns für die finanzielle und nicht-finanzielle Unterstützung unserer Unternehmenspartner Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoffrecycling Austria AG, Linz Service GmbH, OMV Downstream GmbH und Wien Energie GmbH.

Literatur/Quellen

Statista (2022): Umsatz der führenden Modemarken in Europa im Jahr 2021. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167540/umfrage/top-20-bekleidungslieferanten-in-deutschland-nach-umsatz/>, zuletzt geprüft am 19.12.2023.

Bonifazi, G.; Gasbarrone, R.; Palmieri, R.; Serranti, S. (2022): End-of-Life Textile Recognition in a Circular Economy Perspective: A Methodological Approach Based on Near Infrared Spectroscopy. In: Sustainability 14 (16), S. 10249. DOI: 10.3390/su141610249.

Engineering Textile (2023) Garments Accessories – Functions, Types, List, Details. Online verfügbar unter <https://engineeringtextile.com/garment/accessories/162-garments-accessories>, zuletzt geprüft am 04.09.2023.

Kontakt

Dr. Alexia Tischberger-Aldrian

Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft, Montanuniversität Leoben

Tel.-Nr. +43 3842 / 402 - 5116

E-Mail: alexia.tischberger-aldrian@unileoben.ac.at

Homepage: <https://www.avaw-unileoben.at/>

Umfassende Charakterisierung von 2D Leichtverpackungsabfällen zur Verbesserung des Recyclings

Abstract: *In Österreich fallen jährlich etwa 149.000 t an Kunststofffolien als Verpackungsabfall an. Dies entspricht etwa 50% der jährlich in Verkehr gesetzten Kunststoffverpackungen. Von diesen werden nur etwa 18% stofflich als Regranulat wiederverwertet. Der Rest wird thermisch verwertet und steht somit einer stofflichen Verwertung nicht zur Verfügung. Um bestehende Anlagen auf die Sortierung dieses Materialstroms vorzubereiten, ist ein Verständnis der Eigenschaften der zu sortierenden Partikel notwendig. In dieser Sortierkampagne werden über das gesamte Jahr verteilt, alle zwei Monate an drei Standorten in der Steiermark (geringe Bevölkerungsdichte (BD), mittlere BD, hohe BD) Proben von jeweils 1.000 Litern entnommen und analysiert. Zusätzlich werden sechs externe Validierungsproben aus ähnlich besiedelten Gebieten in anderen Regionen Österreichs entnommen, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das gesamte Land zu prüfen. Erhoben werden, neben der Materialkomposition, Größe, Farbe, Bedruckungsgrad, Labelling, Verschmutzung sowie das verpackte Produkt.*

1 Einleitung

Die verstärkte Nutzung von Kunststofffolien stellt einen Schritt zur Reduktion des in Österreich anfallenden Verpackungsabfalls dar (Koinig et al., 2021). Besonders Mehrschichtkunststofffolien bilden aufgrund ihres laminaren Materialaufbaus die Möglichkeit, vielfältige Aufgaben zu erfüllen. Gleichzeitig bieten sie die Möglichkeit, ein nahezu ideales Verhältnis von Verpackungsmasse zu Produktgewicht zu erzielen. Andererseits ist ein Recycling dieser Fraktion aufgrund dieses Mehrschichtaufbaus problematisch. Derzeitige Anstrengungen zielen darauf ab, die Recyclierbarkeit dieser Fraktion zu erhöhen. Neben diesen ist es notwendig, Anlagen zu konzipieren, um diesen Materialstrom mechanisch oder chemisch zu verwerten. Zur Auslegung dieser Anlagen ist es notwendig, die anfallende Menge des Stoffstroms abschätzen zu können. Dazu ist eine Kenntnis der Materialeigenschaften wie Größe, Materialkomposition, Verschmutzung, Labelling und vielen weiteren notwendig, um die entstehenden Anlagen möglichst ideal auf die zu erwartenden Inputfraktionen einstellen zu können. Dieser Beitrag nutzt die aus einer großangelegten, überregionalen Sammelkampagne gesammelten Daten für granulare Analyse der Objekte, um diese Materialcharakteristika zu erheben.

2 Methodik

2.1 Probenahmekampagne

Die Proben wurden aus einer einheitlichen Modellregion (Steiermark) gezogen, die sich lediglich durch die Bevölkerungsdichte unterscheidet. Um vergleichbare Informationen über saisonale Schwankungen zu erhalten, wurden alle zwei Monate drei Standorte beprobt. Jeder Standort ist je nach Bevölkerungsdichte für die jeweilige Schicht charakteristisch. Die entsprechenden Standorte wurden zufällig ausgewählt und sind Graz (dicht besiedelt), Kapfenberg (mittel besiedelt) und Wald am Schoberpaß, Kammern (dünn besiedelt). Um die Anwendbarkeit der Ergebnisse für das ganze Land zu überprüfen, wurden zwei Validierungsstichproben aus Gebieten jeder Population durchgeführt (vgl. Abbildung 1). Da die Zusammensetzung des Konsumabfalls stark von der sozioökonomischen Struktur (Langner, Albrecht, Ohst & Herberg, 1998, S. 27–28) abhängt, die in städtischen Regionen heterogener ist, wurde beschlossen, im Winter und im Sommer zusätzliche Proben in Graz zu ziehen.

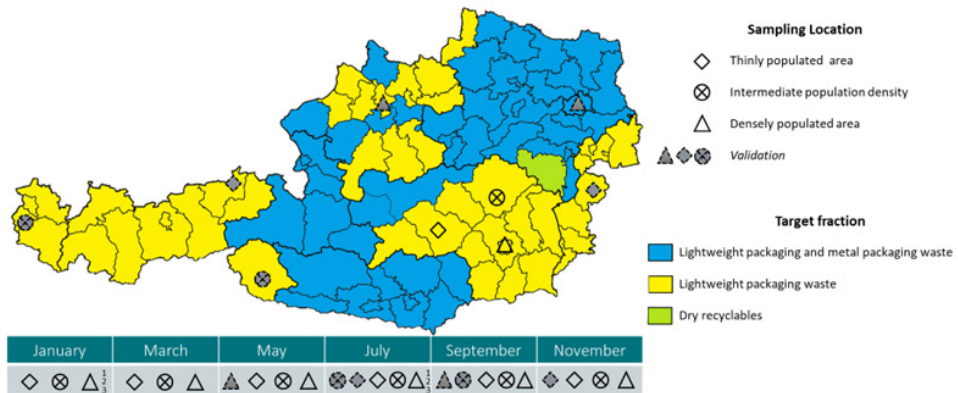


Abbildung 1: Probenahmeorte für Handsortierung und Validierung

2.2 Charakterisierung mittels NIR und manueller Analyse

Im Rahmen der manuellen Probenanalyse wurde jedes Partikel einzeln betrachtet. Von jedem der untersuchten Partikel wurden Masse, Fläche, Kantenlänge, Farbe, Grad der Bedruckung und Labelling sowie der Verschmutzung erhoben und weiters überprüft, ob es sich um Mehrschicht- oder Einschichtfolien handelt. Neben diesen Charakteristiken wurde jedes Partikel mit NIR untersucht. Die Untersuchung in NIR wurde mit einem Handheld NIR durchgeführt (microPHAZIR, Thermo Fisher Scientific Inc. Vereinigte Staaten von Amerika).

3 Resultate

Innerhalb der 2D-Fraktion wurden die Partikel anhand einer Vielzahl an Charakteristika untersucht, wie etwa verwendeten Verpackungsmaterials, der längsten Partikelkante, der Farbe und dem Anteil an Stretch- und Schrumpffolie. Abbildung 2 und Abbildung 3 stellen exemplarisch Ergebnisse von Materialverteilung und Kantenlänge der Sammlung in Graz im Januar 2023 dar. An allen Probenahmestellen ist PE mit einem Massenanteil von 31-45 % das dominierende Verpackungsmaterial innerhalb der 2D-Fraktion. Allerdings ist der Anteil von Papier und Pappe am Probenahmeort der Hochhauswohnungen mit 19 % höher als an den beiden anderen Probenahmeorten (jeweils 8 bzw. 9 %). Der PP-Anteil ist an allen drei Probenahmestellen ähnlich und liegt zwischen 17 % und 23 %. Der Anteil der Multimaterialverpackungen beträgt in allen Bezirken etwa ein Drittel des 2D-Anteils und wird von den Kombinationen PE/PP, PE/PA, PET/PE dominiert. Diese Ergebnisse ähneln den Ergebnissen von Koinig, Rutrecht, Friedrich, Barretta & Vollprecht, 2022. Die Kategorie „Sonstige“ umfasst weitere Materialien wie PLA und Biostärke, die etwa 1-2 % ausmachen.

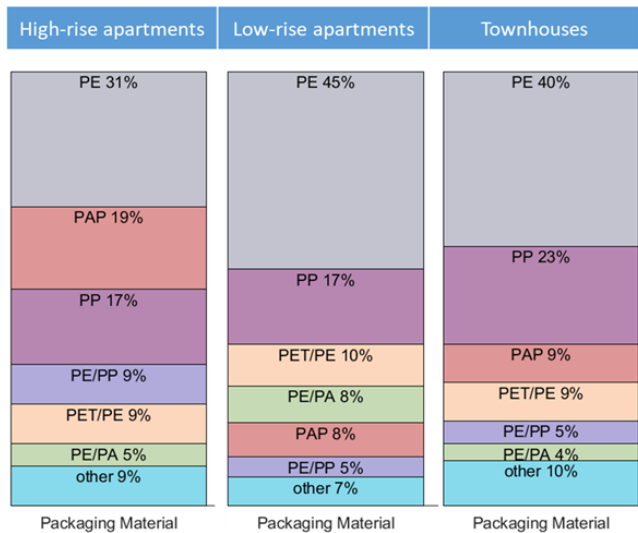


Abbildung 2: Verteilung der Materialzusammensetzung

In der 2D-Fraktion ist die Partikelgrößenverteilung gleichmäßig über alle Probenahmestellen verteilt. Für die Klassifizierung in verschiedene Korngrößenbereiche wurden gängige Siebabschnitte (< 20 oder 40 mm für Feinkorn, 80, 160, 320 mm für Mittelkorn und > 320 mm für Überkorn) verwendet. Etwa die Hälfte der 2D-Partikel liegt im Partikelgrößenbereich zwischen 160–320 mm und jeweils etwa 20 % sind im angrenzenden oberen und unteren Partikelgrößenbereich verteilt. Abbildung 3 zeigt die Farbverteilung der Partikel. Etwa die Hälfte aller 2D-Partikel sind transparent, etwas weniger als 20 % sind weiß und die restliche Masse verteilt sich auf buntgefärbte Verpackungen. Der Anteil an Stretch- und Schrumpffolie innerhalb der Folien wurde weiters untersucht, da insbesondere Stretchfolien bei der Nassmechanischen Verarbeitung rotierende Maschinenelemente blockieren können. Der Schrumpffolienanteil ist über alle Standorte hinweg ähnlich und beträgt etwa 5 %.



Abbildung 3: Verteilung nach Partikelgröße

Danksagung

Das Projekt *Flex4Loop* wird durch die österreichische Förderagentur für wirtschaftsnahe Forschung, Entwicklung und Innovation (FFG) gefördert. Das Projekt circPLAST-mr (FFG Projektnummer: FO999889843) wird im Zuge der Ausschreibung Kreislaufwirtschaft 2021 (KP) aus Mitteln der FFG gefördert.

Literatur/Quellen

- Koinig, G., Rutrecht, B., Friedrich, K., Barretta, C., & Vollprecht, D. (2022). Latent Recycling Potential of Multilayer Films in Austrian Waste Management. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 8, p. 1553). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym14081553>
- Koinig, G., Rutrecht, B., & Vollprecht, D. (2021). Recycling von Multilayerfolien. In *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* (Vol. 74, Issues 1–2, pp. 32–38). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s00506-021-00813-w>
- Langner, G., Albrecht, J., Ohst, E., & Herberg, B. von der (1998). Richtlinie Abfallanalytik: Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen.

Kontakt

Dr. Mont., Gerald Koinig, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel: +43 3842 / 402-5143

E-Mail: gerald.koinig@unileoben.ac.at

Homepage: <https://www.avaw-unileoben.at/>

The Role of Final Sinks in Circular Economy

Abstract: *The main research question asked in this PhD-project is for which waste materials temporary storage and/or final sinks will play an essential role within the circular economy in the future in order to ensure clean and safe cycles. There are, for example, new landfill restrictions set by the EU; however, materials, elements and impurities used in our economy pose danger and risk to human health and the environment. For such waste/materials, new landfilling/storage/sink concepts will have to be found in order to ensure clean cycles and circular economy. The project is asking, among others, how concepts for future sustainable landfills/sinks have to be designed or what could be the possible ways towards achieving sustainable future.*

1 Introduction

The rapid evolution of lifestyle is connected to an increase in waste production and subsequently to the development of technologies and new approaches in waste management. From a global perspective, landfilling is a widely used practice until the present days; however, being the least preferable option according to the EU's waste hierarchy due to loss of resources and emissions associated with landfilling of waste. In 2019, the mean amount of municipal solid waste landfilled in the EU was 22.6%, with a great heterogeneity among the different member states (European Commission, 2020). According to the EU-Landfill Directive, landfilling of municipal waste has to be limited to 10% and less by 2035 (European Commission, 2023). Among other goals, landfilling of waste suitable for recycling or other material or energy recovery from 2030 will be restricted (European Commission, 2023).

Waste sector has to be prepared to manage, among others, waste that will be deflected from landfills on the grounds of the planned restrictions – i.e., to find new ways of final disposal for non-recyclable and potentially impairing materials, which are still parts of daily used products as well as in sector-specific applications (e.g., in the medical or energy sector). Such materials must be removed from the anthropogenic cycles and require safe disposal, especially in circular economy to ensure clean material cycles. Future-oriented concepts for final sinks must be found and designed in such a way that they do not pose a danger to humans and the environment in the long term.

2 Methods

The first elemental method used in this project is extensive research of scientific sources and political frameworks comprising, among others, the Assessment Reports by the Intergovernmental Panel on Climate Change, documents issued by the European Commission and the United Nations, e.g., addressing the Circular Economy package, Green Deal and the Sustainable Development Goals.

Later, diverse methods are envisaged to be used, among others, systematic literary research and empiric approaches, such as interviews with professionals from the branch, as well as case-study based experimental research, scenario development including material flow analysis and sustainability assessment.

3 Future of Landfilling and Final Sinks in Circular Economy

In future, some materials and residues will be deflected from landfills. These are expected to enter circular anthropogenic cycles in order to be used as effectively and as long as possible. However, some of these materials are not suitable for recycling based on their properties – i.e., they are contaminated or not suitable in other ways. These will have to find a safe way of disposal in order to ensure circularity. This approach is important in order to close the loop in circular economy. Here, final sinks come into consideration because without proper ways of disposal, circular economy cannot exist. An approach that can be applied here is so called *Back to Earth Alternatives*. This approach is based on the fact that after proper treatment, residues should be returned to their non-mobile state. This will ensure the closing of cycles (Peng & Pivato, 2019). Clean material cycles are essential for circular economy (European Environment Agency, 2017). Even though there is a lack of data on the fate of chemicals throughout the lifecycle of materials, there are many examples of cycles contamination in literature. A contamination that seems to be prevalent in literature is plastic cycle contamination by brominated flame retardants and phthalates. More examples are listed below in Table 1.

Table 1 Examples of secondary contamination

recycled material	contaminant	source
plastics	brominated flame retardants, phthalates; metals	Kral et al., 2019; Undas et al., 2023
paper	mineral oil, phthalates	Kral et al., 2019
asphalt	polyaromatic hydrocarbons	Kral et al., 2019
textiles	bisphenols, flame retardants, pesticides, volatile organic compounds,...	Undas et al., 2023
aluminium	copper	Hummen & Sudheshwar, 2023
steel	copper	Kral et al., 2019

It is more efficient to demand the optimal amount of secondary resource rather than the maximal one (Kral et al., 2013). Non-recyclable materials can be either disposed of or they can be transformed into harmless substances.

Sapsford et al. (2023) describe a temporary storage as a landfill-like storage of mineral-rich waste materials. They are stored and cleaned, contaminated materials are remediated and valuable components are separated and concentrated. Eventually, the materials are remined (Sapsford et al., 2023). Final sinks can be found in both, anthroposphere and the environment (Kral et al., 2019). Sustainable landfills can function to provide the disposal, the question is, if they can also serve as a final sink. The definition of sustainable landfilling has been changing through ages. The definition from Westlake (1997) considers sustainable landfill to be a bioreactor landfill that functions as a repository for pre-treated waste, the result is an assimilation of

waste into the environment. Similarly, Huber-Humer & Lechner (2011) describe a sustainable landfill as a system that will achieve an acceptable equilibrium within 30-40 years and consequently released emissions will be below the acceptable levels. The third literature source mentioned in this summary claims that a sustainable landfill should pose a negligible or a zero risk to the environment (Onyelowe et al., 2021).

The definition of sustainable landfilling is not rigid, it may be changing in future based on the development of waste management and the needs of the circular economy.

Circular economy is not an opposite of disposal and in order to strive for sustainability, there should be the symbiosis of both (Kral et al., 2013, 2019). In any case, landfills have to be managed properly to make their negative impact on the environment as small as possible. For instance, landfills and waste dumps are a significant source of greenhouse gasses, namely methane, which makes them a contributor to the climate change. According to the Assessment Reports by the Intergovernmental Panel on Climate Change, the methane emissions from landfilling has been rising steadily since the 1970s. Landfills are considered to be among the strongest sources of methane emissions regarding the anthropogenic ones (Canadell et al., 2021). Furthermore, landfills can be also a source of other pollution such as dust, smell, they can compromise the quality of water sources in nearby etc. These factors can be reduced by proper management, planning and siting.

Research questions asked in this project will be:

- Is there a need for temporary storage and/or final sinks, respectively "sustainable landfilling" in circular economy? If yes, in what form?
- What are the criteria of sustainable landfilling?
- Are final sinks meant to be only for homogenous non-hazardous materials?
- Do we want to keep the possibility of reminding the landfills (as temporary storage) later?
- What is the difference between the final sinks and temporary storage and what materials are suitable for each of them?
- Can we find analogies between anthropogenic and natural cycles and sinks? Can we possibly apply them?

The prospects of future landfilling pose many questions and this project aims to answer some of them. Some approaches regarding the sustainable landfilling and final sinks are available but an important question that has to be asked is whether the current and planned measures will be sufficient towards sustainable future and towards meeting the Sustainable Development Goals by the United Nations. This project is in its beginning, its conclusions will be summarized in a dissertation thesis. The dissertation thesis aims to contribute to science by creating an overview regarding not only the role and technical development of future landfills, but also by addressing future waste and material streams in circular economy.

4 Acknowledgement

This project is financed by the University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (BOKU). The author is employed at the Institute of Waste Management and Circularity (ABF-BOKU).

References

- Canadell, J. G., Scheel Monteiro, P., Costa, M. H., Cotrim da Cunha, L., Cox, P. M., Eliseev, A. V., Henson, S., Ishii, M., Jaccard, S., Koven, C., Lohila, A., Patra, P. K., Piao, S., Rogelj, J., Syampungani, S., Zaehle, S., & Zickfeld, K. (2021). Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, Ö. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 673–816). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- European Commission. (2020). *Strategic Plan 2020-2024*. https://commission.europa.eu/system/files/2020-10/env_sp_2020_2024_en.pdf
- European Commission. (2023, April 12). *Landfill waste*. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/landfill-waste_en
- European Environment Agency. (2017). *Circular by design: Products in the circular economy*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/860754>
- Huber-Humer, M., & Lechner, P. (2011). Sustainable landfilling or sustainable society without landfilling? *Waste Management*, 31(7), 1427–1428. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.04.009>
- Hummen, T., & Sudheshwar, A. (2023). Fitness of product and service design for closed-loop material recycling: A framework and indicator. *Resources, Conservation and Recycling*, 190, 106661. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106661>
- Kral, U., Kellner, K., & Brunner, P. H. (2013). Sustainable resource use requires “clean cycles” and safe “final sinks.” *Science of The Total Environment*, 461–462, 819–822. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.094>
- Kral, U., Morf, L. S., Vyzinkarova, D., & Brunner, P. H. (2019). Cycles and sinks: Two key elements of a circular economy. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(1), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0786-6>
- Onyelowe, K. C., Obianyo, I. I., Onwualu, A. P., Onyia, M. E., & Moses, C. (2021). Morphology and mineralogy of rice husk ash treated soil for green and sustainable landfill liner construction. *Cleaner Materials*, 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100007>
- Peng, W., & Pivato, A. (2019). Sustainable Management of Digestate from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste Under the Concepts of Back to Earth Alternatives and Circular Economy. *Waste and Biomass Valorization*, 10(2), 465–481. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0071-2>
- Sapsford, D. J., Stewart, D. I., Sinnett, D. E., Burke, I. T., Cleall, P. J., Harbottle, M. J., Mayes, W., Owen, N. E., Sardo, A. M., & Weightman, A. (2023). Circular economy landfills for temporary storage and treatment of mineral-rich wastes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*. <https://doi.org/10.1680/jwarm.22.00008>
- Undas, A. K., Groenen, M., Peters, R. J. B., & van Leeuwen, S. P. J. (2023). Safety of recycled plastics and textiles: Review on the detection, identification and safety assessment of contaminants. *Chemosphere*, 312, 137175. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137175>
- Westlake, K. (1997). SUSTAINABLE LANDFILL — POSSIBILITY OR PIPE-DREAM? *Waste Management & Research*, 15(5), 453–461. <https://doi.org/10.1006/wmre.1996.0101>

Contact

Romana Kopecká, MSc

*University Assistant at the Institute of Waste Management and Circularity,
University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (BOKU)*

Tel.-Nr. +43 1 47654-81312

E-Mail: romana.kopecka@boku.ac.at

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

Mechanisch-thermochemische Verfahrenskombination für das Recycling von Feinfraktionen aus Abfallbehandlungsanlagen

Abstract: In Österreich werden jährlich rund 533.000 t Schlacken und Aschen aus Abfallverbrennungsanlagen deponiert. Im Projekt "MeteoR" sollen u.a. aus bereits aufbereiteten Rostaschen, aus der Müllverbrennung, weitere Wertfraktionen erzeugt werden, die einer weiterführenden Verwertung zugefügt werden sollen. Hierfür ist vorab eine umfassende Charakterisierung des Materials erforderlich. Analysen mittels Röntgendiffraktometer und ICP-MS zeigen, dass kristalline Phasen in Rostaschen häufig aus gesteinsbildenden Mineralen bestehen und den Hauptelementen der Erdkruste sehr ähnlich sind. Durch erneute Magnetscheidung mittels Trommelscheider kann vor allem aus feinen Körnungen eine ferromagnetische Wertfraktion erzeugt werden.

1 Einleitung

In Österreich fallen jährlich um die 77 Mio. t Abfall an. Dazu zählen etwa 1 Mio. t Verbrennungsrückstände aus Feuerungsanlagen und der thermischen Abfallbehandlung. Im Jahr 2021 wurden 50% aller Abfälle bereits recycelt oder zur Geländeverfüllung eingesetzt. Dabei wurden 6% aller anfallenden Abfälle in der Abfallverbrennungsverordnung unterliegenden Anlagen thermisch behandelt. Hierfür stehen in Österreich aktuell elf Anlagen zur thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen bereit. Diese Anlagen haben 2021 um die 2,5 Mio. t Abfälle thermisch behandelt und so etwa 658.000 t Schlacken und Aschen erzeugt. Mit rund 533.000 t wurde der Großteil deponiert (BMK 2023).

Rostasche ist eine aus Glas, Keramik, Eisen- und Nichteisenmetallen und Schlacke bestehende Mischung mit hoher Heterogenität (Wiles 1996). Der Großteil der Schlacke besteht aus den üblichen in der Erdkruste vorkommenden Elementen wie Sauerstoff, Silizium, Aluminium, Eisen, Magnesium und Calcium (Wedepohl 1995). Elemente wie Kalium, Titan, Kupfer, Zink und Blei kommen als Nebenelemente vor (Wei et al. 2011). Der kristalline Anteil von Rostaschen besteht im Wesentlichen aus Quarz, Feldspat, Calcit, Hämatit und Magnetit sowie Meliliten (Keber et al. 2020, Eusden et al. 1999).

Im Projekt „MeteoR“ sollen aus bisher nicht verwertbaren Feinfraktionen aus Abfallbehandlungsanlagen nach chemischer und mineralogischer Charakterisierung durch mechanische Aufbereitung wieder verwertbare Fraktionen hergestellt werden. Potentiellen Einsatz könnten die durch Aufbereitung von Rostaschen erzeugten Fraktionen als Ersatzrohstoff in der Zementindustrie, um alternative Bindemittel und CO₂-ärmeren Beton herstellen zu können, sowie im Kupferrecycling finden. Im Fall der Rostaschen soll durch die Erreichung der Projektziele CO₂ eingespart werden, Primärrohstoffe sollen zum Teil ersetzt werden und das Volumen als auch die Masse von deponiertem Material soll verringert werden.

2 Methodik

2.1 Proben und Probenahme

Auf der Deponie in Tainach (Kärnten) werden die angelieferten Rostaschen, aus der Müllverbrennung, mittels Backenbrecher auf eine Korngröße von < 35 mm gebrochen. Anschließend werden drei Siebschnitte (Abbildung 1) 0 bis 4 mm, 4 bis 16 mm und 16 bis 35 mm erstellt. Aus allen drei Fraktionen werden mittels Überbandmagnetscheider und Wirbelstromscheidung ferromagnetische und Nichteisen-Wertfraktionen erzeugt. Das restliche, taube, Material wird derzeit deponiert.

Im Zuge des Projekts „MeteoR“ sind diese drei tauben Restfraktionen von Interesse und wurden in Anlehnung an ÖNORM S 2127 (Austrian Standards International 2011) beprobt. Dafür wurden an allen drei Haufenwerken an unterschiedlichen Stellen mindestens 10 Stichproben mittels Handschaufel genommen und zu einer Sammelprobe vereinigt.



Abbildung 1: Die tauben Rostaschenfraktionen 0 bis 4 mm (a), 4 bis 16 mm (b) und 16-35 mm (c)

2.2 Chemische und mineralogische Analytik

Die chemischen Analysen der Rostaschen wurden nach einem Vollaufschluss und in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 17294-2 (Austrian Standards International 2017) mittels ICP-MS durchgeführt. Die Identifikation der kristallinen Phasen erfolgte durch Röntgendiffraktometrie. Für beide Analysen wurden die Rostaschen, falls notwendig, mit einem Backenbrecher auf eine Korngröße < 4 mm gebrochen und anschließend in einer Kugelmühle auf $< 0,5$ mm gemahlen.

2.3 Aufbereitungsversuche

Hölln et al. (2018) haben gezeigt, dass Rostaschen erhöhte Metallgehalte, zum Teil über einem Gewichtsprozent, aufweisen. Um das Potential zur Erstellung eines kupferhaltigen Konzentrats durch erneute Magnet- und Wirbelstromscheidung eruieren zu können, wurden die Rostaschen im Technikum der Fa. IFE Aufbereitungstechnik GmbH erneut aufbereitet. Im Gegensatz zur Aufbereitungsanlage auf der Deponie in Tainach wurde hier u.a. aus Gründen der Verfügbarkeit jedoch ein Trommelscheider anstelle eines Aushebescheiders benutzt.

3 Ergebnisse

In den folgenden Absätzen werden ausschließlich Ergebnisse der Fraktion 0 bis 4 mm aufgeführt, da hier die beste Aufbereitbarkeit zu erwarten ist. Für die Verbesserung der Aufbereitbarkeit im Bereich 4 bis 16 mm und 16 bis 35 mm wäre eine Mahlung dieser Fraktionen von Vorteil.

3.1 Chemie der Rostaschen

Ausschlaggebende Elemente sind in Tabelle 1 aufgeführt. Für die Rostaschenfraktion 0 bis 4 mm lässt sich eine Anreicherung von Eisen in der magnetischen Fraktion durch die oben aufgeführten Aufbereitungsschritte erreichen. Chrom, Mangan und Kupfer sind in der magnetischen Fraktion ebenfalls schwach angereichert. Für Natrium, Magnesium, Aluminium, Silizium und Kalium ist eine Abreicherung feststellbar.

In der Nichteisenfraktion ist eine besonders hohe Anreicherung an Kupfer feststellbar. Elemente wie Natrium, Magnesium, Aluminium, Silizium und Kalium sind ebenfalls schwach angereichert. Der Eisenanteil ist in der Nichteisenfraktion deutlich geringer als in der Ausgangsfraktion.

Die Restfraktion ist bis auf den Kupferanteil mit der Nichteisenfraktion vergleichbar. Im prozessfeuchten Zustand ist mit den eingesetzten Aufbereitungsaggregaten kein besserer Trennerfolg realisierbar. Mit getrocknetem Material wäre vor allem eine Verbesserung der Magnetscheidung zu erwarten.

Element	0 – 4 mm [g/kg]	0 – 4 mm magn. [g/kg]	0 – 4 mm NE [g/kg]	0 – 4 mm Rest [g/kg]
Na	19,5	9,39	10,6	11
Mg	19,7	16,3	17,6	18,2
Al	74,1	54	65,2	63,5
Si	145	103	114	118
K	9,71	5,79	6,92	6,95
Cr	0,92	1,93	0,9	0,99
Mn	1,55	2,59	1,51	1,68
Fe	67,4	148	43,2	43,8
Cu	2,57	3,56	22,4	4,4

Tabelle 1: Auszug an Elementen aus der Rostaschenfraktion 0 bis 4 mm in g/kg.

3.2 Mineralogie der Rostaschen

Der Großteil der kristallinen Materie in der Rostaschenfraktion 0 bis 4 mm besteht aus Quarz (SiO_2), Calcit (CaCO_3), Plagioklas ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) und Melilith ($\text{Ca}_2\text{Mg}[\text{Si}_2\text{O}_7]$ – $\text{Ca}_2\text{Al}[\text{AlSiO}_7]$). Zusätzlich wurden Magnetit (Fe_3O_4), Hämatit (Fe_2O_3), Christobalit (SiO_2) und Halit (NaCl) identifiziert.

Nach der Aufbereitung wurden in der magnetischen Fraktion höhere Anteile an Magnetit und Hämatit nachgewiesen. Der Quarz, Calcit und Feldspat Anteil ist geringer. Zusätzlich konnten Rutil (TiO_2), Wüstit (FeO) und Ettringit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_2(\text{SO}_4)_3] \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$) detektiert werden. Die Nichteisenfraktion weist einen hohen Quarz Anteil auf. Calcit, Melilith, Ettringit und Plagioklas kommen ebenfalls, wenn auch untergeordnet vor.

Die Anteile an Magnetit und Hämatit sind sehr gering. Somit ist davon auszugehen, dass die Konzentrationen an kristallin vorliegenden Nichteisenmetallen, wie zum Beispiel Kupfer, unterhalb der XRD-Nachweisgrenze liegen. Die Restfraktion beinhaltet, wie die Nichteisenfraktion, geringe Mengen Magnetit und Hämatit und höhere Mengen Quarz und Calcit. Zusätzlich wurde Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) identifiziert. In untergeordneter Menge kommen Christobalit, Ettringit und Melilith vor.

Die bisherigen Ergebnisse unterstreichen das Potential von Rostaschen um nach entsprechender Aufbereitung weiter im Stoffkreislauf zu bleiben. Die notwendigen Aufbereitungsschritte für die jeweiligen Einsatzgebiete sind Gegenstand unserer aktuellen Forschung.

Danksagung

Dieses Projekt wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG, www.ffg.at), FFG-Nr. 897764, gefördert. Die Autoren bedanken sich bei allen am Projekt beteiligten Partnern.



Literatur/Quellen

- Austrian Standards International. ÖNORM EN ISO 17294-2:2017 01 15, Wasserbeschaffenheit - Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS), Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope, 2017
- Austrian Standards International. ÖNORM S 2127:2011, Grundlegende Charakterisierung von Abfallhaufen oder von festen Abfällen aus Behältnissen und Transportfahrzeugen. Wien: Austrian Standards International, 2011
- BMK (2021). Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2023 (Referenzjahr 2021)
- Eusden J.D., Eighmy, T. T., Hockert, K., Holland, E., & Marsella, K. (1999). Petrogenesis of municipal solid waste combustion bottom ash. *Applied Geochemistry*, 14(8), 1073–1091.
- Hölln D., Berneder, I., Capo Tous, F., Stöllner, M., Sedlazeck, K.P., Schwarz, T., Aldrian, A., & Lehner, M. (2018). Stepwise treatment of ashes and slags by dissolution, precipitation of iron phases and carbonate precipitation for production of raw materials for industrial applications. *Waste Management (Elmsford)*, Volume 78, 750–762.
- Keber, S., Schirmer, T., Elwert, T., & Goldmann, D. (2020). Characterization of Fine Fractions from the Processing of Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ashes for the Potential Recovery of Valuable Metals. *Minerals (Basel)*, 10(10), 838.
- Wedepohl, K. H. (1995). The composition of the continental crust, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 59, Issue 7, Pages 1217–1232

Wei Y., Shimaoka, T., Saffarzadeh, A., & Takahashi, F. (2011). Mineralogical characterization of municipal solid waste incineration bottom ash with an emphasis on heavy metal-bearing phases. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1-3), 534–543.

Wiles C.C. (1996). Municipal solid waste combustion ash: State-of-the-knowledge. *Journal of Hazardous Materials*, 47(1), 325–344.

Kontakt

MSc, Thomas Kremlicka, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Montanuniversität Leoben / Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel.-Nr. +43 3842 / 402-5106

E-Mail: thomas.kremlicka@unileoben.ac.at

Homepage: <https://www.avaw-unileoben.at/>

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft: Berücksichtigung von Kunststoff-Eigenschaftsprofilen bei der Charakterisierung von Leichtverpackungsabfällen

Abstract: Kunststoffe sind in ihren werkstofflichen Eigenschaften äußerst versatil und können je nach Verwendungszweck individuell modifiziert und in hohen Stückzahlen günstig verarbeitet werden. Diese werkstoffliche Diversität wird in der abfallwirtschaftlichen Praxis häufig auf den Kunststofftyp reduziert. Wenn Werkstoffe jedoch zukünftig möglichst langfristig genutzt werden sollen, müssen während der Aufbereitung weitere Eigenschaften berücksichtigt werden. Eine mögliche Herangehensweise bietet die gezielte Kombination von Artikelmerkmalen zu Eigenschaftsprofilen. In der vorliegenden Untersuchung geben wir eine Übersicht über dafür geeignete Parameter mit dazugehörigen Technischen Eigenschaften sowie während der Abfallcharakterisierung erhebbarer direkter und indirekter Merkmale. Zuletzt wird anhand eines PP-Stoffstroms gezeigt, wie Eigenschaftsprofile für die Abfallsortierung eingesetzt werden können. Durch die Berücksichtigung von Eigenschaftsprofilen auf Stoffstromebene können zukünftig spezifikationsgerechte Rezyklate generiert werden. Dies reduziert den Einsatz von Additiven und fördert das Schließen von Produktkreisläufen.

1 Einleitung

Die isolierte Orientierung der Abfallpolitik an der Abfallhierarchie hat in Europa bzw. seinen Nationalstaaten weder zu einer Reduktion des dortigen absoluten Rohstoffverbrauchs noch zu einer dauerhaften Kreislauf-führung von Stoffen und Materialien geführt (van Ewijk und Stegemann 2016). Die Europäische Kommission hat sich daher für eine holistischere Betrachtung der Kreislaufwirtschaft entschieden, in der Rohstoffgewinnung sowie Produktion in diese miteinbezogen werden (SRU 2020). Maßnahmen dazu werden im Circular Economy Action Plan (vgl. European Commission 11.03.2020) vorgestellt. Für Leichtverpackungen umfassen diese unter anderem die Konkretisierung der Berechnung der Recyclingquote, neue Recyclingquoten für Kunststoffverpackungen in Höhe von 50 % bis 2025 bzw. 55 % bis 2030 (vgl. Directive 94/62/EC 2018) und die Einführung einer Rezyklateinsatzquote in Höhe von 25 % für PET-Einwegflaschen bis 2025 bzw. von 30 % bis 2030 (vgl. Directive 2019/904 2019). Für eine höhere Substitutionsrate von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe ist ein „hochwertiges Recycling“ im Sinne einer höheren Qualität („high-quality recycling“) notwendig. Allerdings wird dieser Begriff auf europäischer Ebene nicht näher spezifiziert (SRU 2020).

In ISO 9000:2015 wird Qualität definiert als „Grad, in dem eine Reihe von inhärenten Eigenschaften eines Objekts Anforderungen erfüllt“. Grant et al. (2020) wenden dieses Verständnis auf das Recycling an und definieren die Qualität des Recyclings als „das Ausmaß, in dem die unterschiedlichen Eigenschaften des Materials (das Polymer, das Glas oder die Papierfaser) in der Recyclingkette erhalten oder zurückgewonnen werden, um ihr Potenzial für die Wiederverwendung in der Kreislaufwirtschaft zu maximieren.“ Die Wiederverwendung hängt von der Funktionalität und Substituierbarkeit der Materialien ab. Funktionalität ist gegeben, wenn ein Material geforderte Funktionen dank einer Reihe von physikalischen und chemischen Eigenschaften erfüllt (Tonini et al. 2022). Der Begriff der Substituierbarkeit baut hierauf auf und beschreibt das Verhältnis der endnutzungsspezifischen Funktionalität eines Sekundärmaterials zur Funktionalität der potenziell verdrängten Alternativprodukte (Vadenbo et al. 2017).

Jenseits dieses materialbezogenen Verständnisses kann der Qualitätsbegriff aber auch auf einer systemischen Ebene verstanden werden. Hierbei bedeutet eine hohe Qualität, dass die dissipativen Verluste handelbarer Materialien möglichst gering sind (Caro et al. 2023).

Die qualitative Diskrepanz zwischen den technischen Eigenschaften von mechanisch recycelten Kunststoffen im Vergleich zu Neuware sind gut beschrieben (z. B. Biron 2020, Ehrenstein 2011, Ragaert et al. 2017): Belastungen wie Hitze, Feuchtigkeit, Strahlung, Sauerstoff und Scherung während des Produktlebenszyklus und der (Wieder-)Verarbeitung schädigen das Polymer. Beispielhafte Konsequenzen sind

- rheologische Veränderungen durch Oxidation und Kettenspaltung (verminderte Viskosität) oder Vernetzung (erhöhte Viskosität),
- Abnahme der mechanischen und thermischen Eigenschaften wie Zugfestigkeit und Elastizitäts-Modul,
- reduzierte Alterungsbeständigkeit, Entflammbarkeit und elektrische Eigenschaften durch den Verlust von Schutzadditiven,
- Veränderung der chemischen Struktur durch die Aufnahme von Chemikalien während des Lebenszyklus,
- reduzierte Farbtreue,
- und die Emission unerwünschter Gerüche.

Je nach Anwendung können die oben genannten Veränderungen durch eine schonende Verarbeitung und den Einsatz von Additiven wie Wärmestabilisatoren, Schlagzähmodifikatoren, Vernetzern, Kompatibilisatoren, Pigmenten und Füllstoffen reduziert werden (Elsner und Domininghaus 2007).

Gegenstand des vorliegenden Beitrags ist die Konkretisierung des Qualitätsbegriffs auf Leichtverpackungsabfälle aus Kunststoff. Hierzu wurden zuerst Parameter gesammelt, die direkt oder indirekt zur Erstellung von Eigenschaftsprofilen eingesetzt werden können. Idealerweise sind diese mittels Sensoren automatisiert erfassbar. In einem zweiten Schritt wurden bzw. werden Abfälle aus der getrennten Sammlung (gelbe Tonne / gelber Sack) in Österreich anhand dieser Parameter charakterisiert. Zuletzt wird die Übertragbarkeit dieser Parameter bzw. Eigenschaftsprofile exemplarisch anhand eines PP-Stoffstroms untersucht.

2 Material und Methode

Als Grundlage für die Erstellung von Eigenschaftsprofilen diente das Rahmenwerk von Caro et al. (2023). Dieses umfasst fünf Parameter: Mechanische Eigenschaften, Verarbeitbarkeit, Chemikalienbelastung, Gesetzliche Vorgaben und Ästhetische Eigenschaften. Jeder Parameter kann durch weitere Technische Eigenschaften spezifiziert werden, die wiederum durch direkt oder indirekt messbare Eigenschaften erfasst und näher beschrieben werden können (vgl. Tabelle 1)

Tabelle 1: Übersicht über die Parameter zur Bildung von Eigenschaftsprofilen mit den dazugehörigen Technischen Eigenschaften und den während der Abfallcharakterisierung erhobenen direkten und indirekten Merkmalen.

Parameter	Technische Eigenschaft	Erfasste direkte / indirekte Merkmale
Mechanische Eigenschaft	Elastizitätsmodul	Werkstoff, Formstabilität, Partikelgröße, Opazität
	Schlagzähigkeit	Werkstoff, Formstabilität, Partikelgröße, Opazität
	Zugfestigkeit	Werkstoff, Formstabilität, Partikelgröße, Opazität
Verarbeitbarkeit	Schmelzflussrate	Verarbeitungsart, Metallisierung, Materialverbund
Ästhetische Eigenschaft	Farbe	Farbe, Bedruckungsgrad, Labeltyp
	Geruch	Packgut / Produktart
	Additive	Packgut / Produktart
	Schwermetallgehalt	Packgut / Produktart
Chemikalienbelastung	Besonders besorgniserregender Stoff (SVHC)	Packgut / Produktart
	Unabsichtlich eingebrachte Stoffe (NIAS)	Packgut / Produktart
	Lebensmittelkontakt	Packgut / Produktart
Gesetzliche Vorgaben	REACH	Packgut / Produktart

Mechanische Eigenschaften hängen von der Anwendung bzw. der erwarteten Lebensdauer ab und sind teilweise sehr produktspezifisch. Sie können durch Technische Eigenschaften wie das Elastizitätsmodul, die Schlagzähigkeit oder die Zugfestigkeit beschrieben werden. Sie sind werkstoffspezifisch, können jedoch in einem gewissen Fenster modifiziert werden. Eine weitere Eingrenzung kann durch Beschreibung der Formstabilität, der Partikelgröße sowie der Opazität erfolgen.

Die Verarbeitbarkeit ist definiert als das Verhalten und die Wechselwirkungen von Polymeren, Füllstoffen, Ölen und anderen Additiven während der verschiedenen Verarbeitungsstufen, wie z. B. Mischen, Extrudieren, Kalandrieren und dem Formgebungsprozess. Sie kann entlang der Wertschöpfungskette variieren bzw. modifiziert werden. Im Kontext des Kunststoffrecyclings sind insbesondere abweichende Werkstoffe sowie die Rheologie der Polymerschmelze relevant. Auf Artelebene kann die Verarbeitbarkeit durch das Bestehen von Materialverbunden, Metallisierung sowie der produktspezifischen Verarbeitungsart beschrieben werden.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist Ästhetische Eigenschaft. Der Marktpreis von Rezyklaten hängt von deren Farbe sowie Geruch ab. Neben der dominierenden Farbe des Ausgangsprodukts wird die Farbe eines Rezyklats auch von dem Bedruckungsgrad bzw. dem Labeltyp des Ausgangsprodukts beeinflusst. Der Geruch von Rezyklaten hingegen wird besonders durch das Packgut bzw. die Produktart bestimmt.

Toxikologisch relevante Eigenschaften wie der Einsatz von Additiven, besonders besorgniserregenden Substanzen (SVHC), Schwermetallen oder Unabsichtlich Eingebachten Stoffen (NIAS) können unter dem Parameter Chemikalienbelastung subsummiert werden. Diese Eigenschaften sind insbesondere bei Abfällen schwierig auf Artekelebene festzustellen, jedoch durch Packgut bzw. Produktart qualitativ erfassbar.

Damit Materialien innerhalb bestimmter Anwendungen einsetzbar sind bzw. innerhalb bestimmter Märkte eingesetzt werden dürfen, müssen sie bestimmten Gesetzen oder Standards entsprechen. Beispielhaft seien die Anforderungen der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) und der REACH-Gesetzgebung genannt. Auch diese Eigenschaften sind bei Abfällen schwierig auf Artekelebene festzustellen und ebenfalls zumindest durch Packgut bzw. Produktart qualitativ erfassbar.

Im Jahr 2023 erfolgte eine österreichweite Probenahme-Kampagne von Abfällen aus der getrennten Sammlung (gelbe Tonne / gelber Sack), in der insgesamt etwa 1.300 kg Proben gesammelt wurden. Diese werden aktuell auf Partikelebene charakterisiert und in einer Datenbank gesammelt. Weitere Informationen zur Probenahme und zum Vorgehen können Kuhn et al. (2023) entnommen werden.

Die Datenbank lässt sich nun nach beliebigen Eigenschaftsprofilen filtern und auswerten, für diesen Beitrag exemplarisch nach Werkstoff (PP), Formstabilität (Hartkunststoffe), Opazität (opak), Farbe (weiß), Materialverbunde (Monomaterial), Produktart (Verpackung) und Verarbeitungsart.

3 Ergebnisse und Ausblick

In Abbildung 1 ist die Korngrößenverteilung von weißen PP-Leichtverpackungen nach Verarbeitungsart dargestellt. Es dominieren spritzgegossene Verpackungen, gefolgt von thermogeformten Verpackungen. Während die spritzgegossenen Verpackungen bimodal über den gesamten betrachteten Korngrößenbereich verteilt sind (mittig), sind thermogeformte Verpackungen in einem schmalen Fenster zwischen 5-20 cm rechtsschief verteilt (rechts).

Die bisher erhobenen Daten beschreiben die Beschaffenheit der getrennten Sammlung von Kunststoffverpackungen in Österreich auf Partikelebene und stellen die Grundlage für die Formulierung von Eigenschaftsprofilen. Je nach endnutzungsspezifischer Funktionalität können nun industrietaugliche Eigenschaftsprofile definiert werden. Diese können wiederum als Grundlage für die automatisierte, sensorbasierte Sortierung dienen. Das vorgestellte Beispiel der Eigenschaftsprofile PP-Hartkunststoff-opak-weiß-Monomaterial-Verpackung-Verarbeitungsart stellt drei anwendungsbezogene Eigenschaftsprofile dar, welche aktuell nicht in der Sortierung berücksichtigt werden. Den resultierenden Rezyklaten wird jedoch ein hohes Substitutionspotential zugewiesen (vgl. Faraca und Astrup 2019, Mager et al. 2023).

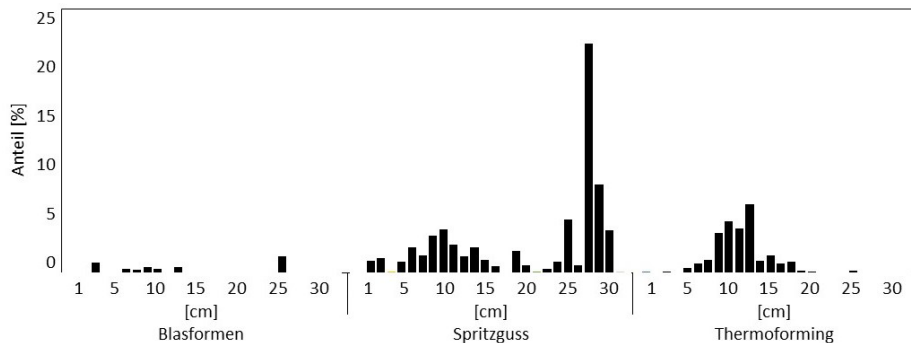


Abbildung 1: Prozentueller Anteil der Korngrößen [cm] weißer Leichtverpackungen aus der getrennten Sammlung in Österreich aus dem Werkstoff PP nach Verarbeitungsart (Blasformen, Spritzguss, Thermoforming)

Danksagung

Das Projekt *circPLAST-mr* wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft im Rahmen des Programms „Energie der Zukunft, Kreislaufwirtschaft 2021 (KP)“ im Rahmen der Fördervereinbarung 4238670 gefördert.

Literatur/Quellen

- Biron, Michel (2020): A practical guide to plastics sustainability. Concept, solutions, and implementation. Kidlington, Osford, Cambridge, MA: William Andrew, Applied Science Publishers (Plastics design library).
- Caro, D.; Albizzati, P. F.; Cristóbal Garcia, J.; Saputra Lase, I.; Garcia-Gutierrez, P.; Juchtmans, R. et al. (2023): Towards a better definition and calculation of recycling. Publications Office of the European Union. Luxembourg (JRC Science for Policy Report). Online verfügbar unter doi:10.2760/636900, zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- Directive 2019/904 (2019): Directive 2019/904/EC of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment („Single Use Plastics Directive“). Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>, zuletzt geprüft am 07.11.2023.
- Directive 94/62/EC (2018): European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste („Packaging and Packaging Waste Directive“). Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/eli/dir/1994/62/2018-07-04>, zuletzt geprüft am 07.11.2023.
- Ehrenstein, Gottfried W. (2011): Polymer-Werkstoffe. Struktur - Eigenschaften - Anwendung. 3. Auflage. München: Hanser. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446429673>.
- Elsner, Peter; Dominghaus, Hans (Hg.) (2007): Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen. 7., neu bearb. u. erw. Aufl. Berlin: Springer (VDI), zuletzt geprüft am 29.04.2022.
- European Commission (11.03.2020): A new Circular Economy Action Plan. CEAP. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF, zuletzt geprüft am 07.06.2022.

- Faraca, Giorgia; Astrup, Thomas (2019): Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability. In: Waste management (New York, N.Y.) 95, S. 388–398. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.038.
- Grant, Andy; Cordle, Mark; Bridgwater, E. (2020): Quality of Recycling - Towards an operational definition. P. Canfora, M. Dri, Ioannis Antonopoulos und P. Gaudillat. Publications Office of the European Union. Luxembourg.
- Kuhn, Nikolai; Koinig, Gerald; Tischberger-Aldrian, Alexia (2023): Comprehensive Characterisation of Lightweight Packaging Waste to improve Recycling. In: Eurowaste (Hg.): Symposium Proceedings. International Symposium on Waste Management and Sustainable Landfilling SARDINIA 2023. Cagliari (Italy), 09.10.2023-13.10.2023. Eurowaste Srl. Padova.
- Mager, Moritz; Berghofer, Michael; Fischer, Joerg (2023): Polyolefin Recyclates for Rigid Packaging Applications: The Influence of Input Stream Composition on Recyclate Quality. In: Polymers 15 (13). DOI: 10.3390/polym15132776.
- ISO 9000:2015: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe.
- SRU (2020): Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa. Umweltgutachten 2020. Unter Mitarbeit von Claudia Hornberg, Manfred Niekisch, Christian Calliess, Claudia Kemfert, Wolfgang Lucht, Lamia Messari-Becker und Vera Susanne Rotter. Hg. v. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). Online verfügbar unter https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umwelt_gutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Kap_03_Kreislaufwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 02.01.2024.
- Tonini, Davide; Albizzati, Paola Federica; Caro, Dario; Meester, Steven de; Garbarino, Elena; Blengini, Gian Andrea (2022): Quality of recycling: Urgent and undefined. In: Waste management (New York, N.Y.) 146, S. 11–19. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.04.037.

Kontakt

M.Sc., Nikolai Kuhn, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Montanuniversität Leoben

Tel.-Nr.: +43 (0) 3842 / 402 - 5117

E-Mail: nikolai.kuhn@unileoben.ac.at

Homepage: <https://www.avaw-unileoben.at/>

Ökobilanzielle Beurteilung des Einsatzes von Einweg- und Mehrweggeschirr auf Großveranstaltungen

Am Beispiel des Bremer Open-Air-Kulturfestivals Breminale

Abstract: *Veranstaltungen mit hohen Besucher:innenzahlen verursachen u.a. durch den Einsatz und die Nutzung von Einweggeschirr erhebliche negative Umweltwirkungen. Im Land Bremen wurde ein Mehrweggebot für Veranstaltungen und Märkte auf Grundstücken und Einrichtungen der Stadt erlassen, das seit dem Jahr 2023 für Getränkebecher sowie seit 2024 auch für Geschirr und Besteck gilt. Am Beispiel der Großveranstaltung Breminale 2022, mit etwa 180.000 Besucher:innen, wurden die Umweltwirkungen des eingesetzten Geschirrs im Rahmen des Forschungsprojekts zoCat (<https://www.iekrw.de/zocat/>) ermit­telt. Zu diesem Zweck wurden auf der Breminale Geschirrproben von den Standbetreibenden gesammelt und im Labor die Materialeigenschaften bestimmt. Auf Grundlage der untersuchten Geschirrproben erfolgte die Beurteilung der Umweltwirkungen in Anlehnung an die DIN EN ISO 14040/44. Dabei wurden die Wirkungskategorien Klimawandel, abiotisches Erschöpfungspotential und Wasserverbrauch untersucht. Für drei Mehrwegverpackungen wurden die Mindestumlaufzahlen ermittelt, die im Vergleich zu den Einwegalternativen notwendig sind, um geringere Umweltwirkungen im Vergleich zu den Einwegverpackungen zu verursachen. In der Wirkungskategorie Klimawandel kann der Mehrwegbecher 0,2 l aus Polypropylen (PP) beim Spülen vor Ort ab 3 Umläufen einen Vorteil im Vergleich zum Einwegbecher erreichen. Die untersuchte Mehrwegpommeverpackung erreicht bei einer Reinigung vor Ort nach 6 Umläufen einen Vorteil gegenüber einer Pappsackschale. Wird der PP-Teller zur Ausgabe eines Burgers vor Ort gespült, kann nach 19 Umläufen im Vergleich zum Einschlagpapier ein ökologischer Vorteil in der Wirkungskategorie Klimawandel erreicht werden. Für sehr leichte Varianten auf Papierbasis (z.B. Spitztüte für Pommes) konnte keine Mehrwegalternative gefunden werden, die in Bezug auf die untersuchten Wirkungskategorien einen Vorteil hat.*

1 Einleitung

Durch die gezielte Auswahl des Geschirrs ist es möglich, Großveranstaltungen nachhaltiger zu gestalten. Im Januar 2023 trat die Mehrwegangebotspflicht in Deutschland in Kraft (VerpackG). Im Land Bremen wurde zu dem ein Mehrweggebot verabschiedet, das seit dem Jahr 2023 für Getränkebecher sowie seit 2024 auch für Geschirr und Besteck für Speisen gilt. Die Veranstalter:innen der Breminale setzten sich in der

Vergangenheit für das Mehrweggebot auf Großveranstaltungen in Bremen ein und konnten den Einsatz und die Handhabung von Leih-Mehrweggeschirr bereits 2022 erstmalig erfolgreich erproben. Dabei bestand für Anbieter:innen von Speisen und Getränken eine Mehrwegpflicht. Einige Einwegausnahmen wie Spitztüten und Einschlagpapier wurden jedoch zugelassen. Im Rahmen des von der „Deutschen Bundesstiftung Umwelt“ fachlich und finanziell geförderten Forschungsprojekts zoCat (<https://www.iekwr.de/zocat/>) wurde der Einsatz von Mehrwegverpackungen auf Großveranstaltungen auf deren Umweltwirkung hin geprüft und insbesondere im Vergleich zur Nutzung von Einwegverpackungen untersucht. Ein Ziel des Projektes ist es, ein online-gestütztes Entscheidungssystem – Decision Support System (DSS) – zu entwickeln, welches es ermöglicht, auf Basis zuvor eingegebener Angaben zur Veranstaltung eine Empfehlung für das aus Nachhaltigkeitsperspektive beste Geschirr- bzw. Verpackungsprodukt zu finden.

2 Methodisches Vorgehen

Auf der Breminale 2022 wurden Geschirrproben von allen Standbetreibenden eingeholt und anschließend im Labor auf ihre Materialbestandteile hin untersucht. Während der gesamten Veranstaltung, von Mittwoch bis Sonntag, wurden jeweils am Abend die Standbetreibenden zu der ausgegebenen Menge an Geschirr befragt. Außerdem wurden Daten zu den Spüloptionen und dem damit verbundenen Abwasseranfall sowie die Rücklaufquoten des Mehrweggeschirrs erfasst. Parallel wurde eine qualitative Befragung von N=81 Besucher:innen durchgeführt, wobei die Akzeptanz der Besucher:innen in Bezug auf den Einsatz von Mehrweggeschirr ermittelt wurde. Den unterschiedlichen Geschirrvarianten wurden auf Grundlage der Materialzusammensetzung Emissionen in den drei Wirkungskategorien Treibhausgaspotential (GWP – Global-Warming-Potential), abiotisches Erschöpfungspotential (ADP – Abiotic-Depletion-Potential) und Wasserverbrauch (WCP – Water-Consumption-Potential) zugeordnet. Dafür wurden ökobilanzielle Untersuchungen in Anlehnung an die DIN EN ISO 14040/44 durchgeführt. Unter Berücksichtigung der vor- und nachgelagerten Prozesse („von der Wiege bis zur Bahre“, also unter Berücksichtigung der Gewinnung von Rohstoffen bis zur Entsorgung), wurden die Umweltwirkungen des Geschirrs in Bezug auf die gewählten Wirkungskategorien beurteilt. Die Umweltdaten zu den Materialien und Prozessschritten wurden durch eine Literaturrecherche und aus der Umweltdatenbank ecoinvent 3.0 ermittelt.

3 Ergebnisse

Eine ausgegebene Portion stellt die funktionelle Einheit dar. Bei dem Vergleich des Einweg- und Mehrweggeschirrs ist die Größe der Geschirreinheit gleich. Das Spülen und der zusätzliche Transport werden pro Nutzung mitberücksichtigt. In Tabelle 1 sind die ermittelten Rücklaufquoten und erreichten Umläufe dargestellt. Anzumerken ist, dass die technisch möglichen Umläufe von den Tellern und der Snackschale aufgrund von Verschleißerscheinungen bei ca 85 Umläufen liegen (Bertling et al. 2022). Auffällig sind die geringen Rücklaufquoten der Caipi-Cups und der Weingläser. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass wahrscheinlich ein Teil der Trinkgefäße von den Besucher:innen zur anschließenden privaten Nutzung mitgenommen wurde. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass ein Teil des Mehrweggeschirrs aufgrund von Unwissenheit entsorgt wurde. Warum die Rücklaufquoten für Teller deutlich höher sind als bei Bechern, verwundert und konnte nicht ermittelt werden.

Tabelle 1: Erfasste Rücklaufquoten des Leih-Mehrweggeschirrs auf der Breminale 2022

Getränkeverpackung				Lebensmittelverpackung			
Verpackung	Größe	Rücklaufquote	Umläufe	Verpackung	Größe	Rücklaufquote	Umläufe
Becher	0,2 l	97,8 %	45	Teller klein	20 cm	99,8 %	467
Becher	0,3 l	95,5 %	22	Teller groß	24 cm	99,9 %	716
Caipi-cup	0,4 l	89,1 %	9	Schale	500 ml	95,8 %	24
Kaffeebecher	0,2 l	96,7 %	30	Snackschale		98,3 %	159
Weinglas	0,2 l	90,4 %	10	Besteck		90,0 %	10

3.1 Vergleich von Einweg- und Mehrwegverpackungen

In den Abbildungen 1 bis Abbildung 3 wird das Einweg- und Mehrweggeschirr, das auf der Breminale 2022 ausgegeben wurden, unter Berücksichtigung der Umlaufzahlen (Nutzungen) miteinander verglichen. Dabei galt es zu bestimmen, ab wann der ökologische Vorteil in der Wirkungskategorie GWP des Mehrweggeschirrs erreicht werden kann (Mindestumlaufzahl). Dazu wurden die Spüloption und Spülentfernung variiert. Die Entfernung zur Spüloption wurde variiert zwischen 0 km (Spülen vor Ort) und 240 km (reale Entfernung Breminale 2022). Bei der Entfernung wird der Hin- und Rücktransport berücksichtigt.

3.1.1 Vergleich Getränkeverpackung 0,2 l

Der Einwegbecher aus Pappe mit PE Beschichtung wurde im Vergleich mit 2 Mehrwegbecher-Szenarien betrachtet. Dabei erreicht der Mehrwegbecher bereits nach 3 Umläufen (siehe Abb.1) bei einer Transportentfernung von 0 km einen ökologischen Vorteil im Vergleich zur Nutzung von Einwegbechern. Diese Variante stellt das bestmögliche Szenario dar. Dabei wird auf dem Festgelände gespült, sodass der Transport des Geschirrs entfällt. In dem realen Szenario der Breminale wurde nach 7 Umläufen ein ökologischer Vorteil erreicht.

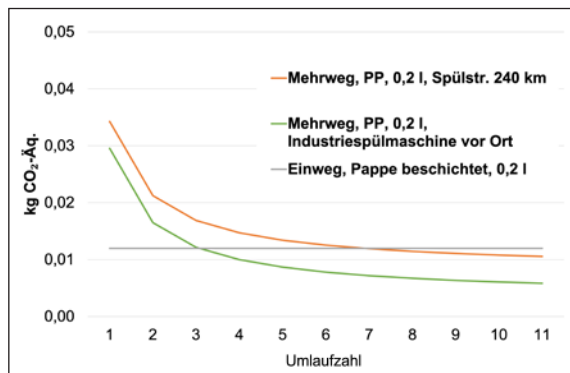


Abb. 1: Vergleich der GWP-Emissionen von drei unterschiedlichen Becher-Szenarien

3.1.2 Vergleich Pommesverpackung

Es wurde als Mehrwegalternative eine PP-Leih-Mehrwegsnackschale mit einer Spitztüte aus Papier und einer Pappsnackschale verglichen. Die Einwegprodukte sind unbeschichtet. Unter den realen Bedingungen auf der Breminalle ist die Snackschale im Vergleich zu einer Einwegsnackschale aus Pappe nach 25 Umläufen ökologisch vorteilhaft. Wird hingegen vor Ort gespült, kann bereits nach 6 Umläufen ein ökologischer Vorteil erreicht werden. Im Vergleich zur Spitztüte aus Papier konnte kein ökologischer Vorteil erreicht werden (siehe Abb. 2).

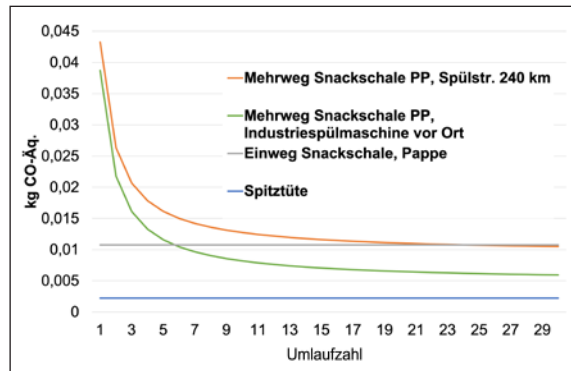


Abb. 2: Vergleich der GWP-Emissionen von vier unterschiedlichen Pommesverpackungsszenarien

3.1.3 Vergleich Burgerverpackung

In Abb. 3 wird ein PP-Mehrwegteller mit einem Durchmesser von 20 cm mit einer Burgerbox, einer Snacktasche und einem Einwickelpapier verglichen. Der Mehrwegteller erreicht im Vergleich zur Burgerbox bei einer Entfernung von 240 km zum Spülort nach 10 Umläufen einen ökologischen Vorteil. Im Vergleich zum Einwickelpapier kann nach 19 Umläufen ein ökologischer Vorteil beim Spülen vor Ort erreicht werden. Im Vergleich zur Snacktasche konnte kein ökologischer Vorteil erreicht werden.

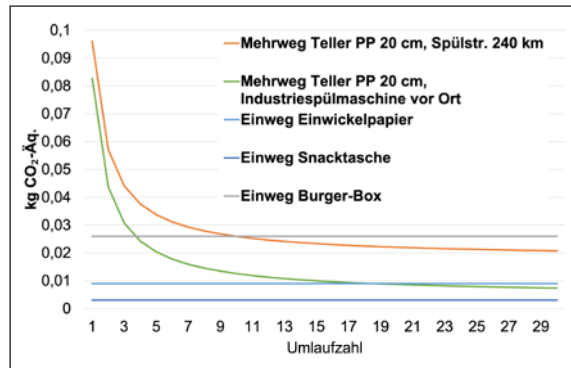


Abb. 3: Vergleich der GWP-Emissionen von fünf unterschiedlichen Burgerverpackungsszenarien

3.2 Akzeptanz von Mehrweggeschirr auf der Breminalle

Die Besucher:innen wurden zum Einsatz des Mehrweggeschirrs befragt. Positiv bewertet wurden das saubere Festivalgelände und einheitliche Portionsgrößen. Bemängelt wurde die Geschirrrückgabe. Gründe hierfür waren u.a. lange Wartezeiten bei den einzelnen Ständen bei der Geschirrrückgabe, teilweise Unklarheiten beim Standpersonal über den Rücknahmeprozess sowie das erhobene Pfand. Neben den

Besucher:innen wurden auch die Standbetreibenden zum neuen Mehrwegsystem befragt. Hierbei wurden einige Bedenken geäußert, wie etwa der Mehraufwand durch das Pfandsystem, Bereitstellung von Wechselgeld, nicht optimale Infrastruktur und lange Wege auf dem Gelände. Als positiv wahrgenommen wurden bspw. die einheitlichen Portionsgrößen und der Wegfall des Spülaufwands.

Literatur/Quellen

- Bertling, J.; Dobers, K.; Kabasci, S.; Schulte, A. (2022): Kunststoffbasierte Mehrwegsysteme in der Circular Economy. Unter Mitarbeit von Fraunhofer-Gesellschaft.
- VerpackG Verpackungsgesetz vom 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 25. Oktober 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 294) geändert worden ist
- 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
- 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

Kontakt

Chaleen Lehwalder, M. Eng. wissenschaftliche Mitarbeiterin
Institut für Energie und Kreislaufwirtschaft an der Hochschule Bremen GmbH
E-Mail: Chaleen.Lehwalder@hs-bremen.de
Projekthomepage: <https://www.iekrw.de/zocat/>

Fettemissionen durch saisonalen Tourismus und effiziente Entfernungstechnologien auf Kläranlagen

Abstract: Im Hotel- und Gastronomiesektor werden große Mengen an Fetten und Ölen eingesetzt. Ein Teil dieser Fette wird beim Wasch- und Reinigungsvorgang in das Abwasser eingetragen. Eine Abtrennung vor Ort durch Fettabscheider und die energetische Nutzung der Fettabscheiderinhalte in Faultürmen sind Stand der Technik. Werden Fettabscheider nicht regelmäßig geleert, so wird ein beträchtlicher Teil der Fette in die Kanalisation verfrachtet. Verfrachtete Fette werden zum Teil in die Kläranlage transportiert und dort in der Vorklä- rung und der biologischen Reinigungsstufe entfernt. Ein neues Verfahren zur Abtrennung von Kohlenstoff aus dem Abwasser (alternierende aktivierte Adsorption – AAA-Prozess) wurde daher auf die Effizienz in der Entfernung von schwerflüchtigen, lipophilen Stoffen und den chemischen Sauerstoffbedarf untersucht.

1 Einleitung

Saisonaler Tourismus ist eine Herausforderung für die Abfallwirtschaft, da in relativ kurzer Zeit große Mengen an Reststoffen anfallen und diese entsprechend dem Stand der Technik entsorgt und behandelt werden müssen. Dies trifft auch auf Fettabscheider zu, da nur bei regelmäßiger Entleerung und Wartung eine effiziente Abscheidung von Fetten möglich ist. Fettabscheiderinhalte können in Faultürmen von Kläranlagen energetisch genutzt werden, da sie durch ihren hohen Energiegehalt und die gute Abbaubarkeit für die anaerobe Vergärung hervorragend geeignet sind (Long et al., 2012). Werden Fettabscheider nicht geleert, wird ein beträchtlicher Teil des Fettes in die Kanalisation verfrachtet. Es ist nicht bekannt, welcher Anteil an verfrachteten Fetten in die Kläranlage transportiert wird, da es in der Kanalisation zur Verseifung, der Bildung von Ablagerungen und dem mikrobiellen Umsatz von Fetten kommt. In der Kanalisation kann dies zu erheblichen Problemen führen und oft werden daraus resultierende Schäden erst nach Jahren entdeckt. Fett, welches in die Kläranlage transportiert wird, liegt entweder in partikulärer, verseifter Form oder als fein dispergiertes oder emulgiertes Fett vor. Partikuläres Fett ist hierbei relativ einfach im Fettabscheider der Kläranlage abzutrennen, wohingegen fein dispergiertes oder emulgiertes Fett durch konventionelle Fettabscheider und Vorklä- rungen schwer zu entfernen ist. Der AAA-Prozess (alternierende aktivierte Adsorption) ist ein neuer Prozess zur Vorklä- rung von Abwasser (Wett et al., 2020) und bereits in europäischen Kläranlagen in Betrieb. Zwei kontinuierliche Reaktoren durchlaufen alternierend folgende Reaktionsschritte: Belüftungsphase, Absetzphase, Schlammabzug, Befüllen/Entleeren. Der Zulauf zum Reaktor befindet sich am Boden und das Abwasser durchströmt das abgesetzte Schlammbett. Dieses dient als Filter für das Abwasser und die Schmutzstoffe werden durch aktive und passive Ad- und Absorptionsprozesse entfernt. Dadurch kann ein beträchtlicher Teil des organischen Kohlenstoffs aus der Wasserlinie entfernt werden. Die abgeschiedene Organik wird mit den im Prozess anfallenden Schlämmen in den Faulturm überführt und kann dort energetisch, in Form von Biomethan, genutzt werden. Ziel der Arbeit ist die Beurteilung der Effizienz der Fettabscheidung auf der

Kläranlage, mit besonderem Fokus auf der AAA-Stufe, und die Erstellung von Bilanzen der schwerflüchtigen lipophilen Stoffe (SLS) und chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) Abscheidung.

2 Methodik

2.1 Mengenermittlung Fettabscheiderinhalte

In einer Region am Achensee in Tirol wurden die Auswirkungen einer optimierten Fettabscheiderwartung auf die erfassbaren Fettmengen untersucht. Im Sommer 2020 wurden die erfassbaren Fettmengen bei einer einmaligen Entleerung am Ende der Saison gemessen und mit einem optimierten Entleerungsintervall im Sommer 2021 verglichen (bis zu 4 Entleerungen pro Saison, abhängig von den vorhandenen Fettabscheider Nenngrößen). Die Dicke der Fettschicht wurde mit einer Sonde (VOTEC, Deutschland) oder mittels Lasermessung bei den Entleerungen ermittelt. Die wichtigsten Parameter der Fettproben, wie gesamtflüchtige Bestandteile (DGF C-III 12 (97)), Asche (DGF C-III 10(97)) und Biogaspotential 21d nach VDI 4630 (2016) in einem automatisierten Biomethan Batchtest (AMPTS II, bioprocess control, Schweden), wurden im Labor bestimmt.

2.1 Abwasseruntersuchungen und Bilanzierung

Ein Probennehmer wurde an einer lokalen Pumpstation in der Testregion installiert, um das Einbringen von Fetten ins Abwasser zu analysieren. Die Messungen fanden sowohl während der Hochsaison im Juli und August als auch während der Nebensaison Anfang November statt. Zusätzlich wurden in der Verbandskläranlage zwei Messkampagnen durchgeführt, um die bedeutendsten Abwasserparameter mit und ohne Tourismus zu ermitteln Diese Messungen wurden im November (VZ 1, Nebensaison) und im Jänner (VZ 2, Hochsaison durch Skitourismus) durchgeführt. Der Fokus lag hierbei auf der Vorklärung. Die Kläranlage nutzt seit 2020 den AAA-Prozess im Vollbetrieb. Ein Schema der Kläranlage ist in Abbildung 1 dargestellt. Mittels automatischer Probennehmer wurden über einen Zeitraum von 6 Wochen in jeder Testperiode Abwasserproben an drei Messpunkten genommen. Die Messpunkte sind wie folgt: Zulauf [1], Sand und Fettfang [2], AAA-Stufe [3]. Das Abwasser wurde im Labor auf CSB und SLS (DIN ISO 11349:2015, 2015) untersucht und Bilanzen der Parameter CSB und SLS erstellt.

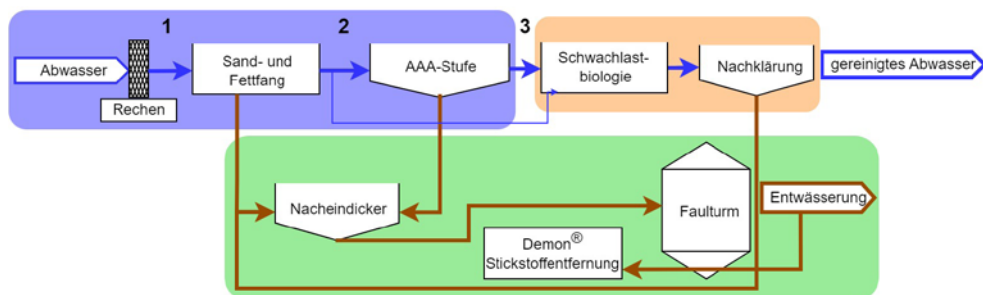


Abbildung 1: Schema der Kläranlage mit Vorklärung (blau), biologischer Stufe (orange) und Schlammbehandlung (grün).

Die Standorte der automatischen Probennehmer sind an der jeweiligen Stelle nummeriert.

Geändert nach (Lichtmanegger et al., 2024)

3 Ergebnisse und Diskussion

Durch optimierte Entleerungsintervalle konnte die abscheidbare Fettmenge aus Fettabscheidern verdoppelt werden. Zusätzlich erzielten die durch regelmäßige Entleerung des Fettabscheiders gewonnenen Inhalte einen um 16% höheren Biomethanertrag im Vergleich zum Fett, das bis zu 5 Monate im Fettabscheider verbleibt. Dies bedeutet, dass ein erheblicher Teil an Fetten in die Kanalisation verfrachtet wird, wenn Fettabscheider nicht geleert werden. Die Abwassermessungen vor Ort zeigten, dass 80% der in das Abwasser eingetragenen SLS auf den saisonalen Tourismus zurückzuführen sind (Lichtmanegger et al., 2024). In der Kanalisation unterlaufen Fette die verschiedensten Prozesse (mikrobieller Abbau, Verseifung, Ablagerungen). Eine Kamerabefahrung hat gezeigt, dass Fettablagerungen in der Testregion fast ausschließlich in Pumpstationen auftreten. Diese werden zweimal im Jahr beseitigt und bestehen aus Sand, verseiftem Fett und Speiseresten. Schäden an der Kanalisation, verursacht durch Fette, konnten im Zuge der Befahrung nicht festgestellt werden. Aufgrund der lokalen Gegebenheiten (Mischkanalisation, regelmäßige Spülstöße durch Regen) wird angenommen, dass ein großer Teil der Fette, welche in die Kanalisation gelangen, in die Kläranlage verfrachtet werden. Andere Autoren hingegen berichten von massiven Problemen und Ablagerungen verursacht durch Fette [Husain et al. (2014), Wallace et al. (2017)].

Die Bilanzierung der Vorklärung zeigt, dass der AAA-Prozess sowohl für die Entfernung von CSB als auch für die Entfernung von SLS für beide Versuchszeiträume sehr effektiv ist. Die gesamte Vorklärung entfernte 56% des CSB und 62% der SLS in der Nebensaison (VZ 1) und 53% des CSB und 54% der SLS in der Hauptsaison (VZ 2). In der Hauptsaison kommt es zu einem massiven Anstieg der Abwasserbelastung (Einwohnergleichwerte +37%; CSB +58%) bei gleichzeitig niedrigeren Temperaturen. Die Entfernung von SLS im Sand und Fettfang [2] ist relativ ineffizient (12% für VZ 1 und 2), funktioniert jedoch sehr gut für grobe Partikel. Eine Quantifizierung der dort abgeschiedenen Fettpartikel ist jedoch aufgrund der fehlenden Mengen-Erfassung nicht möglich. In der AAA-Stufe [3] werden im VZ 1 47% des CSB und 53% der SLS entfernt, in VZ 2 44% des CSB und 45% der SLS. Die Reduktion der Entfernungsraten in der Hochsaison lässt sich auf den massiven Anstieg der Abwasserbelastung im Vergleich zur Nebensaison zurückführen (Lichtmanegger et al., 2024). Zudem erhöht die stark gesteigerte Fettmenge in der Hochsaison die Belastung des Filterschlammes in der AAA-Stufe erheblich und kann zu einer Sättigung des Schlammes führen.

4 Zusammenfassung

Moderne Verfahren ermöglichen eine effiziente Entfernung von CSB und SLS auf der Kläranlage. Eine regelmäßige Entleerung von Fettabscheidern und der Transport der Fettabscheiderinhalte zur Kläranlage ist jedoch die bessere Variante, da zum einen Folgeschäden in der Kanalisation ausgeschlossen werden können und zum anderen der Energieertrag von frischem Fett höher ist. Des Weiteren wird für die Fettentfernung auf der Kläranlage Belüftungsenergie benötigt und ein Teil der in der Organik gebundenen chemischen Energie wird von den Bakterien umgesetzt.

Danksagung

Das Projekt FAFODI wird durch die Europäische Union, Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung, Interreg Österreich-Bayern 2014-2020 gefördert. Förderzeitraum: 11/2018- 04/2022

Literatur/Quellen

- DIN ISO 11349:2015. Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von schwerflüchtigen lipophilen Stoffen - Gravimetrisches Verfahren (ISO 11349:2010) Beuth Verlag GmbH, 2015, pp. 12.
- Husain IAF, Alkhatib MF, Jammi MS, Mirghani MES, Bin Zainudin Z, Hoda A. Problems, Control, and Treatment of Fat, Oil, and Grease (FOG): A Review. *Journal of Oleo Science* 2014; 63: 747-752.
- Lichtmanegger T, Hell M, Wehner M, Christian E, Bockreis A. Seasonal tourism's impact on wastewater composition: Evaluating the potential of advanced primary treatment. . in submission 2024.
- Long JH, Aziz TN, de los Reyes FL, Ducoste JJ. Anaerobic co-digestion of fat, oil, and grease (FOG): A review of gas production and process limitations. *Process Safety and Environmental Protection* 2012; 90: 231-245.
- VDI 4630. Fermentation of organic materials - Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Verein Deutscher Ingenieure, 2016.
- Wallace T, Gibbons D, O'Dwyer M, Curran TP. International evolution of fat, oil and grease (FOG) waste management – A review. *Journal of Environmental Management* 2017; 187: 424-435.
- Wett B, Aichinger P, Hell M, Andersen M, Wellym L, Fukuzaki Y, et al. Operational and structural A-stage improvements for high-rate carbon removal. *Water Environ Res* 2020; 92: 1983-1989.

Kontakt

MSc Thomas Lichtmanegger, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Universität Innsbruck / AB Umwelttechnik, Abfall und Ressourcenmanagement

Tel.-Nr. +43 512 507 62196

E-Mail: thomas.lichtmanegger@uibk.ac.at

Homepage: <https://www.uibk.ac.at/umwelttechnik/index.html.de>

Zooming into Austria – Status und Steigerungspotentiale von Recyclingquoten für Verpackungsabfälle innerhalb einer Modellregion

Abstract: Viele EU-Mitgliedstaaten müssen ihre Recyclingquoten für Verpackungsabfälle erhöhen, um die kommenden EU-Ziele zu erreichen. Um die gegebenen Steigerungspotentiale zu ermitteln, ist es zunächst notwendig, den Status und die Herkunft der jeweiligen Anteile der Recyclingquoten zu kennen. Dieser Konferenzbeitrag untersucht Papier-, Glas-, Metall- und Kunststoff-verpackungsabfälle in einer Modellregion in Tirol im Westen Österreichs. Erfassungsgrade und Recyclingquoten wurden berechnet, ebenso wie die Herkunft der jeweiligen Beiträge: getrennt gesammelt oder durch Sortierung von gemischten Siedlungsabfällen (MSW). Für Papier und Glas wurden ausreichende Erfassungsgrade ermittelt, um die Recyclingziele für 2025/30 zu erreichen. Ein leichter Anstieg der Papiersammlung bis 2030 wird jedoch als notwendig erachtet. Die Gewinnung von Metallverpackungen in Anlagen zur technischen Sortierung von gemischten Siedlungsabfällen (MRFs) ist für das Erreichen der Ziele von entscheidender Bedeutung, da die getrennte Sammlung allein nicht ausreicht. Bei Kunststoffen besteht der größte Bedarf der Steigerung des Recyclings. MRFs für gemischte Siedlungsabfälle können eine Schlüsselrolle bei der Erreichung der Recyclingziele und allgemein bei der Entwicklung hin zu mehr Kreislaufwirtschaft spielen.

1 Einleitung

Umweltbelastungen, Ressourcenknappheit und die sich daraus ergebenden gesetzlichen Anforderungen (Europäisches Parlament und Rat, 2018) führen für die EU-Mitgliedstaaten zu einer notwendigen Erhöhung der Recyclingquoten für Verpackungsabfälle. Es stehen nun verschiedene Methoden zur Verfügung, um die Zirkularität der Zielfraktionen innerhalb eines bestehenden Abfallwirtschaftssystems zu erhöhen. Zu diesen Optionen gehören unter anderem die Vermeidung von nicht recycelbaren Verpackungsmaterialien und eine weitere Erhöhung der Recyclingfähigkeit von Produkten, die Verbesserung der Sortiereffizienz von Abfallsortieranlagen und die Rückgewinnung von Wertstoffen aus Abfallverbrennungsrückständen (Lederer et al., 2022). Notwendige Voraussetzungen für Veränderungen dieser Systeme sind verfügbare und robuste Daten über die bestehende Abfallsammlung, Sortierung und Behandlung. Eine effiziente Anpassung des Abfallwirtschaftssystems erfordert zudem Informationen über den Beitrag jeder Stufe zu den Recyclingquoten. Der vorliegende Konferenzbeitrag hat das Ziel, diese Informationen für ein Fallstudiengebiet in Österreich bereitzustellen, um somit Optionen zur Erreichung der Recyclingziele vorstellen und diskutieren zu können. Aufgrund beobachtbarer Sättigungseffekte und gestiegener Kosten der getrennten Sammlung

(Feil et al., 2017; Haupt et al., 2018) konzentriert sich dieser Artikel auf eine sensorgestützte Sortierung von Siedlungsabfällen in einer Modellregion in Westösterreich.

2 Methodik

2.1 Beschreibung des Fallstudiengebiets

Die untersuchte Region liegt im Bundesland Tirol, Westösterreich, mit einer Bevölkerung von rund 400.000 Einwohner*innen im Jahr 2021 (Statistik Austria, 2021). Im Fallstudiengebiet sind sowohl ländliche als auch städtische Gebiete zu finden. Verpackungsabfälle werden über verschiedene getrennte Sammelsysteme erfasst: Glas- und Metallverpackungsabfälle werden getrennt gesammelt, Leichtverpackungsabfälle (LVP) über eine gemischte Sammlung, die aus Kunststoffverpackungen und Getränkekartons besteht. Verpackungsabfälle aus Papier und Pappe werden zusammen mit Nichtverpackungspapier und Kartonnagen gesammelt. Die Sammelinfrastruktur der Region für Siedlungsabfälle beinhaltet sowohl Hol- als auch Bringsysteme. Im Fallstudiengebiet werden eine Anlage zur Sortierung für LVP-Abfällen und eine für die Sortierung von gemischten Siedlungsabfällen, insbesondere Rest-, Sperr- und Gewerbemüll, betrieben. Bei der Sortierung gemischter Siedlungsabfälle werden nicht nur Eisen- und Nichteisenmetalle zurückgewonnen, sondern auch Abfallfraktionen mit unterschiedlichen Heizwerten für die Verbrennung erzeugt. Die Outputs dieser Anlagen und die oben erwähnten Altstoffe werden innerhalb Österreichs weiter behandelt, verwertet und recycelt.

2.2 Erfassungsgrad und Recyclingquoten von Verpackungsabfällen

Um den Stand der aktuellen Recyclingziele im Fallstudiengebiet zu ermitteln, wurden zunächst die jeweiligen Erfassungsgrade und Recyclingquoten von Papier-, Glas-, Metall- und Kunststoffverpackungsabfällen berechnet. Die Ergebnisse basieren auf manuellen Sortieranalysen, die im Auftrag der Tiroler Landesregierung durchgeführt wurden (TB Hauer, 2019). Für Metall- und Kunststoffverpackungsabfälle wurden Beiträge bzw. mögliche Beiträge der Sortierung von gemischten Siedlungsabfällen mittels einer Materialflussanalyse berechnet sowie Szenarien modelliert und getestet. Durch die methodische Vorgehensweise können Herkunft und Defizite der Recyclingquoten sichtbar gemacht und gegebene Steigerungspotenziale für das Recycling der verschiedenen Verpackungsabfälle identifiziert werden. Dieser Ansatz des „Zoomens“ erlaubt eine beitragsorientierte Analyse einzelner Prozesse, Anlagen und geographischer Gebiete hinsichtlich der Recyclingquoten.

3 Ergebnis

Im Fallstudiengebiet wurde ein Erfassungsgrad von 89 % für Papier-, 83 % für Glas-, 67 % für Metall- und 65 % für Kunststoffverpackungsabfälle ermittelt. Bezüglich der Recyclingziele für 2025, reichen die Erfassungsgrade aus, um die respektiven Ziele für Papier- sowie Glasverpackungsabfälle zu erreichen. Der österreichische Trend rückläufiger Recyclingquoten für Papierverpackungsabfälle könnte jedoch auch sinkende Recyclingquoten für Papier im Fallstudiengebiet bedeuten. Daraus folgt, dass dieser Fraktion in Zukunft mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden muss um weiterhin die Recyclingziele zu erreichen.

Im Gegensatz dazu ist der Erfassungsgrad für Metallverpackungsabfälle zu niedrig, um die für 2025 und 2030 festgelegten Recyclingziele zu erreichen. Die getrennte Sammlung kann bei Metallverpackungsabfällen zu einer Recyclingquote bis etwa 62 % beitragen. Da jedoch die Sortierung gemischter Siedlungsabfälle bereits erfolgreich integriert ist, werden auf diese Weise erhebliche Mengen an Metallverpackungsabfällen zugeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Recyclingrate um 26 % höher ist und bei 88 % liegt.

Bei Kunststoffverpackungsabfällen reicht die getrennte Sammlung nicht aus, um das Recyclingziel zu erreichen. Derzeit liegt die Recyclingquote für Kunststoffverpackungsabfälle bei etwa 25 %. Das Pfandsystem für Einweg-Getränkeflaschen aus Kunststoff, das in Österreich bis zum Jahr 2025 eingeführt werden soll, wird wahrscheinlich zu einem Anstieg der Recyclingquote für Kunststoffverpackungsabfälle führen. Allerdings reicht diese Maßnahme nicht aus, um das 55 %-Ziel zu erreichen; Getränkeflaschen entsprechen weniger als 20 % des Kunststoffverpackungsabfallstroms in Österreich und zeigen bereits eine vergleichsweise hohe Recyclingquote auf (Van Eygen, 2018). Dies lässt wenig Raum für Verbesserungen. Im Gegensatz zum Pfandsystem sieht das österreichische Abfallrecht keine Verbesserung der Sortierung von Kunststoffverpackungen aus gemischten Siedlungsabfällen vor. Analysen haben gezeigt, dass etwa 5 - 6 % der gemischten Siedlungsabfälle in der Region aus Kunststoffverpackungen bestehen (TB Hauer, 2019). Dies bedeutet, dass ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Recyclingquoten durch die Sortierung gemischter Siedlungsabfälle vorhanden ist und daher weiter untersucht werden sollte.

4 Diskussion

Die Einführung einer technischen Sortierung von gemischten Siedlungsabfällen wurde bereits als notwendig erachtet, um die gesetzten Recyclingziele in Österreich zu erreichen (Hauer et al., 2020). Die Verwertung von Kunststoffverpackungen aus gemischten Siedlungsabfällen kann als zusätzliche Maßnahme zur Erhöhung der Recyclingquoten angesehen werden. Barrieren gegen die Einführung stellen derzeit Fragen der Anrechenbarkeit an die Zielvorgaben und der damit verbundenen Rechts- und Investitionssicherheit für Sortieranlagen dar. Weitere Forschungsarbeiten sind nötig, um die Recyclingfähigkeit und Anwendbarkeit, bedenkliche Chemikalien, Prozess- und Emissionsschadstoffe, die Auswirkungen auf Ersatzbrennstoffe, Treibhausgasemissionen und die Energieeffizienz zu bewerten. Teilweise sollten diese Fragen in der künftigen eigenen Forschung behandelt werden.

Mit einem vielschichtigen Netz von Instrumenten und Maßnahmen wie der Verbesserung der Recyclingfähigkeit von Produkten, Pfand- und Rücknahmesystemen für Kunststoffgetränkeverpackungen und der Steigerung der Sortiereffizienz ist eine erhebliche Steigerung des Recyclings insbesondere von Kunststoffverpackungsabfällen möglich. Die Sortierung von gemischten Siedlungsabfällen spielt eine entscheidende Rolle innerhalb der Recyclingketten; sie kann einen positiven sowie notwendigen Beitrag zur Erreichung der festgelegten Recyclingziele leisten (siehe auch Blasenbauer et al., 2023).

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 danken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirt-

schaftsstandort 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

- Blasenbauer, D., Lipp, A.-M., Fellner, J., Aldrian, A., Stipanovic, H., & Lederer, J. (2023). Recovery of packaging materials from MSW. How automated waste sorting can contribute to reaching EU recycling targets. A case study from Austria. [Manuscript in review].
- Europäisches Parlament und Rat. (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. OJ L, 150, pp. 141-154.
- Feil, A., Pretz, T., Vitz, P., & van Velzen, E. U. (2017). A methodical approach for the assessment of waste sorting plants. *Waste Management & Research*, 35(2), pp. 147-154.
- Hauer, W., Merstallinger, M., Allesch, A., Beigl, P., Happenhofer, A., Huber-Humer, M., Obersteiner, G. & Wellacher, M. (2020): Möglichkeiten zur Umsetzung der EU-Vorgaben betreffend Getränkegebinde, Pfandsysteme und Mehrweg – zu Optionen für die Erreichung der EU-Sammelquoten (Endbericht). Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie; Sektion V: Abfallwirtschaft, Chemiepolitik und Umwelttechnologie; Abteilung V/6: Abfallvermeidung, -verwertung und -beurteilung. Wien.
- Haupt, M., Wasner, E., Würmli, J., & Hellweg, S. (2018). Is there an environmentally optimal separate collection rate? *Waste Management*, 77, pp. 220-224.
- Lederer, J., Bartl, A., Blasenbauer, D., Breslmayer, G., Gritsch, L., Hofer, S., Lipp, A.-M., & Mühl, J. (2022). A review of recent trends to increase the share of post-consumer packaging waste to recycling in Europe. *Detritus*, 19, 3. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2022.15198>
- Statistics Austria. (2021). *Bevölkerung der Politischen Bezirke mit 1.1.2021*. Retrieved 05 23, 2022, from https://www.statistik.at/web_de/klassifikationen/regionale_gliederungen/politische_bezirke/index.html
- TB Hauer. (2019). Analysen des Restabfalls in Tirol 2018/19. Technisches Büro Hauer, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft Universität für an der Universität für Bodenkultur, Umwelt Consulting Baumann e.U. und Technisches Büro Umweltschutz im Auftrag Amt der Tiroler Landesregierung. Bericht. Innsbruck, Korneuburg.
- Van Eygen, E., Laner, D., & Fellner, J. (2018). Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in Austria. *Waste management*, 72, pp. 55-64.

Kontakt

Dipl.-Ing. in Anna-Maria Lipp BSc, Projektassistentin (Prae Doc)

TU Wien, CD-Labor für recyclingbasierte Kreislaufwirtschaft, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und techn. Biowissenschaften

Tel.-Nr.: +43 1 58801 166156

E-Mail: anna-maria.lipp@tuwien.ac.at

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

Gipsrecycling – Entfernen von Siloxanen

Abstract: Gipskartonplatten sind in verschiedenen Branchen, insbesondere im Bauwesen, verbreitet. Hydrophobierte Varianten finden Einsatz in Feuchträumen wie Badezimmern, wobei Siloxane für wasserabweisende Eigenschaften dem Gips im Anmachwasser beigelegt werden. Eine Herausforderung im Recyclingverfahren alter Gipskartonplatten liegt in der Präsenz von Siloxanen. Aktuell werden diese Platten separat gesammelt und deponiert oder dem Recyclingprozess in geringen Mengen beigelegt. Siloxane agieren sowohl als Hydrophobierungsmittel als auch als Entschäumer und beeinträchtigen dadurch die Porenbildung des Recyclinggipses. Um auch hydrophobierte Gipskartonplatten recyceln zu können, müssten die Siloxane entfernt werden. Dafür werden zunächst einmal analytische Methoden benötigt, um Siloxane im Gips zu bestimmen, was sich aufgrund der Anwesenheit von Quarz (SiO_2) in Gipskartonplatten anspruchsvoll gestaltet, da eine reine Elementaranalytik auf Silicium kein eindeutiges Ergebnis liefert. Daher wurden unterschiedliche spezies- und phasenanalytische Verfahren getestet, jedoch eignete sich keine direkt zur Siloxanbestimmung, da die Si-Konzentrationen zu gering waren. Trotz der Herausforderungen wurden zwei Siloxanextraktionsansätze erforscht. Der Erfolg der Oxidation mit Natriumpersulfat konnte nicht bestimmt werden, während *n*-Heptan als Lösungsmittel die Anreicherung von Polymethylwasserstoffsiloxan zeigte, was mittels Infrarotspektroskopie nachgewiesen werden konnte. Weitere Forschung ist erforderlich, um die Auswirkungen organischer Lösungsmittel auf den Recyclingprozess zu verstehen und eine Methode zu entwickeln, die die Siloxanbestimmung in quarzhaltigen Gipskartonplatten ermöglicht.

1 Einleitung

Der Beitrag widmet sich der umfassenden Analyse und Problematik des Minerals Gips (Calciumsulfatdihydrat, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), welches als Bindemittel Verwendung in Baustoffen findet. Deutschland beherbergt natürliche Gipsvorkommen, exemplarisch in Lüneburg oder Brandenburg. Gipsbaustoffe basieren auf Bindemitteln aus Calciumsulfatphasen, wobei der Gips durch Kochen oder Brennen im Nassbrennverfahren zu Anhydrit oder Halbhydrat weiterverarbeitet wird. Die kommerziell genutzten Gipsarten, Naturgips und REA-Gips (Rauchgasentschwefelungsgips), fungieren als gleichwertige Bindemittel. (Neroth und Vollenschaar 2011) Der Rückgang der REA-Gips-Produktion aufgrund des Kohleausstiegs bis 2038 erfordert alternative Versorgungswege, wobei die Substitution durch Recyclinggips (RC-Gips) als vielversprechender Ansatz betrachtet wird (VDPM und Bundesverband der Gipsindustrie e.V. 2020). Die Möglichkeit

der Gipsabfallnutzung durch Kalzinierung und Rehydratisierung zur Herstellung neuer Gipsprodukte erfordert reine Ausgangsstoffe. Die Forschungsfrage dieser Arbeit konzentriert sich darauf, wie Siloxane als Hydrophobiermittel aus Gipskartonplatten entfernt werden können, um ein effizientes Gipsrecycling zu ermöglichen. Durch die Erprobung und den Vergleich verschiedener Verfahren zur Bestimmung und Entfernung von Siloxanen in Gipskartonplatten soll die Basis für zukünftige Forschungsprojekte in diesem Bereich geschaffen werden. Die Hydrophobierung von Gipsplatten erfolgt mittels Siloxanen, insbesondere polymere Siloxane wie Polymethylwasserstoffsiloxan. Die Hydrophobierung erfolgt, um hydrophile Baustoffe wie Gips weniger benetzbar und wasserabweisend zu machen (Han et al. 2014).

2 Material und Methoden

2.1 Präparation

Für die Präparation wurden hydrophobierte und unbehandelte Gipsplattenstücke von Knauf AT verwendet. Die ummantelnde Kartonplatte wurde entfernt, da das Hydrophobiermittel nur im Gips enthalten war. Die Platten wurden auf 10 cm × 10 cm zugeschnitten, anschließend in kleinere Bruchstücke zerlegt und einige davon im Achatmörser zu Pulver gemahlen. Das Pulver wurde durch ein Kunststoffsieb mit 1 mm Maschenweite gesiebt, um die Partikelgröße an die im Recyclingprozess übliche Feinheit anzupassen. Durch das Sieben wurden kleine Papiereinheiten entfernt. Einzelne Platten wurden in dünnere Streifen geschnitten und in der Analyse am Rasterelektronenmikroskop verwendet.

2.2 Entfernen durch Oxidationsmittel

In den Oxidationsversuchen zur Beeinflussung des Polymethylwasserstoffsiloxans in Gipsproben wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Die Oxidation erfolgte mithilfe von Natriumpersulfat in wässriger Lösung. Das Natriumpersulfat (min. 99 % Reinheit) wurde in einem Verhältnis von ca. 1:25, 1:125 und 1:250 mit dem Siloxan im Gipspulver eingesetzt. Die Siloxan-Konzentration wurde auf Basis eines angenommenen Anteils von 1 Gew.-% Siloxan berechnet. Das Natriumpersulfat wurde in destilliertem Wasser gelöst und 5 g Gips wurden hinzugefügt. Die Probenentnahme erfolgte zu verschiedenen Zeitpunkten. Nach dem Versuch (30 min ≤ t ≤ 6 h) wurde die Probe filtriert (MN 615, d.h. 4 – 12 µm) und der Filterkuchen mit den Gipspartikeln getrocknet. Zusätzlich wurde eine Konzentration als Referenzsubstanz für die IR-Analyse in einem Rotationsverdampfer hergestellt.

2.3 Entfernen durch Lösungsmittel

Zusätzlich zur Oxidation wurde die Extraktion des Siloxans mittels n-Heptan (> 99 %, Carl Roth) als Lösungsmittel untersucht. Der Versuchsaufbau entspricht dem der Oxidationsversuche, wobei das Natriumpersulfat durch 10 ml n-Heptan ersetzt wurde. 5 g Gips wurden in 100 ml destilliertes Wasser gerührt, und nach Zugabe von n-Heptan wurde das Gemisch über Nacht bei 1000 Umdrehungen pro Minute gerührt. Anschließend wurde das Gemisch in einen Scheidetrichter gegeben, wodurch sich aufgrund von Dichteunterschieden mehrere Phasen bildeten. Das Gipspulver setzte sich nicht vollständig ab, und Phasenübergänge wurden in der Analyse vernachlässigt. Vier Messreihen mit jeweils drei Proben wurden durchgeführt. Das Nutschverfahren wurde für die Trocknung und Aufbereitung der Proben verwendet, und die Ablagerungen auf den Filterpapieren wurden für Analysezwecke gesammelt.

2.4 Analytische Methoden

Die Rasterelektronenmikroskopie (samt EDX) wurde für alle untersuchten Gipsbruchstücke als auch Pulverproben verwendet. Zudem wurden die Infrarotspektroskopie, die Kernresonanzspektroskopie, die simultane thermische Analyse wie auch die Röntgendiffraktometrie wahlweise für die Pulverproben genutzt und dementsprechend präpariert. Generell ist das Ziel der analytischen Methoden die Gipsproben untereinander (hydrophobiert / nicht hydrophobiert) sowie Siloxan und Quarz zu unterscheiden. Zudem wurden die ursprünglichen Proben mit den Proben nach den Versuchen verglichen.

3 Ergebnisse

3.1 Nicht hydrophobierte und hydrophobierte Gipsplatten

Die REM- und EDX-Analysen zeigen, dass das unbehandelte Gipsbruchstück Sauerstoff, Schwefel, Calcium und Kohlenstoff enthält, während die hydrophobierte Probe zusätzlich Silicium und Aluminium aufweist. Das Gipspulver der unbehandelten Probe variiert leicht, enthält aber auch Silicium. Die REM-Aufnahmen zeigen poröses Material mit nadelartigen Kristallen, wobei hydrophobierte und unbehandelte Proben schwer zu unterscheiden sind. Aufladungseffekte konnten durch das Sputtern mit Platin ausgeglichen werden. Das hydrophobierte Gipsprodukt weist höhere Si-Werte auf, wobei der Ursprung von Silicium nicht eindeutig bestimmbar ist. Verunreinigungen und Kohlenstoffeintrag wurden festgestellt, welche teilweise auf den Probenträgerkopf und Papierfasern zurückzuführen sind. Das am REM / EDX diffus gemessene Si kann als Siloxan und konzentrierte Stellen als Quarz interpretiert werden. Die ^{29}Si -NMR- und FTIR-Messungen zeigten aufgrund der geringen Si-Konzentration kein Signal für Si bzw. Si-O oder Si-C-Bindungen. Die STA zeigte die Freisetzung von CO_2 und H_2O , wobei eine Zuordnung zu einer möglichen Zersetzung des Siloxans nicht möglich war. Die XRD zeigte die Anwesenheit von Quarz nur in der hydrophobierten Probe, was den Nachweis der Siloxane zusätzlich erschwert.

3.2 Oxidation

Die Ergebnisse lassen keine Aussage darüber zu, ob das Siloxan durch Natriumpersulfat oxidiert wurde, da Siloxane mit den genutzten Methoden weder vor noch nach dem Versuch messbar waren und sich der Si-Gehalt bei einer Oxidation der Siloxane nicht ändern sollte.

3.3 Lösungsmittel

Der Versuch der Entfernung des Polymethylwasserstoffsiloxans mit n-Heptan war erfolgreich. Der Scheidetrichter zeigte nach kurzer Zeit deutliche Schichten: abgesetztes Gipspulver (d), eine wässrige Gips suspension (c), eine transparente Lösung (b) und aufschwimmendes Gipspulver (a). REM/EDX-Analyse wurden für die unterste Phase (d) 0,1 Atomprozent Si und in der obersten Phase (a) 0,9 Atomprozent detektiert, welches für die Abwanderung des Siloxans in das Lösungsmittel n-Heptan spricht.



Abbildung 1 Si-Gehalte nach Lösungsmittel-Versuch

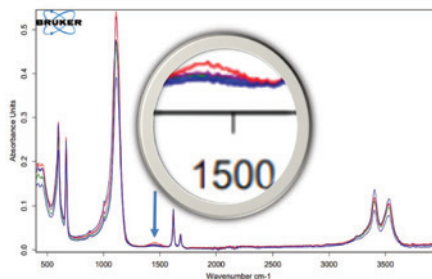


Abbildung 2 IR-Spektrum nach Lösungsmittel-Versuch

In den IR-Spektren der Proben aus den verschiedenen Phasen zeigt sich im Wellenzahlenbereich von 1500 cm^{-1} eine Abweichung. Die Probe (a), also der aufschwimmende, mit Heptan getränkte Gips, weist einen flach verlaufenden Peak bei etwa $1400 - 1500\text{ cm}^{-1}$ auf, wo gemäß der Referenzmessung einer Silikonölemission das Siloxan mit starkem Si-CH_3 -Signal erwartet wird. Die Probe (d), also der abgesunkene, inzwischen Heptan-freie Gips, zeigt diesen Peak nicht. Dies kann so interpretiert werden, dass das Heptan den suspendierten Gips infiltriert und dort das Siloxan gelöst hat. Beim Aufstieg des leichteren Heptans hat dieses einige Gipspartikel mitgerissen, die sich nun in der Probe (a) finden. Aufgrund des hohen Heptangehalts dieser Partikel ist auch der Siloxangehalt erhöht. Aus anderen Gipspartikeln ist das Heptan hingegen nach der Infiltration wieder ausgewaschen worden, sodass diese – nun mit geringeren Siloxankonzentrationen – auf den Boden des Reaktors absanken.

4 Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag wurde die Herausforderung des Recyclings hydrophobierter Gipskartonplatten, insbesondere mit Polymethylwasserstoffsiloxan, untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Siloxane durch Einsatz von n-Heptan aus Gips entfernt werden können. Weitere Forschung ist notwendig, um die Abtrennung des Heptans aus dem behandelten Gips und die Auswirkungen etwaiger Heptanreste auf die Qualität des RC-Gipses zu verstehen.

Danksagung

Vielen Dank der Firma KNAUF für die Bereitstellung der Proben.

Literatur/Quellen

- Auras, Michael (2010): Der Werkstoff Gips. Online verfügbar unter <https://journals.uni-heidelberg.de/index.php/icomoshefte/article/download/20443/14229>.
- Han, Z.; Fina, A.; Camino, G. (2014): Chapter 12 - Organosilicon Compounds as Polymer Fire Retardants. In: Constantine D. Papaspyrides und Pantelis Kiliaris (Hg.): Polymer green flame retardants. A comprehensive guide to additives and their applications. Burlington: Elsevier Science, S. 389–418. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444538086000123>.
- Neroth, Günter; Vollenschaar, Dieter (Hg.) (2011): Wendehorst Baustoffkunde. Wiesbaden: Vieweg+Teubner
- VDPM - Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V. und GIPs - Bundesverband der Gipsindustrie e.V. (2020): Rohstoffversorgung mit Gips muss schon jetzt gesichert werden! Hanning, Antje; Ortleb, Holger. Online verfügbar unter <https://www.vdpm.info/2020/rohstoffversorgung-mit-gips-muss-schon-jetzt-gesichert-werden/>, zuletzt geprüft am 14.05.2023

Kontakt

Prof. Dr. Daniel Vollprecht

Universität / Institution: Universität Augsburg

Tel.-Nr. +49 821 598 69130

E-Mail: daniel.vollprecht@uni-a.de

Homepage: <https://www.uni-augsburg.de/de/fakultaet/mntf/mrm/prof/reseng/>

innoCErt – Erweiterte Zertifizierung von Einweg- und Mehrweg-Verpackungen als Anreiz- und Steuerungsinstrument für die Schaffung von Innovationen zur Reduzierung von Kunststoffverpackungen entlang der Lebensmittelkette

Abstract: *Trotz zahlreicher Zertifizierungsprogramme im Lebensmittelverpackungsbereich besteht eine fragmentierte Landschaft mit divergierenden Bewertungsmethoden und einem Fokus auf technischer Recyclingfähigkeit. Der Mindeststandard nach §21 VerpackG vernachlässigt entscheidende Aspekte wie Konsumentenverhalten und Mehrwegsysteme. innoCErt zielt darauf ab, diese Herausforderungen zu überwinden und die Zertifizierungspraxis durch die Integration von Kreislaufwirtschaftskriterien zu verbessern und Anforderungen der neuen EU -Verordnung zu reflektieren. Methodisch erfolgt eine Literaturrecherche bestehender Standards, die Schaffung von Reallaboren (HomeLabs, GastroLabs, PublicSpaceLabs) und eine aktive Teilnahme am CEN-Spiegelgremium des PPWR-Ausschusses, um gesetzliche Anforderungen zu berücksichtigen. Erste Ergebnisse zeigen einen Kriterienkatalog basierend auf einer Literaturrecherche und praxisnahen Erkenntnissen aus abgeschlossenen HomeLabs. Als Nächstes werden sogenannte GastroLabs und PublicSpaceLabs durchgeführt, um die Auswirkungen von Mehrwegverpackungen auf das Littering-Verhalten zu untersuchen. Fragebögen für Sortieranlagen und Workshops mit Verpackungsentwicklern sind weitere Schritte zur Verbesserung der Zertifizierung. Abschließend werden alle Ergebnisse in einem Kriterienkatalog und Stoffstrommodell vereint, die die Grundlage für eine Zertifizierung von nachhaltigen Einweg- und Mehrwegverpackungen bildet.*

1 Einleitung

Die Forschungsinitiative *innoCErt* erstreckt sich über den Zeitraum von August 2022 bis August 2025 und nimmt sich der komplexen Herausforderung an, die Zertifizierung von Verpackungen im Lebensmittelbereich zu vereinheitlichen (Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister, 2021). Der Hintergrund dieses Projekts ist geprägt von der aktuellen Praxis, Verpackungen nach dem Mindeststandard nach §21 VerpackG zu zertifizieren. Dieser Fokus auf die technische Recyclingfähigkeit erscheint jedoch angesichts der Vielfalt an Zertifizierungsprogrammen und der dynamischen Weiterentwicklung von Verpackungen und Recyclingtechnologien unzureichend (BUND, 2019) (DUH, 2018) (Der Grüne Punkt, 2021) (Interseroh, 2021) (TÜV Rheinland, 2021) und soll um Kriterien der Kreislaufwirtschaftsfähigkeit erweitert werden. Insbesondere

vor dem Hintergrund der neuen EU-Verpackungsordnung, die weiterführende Anforderungen an Verpackungen stellt, reflektiert dieses Projekt die Notwendigkeit, bestehende Zertifizierungspraktiken zu überdenken und an die sich wandelnden Standards anzupassen (Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister, 2021).

1.1 Herausforderungen

Die aktuelle Zertifizierungslandschaft ist fragmentiert, da bestehende Programme unterschiedliche Bewertungsmethoden verwenden (Der Grüne Punkt, 2021). Diese Fragmentierung erschwert nicht nur die Vergleichbarkeit, sondern behindert auch eine ganzheitliche Betrachtung der ökologischen Auswirkungen von Verpackungen (DUH, 2018). Dieses ist größtenteils darin begründet, dass sich der Mindeststandard nach §21 VerpackG vornehmlich auf die technische Recyclingfähigkeit fokussiert und dabei entscheidende Faktoren, wie das reale Konsument:innenverhalten und Mehrwegsysteme unberücksichtigt lässt.

1.2 Analyse des Status Quo

Die permanente Weiterentwicklung von Verpackungen und Recyclingtechnologien erfordert eine kontinuierliche Anpassung von Zertifizierungsstandards. In diesem Kontext wird deutlich, dass der aktuelle Mindeststandard lediglich einen eingeschränkten Blick auf die Gesamtökologie von Verpackungen bietet. Diese Limitierung verhindert eine umfassende Bewertung und Berücksichtigung relevanter ökonomischer und ökologischer Aspekte. innoCERT hebt daher die Notwendigkeit hervor, über die rein technische Recyclingfähigkeit hinaus zu gehen und alle Aspekte der Kreislaufwirtschaftlichen zu prüfen.

Diese Herausforderungen und die Analyse des Status Quo bilden den Ausgangspunkt für die Forschungsansätze von innoCERT. Der Fokus liegt darauf, die Zertifizierungspraxis zu verbessern, um den sich wandelnden Anforderungen und Entwicklungen in der Verpackungsindustrie gerecht zu werden.

1.3 Zielsetzung von innoCERT

Das vorrangige Ziel von innoCERT ist die Schaffung einheitlicher Bewertungskriterien, die den gesamten Lebenszyklus von Leichtverpackungen berücksichtigen. Dabei liegt der Fokus darauf, durch die nationale Vereinheitlichung der Zertifizierung Umweltbelastungen zu minimieren und gleichzeitig Anreize für innovative Verpackungslösungen zu bieten.

1.4 Hypothesen

Aufgrund der identifizierten Herausforderungen und der umfassenden Analyse des gegenwärtigen Status Quo in der Zertifizierung von Verpackungen ergeben sich entscheidende Fragestellungen, die es zu untersuchen gilt. Diese Hypothesen dienen als gezielte Forschungsansätze, um innovative Lösungen für die national vereinheitlichte Zertifizierung von Leichtverpackungen zu entwickeln.

- Es besteht eine gesteigerte Nachfrage nach Zertifizierungslösungen, die über Einwegverpackungen hinausgehen und auch Mehrwegverpackungen einbeziehen.
- Die Kreislaufwirtschaftsfähigkeit von Einweg- und Mehrwegverpackungen erfordert einen erweiterten Bewertungsrahmen, der nicht nur technische Aspekte, sondern auch ökonomische und ökologische Kriterien umfasst.

- Die Integration der Nutzer:innenperspektive in die Zertifizierungskriterien ist von wesentlicher Bedeutung, um die Realität des Verbraucher:innenverhaltens angemessen zu berücksichtigen.
- Reallabore, in Form von HomeLabs, GastroLabs und PublicSpaceLabs, können als effektive Innovationsinstrumente dienen, um praxisnahe Einblicke in das Abfallverhalten und die Akzeptanz neuer Verpackungslösungen zu gewinnen.

2 Methodik

Die Forschungsmethodik von innoCErt ist vielseitig und umfasst die systematische Kategorisierung, Charakterisierung und Aufbereitung von nutzer:innenorientierten, qualitativen Kriterien auf empirischer Grundlage. Ebenso werden technische und ökonomisch-ökologische Kriterien theoretisch und praktisch analysiert. Diese werden nicht nur in einer Checkliste festgehalten, sondern auch im Rahmen von Politikdialogen aufbereitet. Eine umfassende Literaturrecherche erfolgt, um bestehende Standards und Normen zu identifizieren, während die aktive Teilnahme im PPWR-Ausschuss Einblicke in die aktuellen gesetzlichen Anforderungen auf EU-Ebene ermöglicht:

- Literaturrecherche: Um einen fundierten Rahmen zu schaffen, erfolgt eine umfassende Literaturrecherche bestehender Standards, Normen und Vorgaben im Bereich Verpackungen und Umweltschutz. Dies dient dazu, relevante Kriterien zu identifizieren und bestehende Erkenntnisse zu integrieren.
- Reallabore: Die Schaffung von HomeLabs, GastroLabs und PublicSpaceLabs ermöglicht die praxisnahe Analyse des Abfallverhaltens von Konsument:innen. Durch umfangreiche Sortier- und Datenerhebungsstudien werden wertvolle Einblicke gewonnen, die direkte Auswirkungen auf die Entwicklung von Zertifizierungskriterien haben.
- Teilnahme im CEN-Komitee: Die aktive Einbindung in das PPWR-Spiegelgremium CEN/TC261 SC4 WG10 ermöglicht innoCErt, direkte Einblicke in die aktuellen gesetzlichen Anforderungen zu gewinnen. Diese Erkenntnisse werden genutzt, um den Kriterienkatalog kontinuierlich an neue rechtliche Rahmenbedingungen anzupassen.
- Fragebögen: Um Datenlücken zu schließen und Bemessungsgrundlagen zu entwickeln, werden für Kriterien ohne ausreichende Studiengrundlage Fragebögen an Sortieranlagen verteilt. Die Rückmeldungen bieten wertvolle Informationen zur Bewertung und werden in die Ausarbeitung der Zertifizierungskriterien integriert.
- Stoffstrommodelle: Die Entwicklung von Stoffstrommodellen für Einweg- und Mehrweg-Plastikverpackungen bildet die Grundlage für die Zertifizierung. Diese Modelle ermöglichen eine strukturierte Analyse der Materialflüsse und dienen als entscheidende Referenzpunkte bei der Bewertung der Zertifizierungskriterien.

3 Erste Ergebnisse und aktueller Stand

Stand Ende 2023 markiert einen entscheidenden Meilenstein in unserem Forschungsprojekt. Die umfassende Literaturrecherche wurde erfolgreich abgeschlossen, begleitet von der Erstellung und Kategorisierung eines detaillierten Kriterienkatalogs mit mehr als 200 Kriterien. Parallel dazu wurde das erste Reallabor, bestehend aus HomeLabs, erfolgreich abgeschlossen und ausgewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse aus

den HomeLabs flossen bereits in den Kriterienkatalog ein, wodurch dieser mit praxisnahen Ergebnissen angereichert wurde.

Der aktuelle Projektfokus richtet sich auf die Konzeption von GastroLabs und PublicSpaceLabs, die speziell darauf ausgerichtet sind, die Auswirkungen der Einführung von Mehrwegverpackungen auf das Littering-Verhalten zu untersuchen. Der Stadtteil *Reuterkiez* in Berlin wurde als gezielter Untersuchungsort aufgrund seiner heterogenen Bewohner:innenstruktur ausgewählt, um vielfältige Perspektiven abzudecken.

Gleichzeitig werden die Fragebögen für Sortieranlagen vorbereitet und sollen Anfang 2024 an die Sortieranlagen des Projektpartners Landbell übermittelt werden. Die daraus resultierenden Daten sollen einen entscheidenden Beitrag zur Bewertung einzelner Kriterien leisten und in das Stoffstrommodell einfließen, welches derzeit weiterentwickelt wird. Dieses Stoffstrommodell wird schließlich als grundlegende Bezugsgröße für die Bemessung einiger Kriterien dienen.

Ein weiterer Schritt in unserer Planung sind zwei Workshops mit einer Arbeitsgruppe, bestehend aus Verpackungsentwickler:innen. Ziel dieser Workshops ist es, die entwickelten Kriterien auf Umsetzbarkeit zu untersuchen. Durch die Einbeziehung der Industrieperspektive erhoffen wir uns wertvolles Feedback, das die Qualität der gesammelten Kriterien sowie die geplante Zertifizierung weiter verbessern wird.

4 Projektpartner:innen

innoCErt wird in enger Zusammenarbeit mit renommierten Forschungsinstituten wie dem Wuppertal Institut und der Technischen Universität Berlin, dem Zertifizierungsinstitut DIN CERTCO und dem Entsorgungsunternehmen Landbell durchgeführt. Diese breite Partnerschaft gewährleistet, dass die entwickelten Kriterien realistisch, wissenschaftlich fundiert und in der Praxis anwendbar sind.

Die interdisziplinäre Forschung von innoCErt und ihre Beiträge zur nachhaltigen Entwicklung von Verpackungslösungen betonen die Relevanz dieses Projekts für die Zukunft der Verpackungsindustrie und den Umweltschutz. Die entwickelten einheitlichen Kriterien fördern nicht nur Klarheit für Verpackungsproduzent:innen, sondern setzen auch Anreize für vermehrte Verpackungsinnovationen. Dieser Ansatz markiert einen bedeutenden Schritt im Umweltschutz innerhalb der Verpackungsindustrie.

Danksagung

Das Projekt *innoCErt* wird durch die Bundesanstalt für *Landwirtschaft und Ernährung* im Rahmen des Programmes zur *Innovationsförderung: Innovationen zur Reduzierung von Kunststoffverpackungen entlang der Lebensmittelkette* gefördert.

Literatur/Quellen

- BUND. (2019). Stellungnahmen aus den Umweltverbänden: Deutschland ist Europameister. *Müll und Abfall*. Der Grüne Punkt. (15. März 2021). *Das neue Label „RECYCLINGFÄHIG“*. Abgerufen am März 2021 von Grüner Punkt: <https://www.gruener-punkt.de/de/recyclingfaehig>
- DUH. (2018). *Stellungnahme der Deutschen Umwelthilfe zum Entwurf der Orientierungshilfe zur Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen*. Berlin.
- Interseroh. (15. März 2021). *Made for Recycling: Verpackungen recyclingfreundlich gestalten*. Von <https://www.interseroh.de/leistungen/beratung/verpackungsoptimierung/> abgerufen
- Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister. (2021). *Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG*.
- TÜV Rheinland. (15. März 2021). *Recyclingfähige Produkte und Verpackungen*. Von <https://www.dincertco.de/dincertco/de/main-navigation/products-and-services/certification-of-products/verpackungswesen/re-cyclingf%C3%A4higkeit/> abgerufen

Kontakt

innoCErt, Gianna Mewes, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Technische Universität Berlin, Fachgebiet für Kreislaufwirtschaften und Recyclingtechnologien

Tel.-Nr. +49 30 31477470

E-Mail: g.mewes@tu-berlin.de

Zwischen Einstellung und Verhalten: Attitude-Behaviour-Gap bei der Mehrwegnutzung in der Takeaway-Gastronomie

Abstract: Die Einführung der Mehrwegangebotspflicht gemäß § 33 des Verpackungsgesetzes für Gastronomiebetriebe und Restaurants ab dem 01.01.2023 hat weitreichende Auswirkungen auf die Takeaway-Gastronomie in Deutschland. Basierend auf einer quantitativen Sozialforschung mit standardisierten Befragungen wurden die Dimensionen Nutzen, Kontext und Barrieren im Zusammenhang mit der Akzeptanz von Mehrwegverpackungen analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass trotz eines hohen Nachhaltigkeitsbewusstseins bei den Befragten ein geringes bis mittleres Akzeptanzniveau für Mehrwegverpackungen bei Speisen und Getränken in der Takeaway-Gastronomie besteht. Insbesondere die wahrgenommenen ökonomischen Barrieren und die unzureichenden Rückgabepraktiken von Mehrwegverpackungen wurden als hinderlich für eine häufigere Nutzung identifiziert. Die formulierten Hypothesen konnten teilweise bestätigt werden, wobei insbesondere der wahrgenommene Nutzen von Mehrwegverpackungen einen signifikant positiven Einfluss auf die Akzeptanz in der Außer-Haus-Gastronomie hat. Zur Steigerung der Mehrwegquote werden ökonomische Anreize wie Rabatte oder Bonusprogramme bei Mehrwegnutzung sowie die Implementierung einer neutralen übergeordneten Organisations- und Informationsstruktur zur kollektiven Sammlung und Rückführung von Mehrwegverpackungen als notwendig erachtet. Darüber hinaus wird die Besteuerung von Einwegverpackungen nach dem Tübinger Modell als potenziell wirkungsvolle Maßnahme zur Förderung von Mehrwegsystemen diskutiert. Die Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung zielgerichteter Maßnahmen zur Förderung der Mehrwegnutzung in der Takeaway-Gastronomie und tragen zur Diskussion über die Schließung des Attitude-Behaviour-Gaps in Bezug auf die Nutzung von Mehrwegverpackungen bei.

1 Einleitung

Die zeitsparenden und bequemen Angebote für eine Takeaway-Verpflegung in einer schnelllebigen Konsumgesellschaft sind in den letzten Jahren stetig gestiegen. Dies hat die Zunahme des Abfallaufkommens für Einwegverpackungen für Speisen und Getränke zur Folge. So betrug im Jahr 2017 in Deutschland der Verpackungsabfall allein durch Menü- und Snackboxen knapp 120.000 t (vgl. NABU, 2018, S. 7). Dies entspricht einem Abfallaufkommen von knapp 329 t pro Tag, verursacht allein aufgrund der Takeaway-Gastronomie. Als regulatorische Reaktion auf das steigende Abfallaufkommen in diesem Segment gilt seit 01.01.2023 die sogenannte Mehrwegangebotspflicht. Diese besagt gemäß § 33 des Verpackungsgesetzes,

dass u. a. Gastronomiebetriebe und Restaurants Mehrwegverpackungen als Alternative zu Einwegverpackungen für Speisen und Getränke zum Mitnehmen anbieten müssen. Hierbei darf die Mehrwegvariante nicht teurer oder zu schlechteren Bedingungen als die Einwegvariante angeboten werden. Zudem muss der Gastronomiebetrieb explizit auf das Mehrwegangebot hinweisen. Ausnahmen hiervon gelten lediglich für kleine Unternehmen (Verkaufsfläche < 80 m², < 6 Beschäftigte). Dass diese regulatorische Vorgabe notwendig war, verdeutlichen die sehr geringen Mehrweganteile aus dem Jahr 2022: von 13,7 Milliarden Verpackungen für Speisen und Getränke wurden insgesamt nur 0,74 % in Mehrwegalternativen verkauft (vgl. GVM, 2023, S. 6). Der Erfolg von Mehrwegsystemen hingegen wird stark durch attraktive, bequeme Angebote, Akzeptanz, demographische Aspekte und Bildung beeinflusst. Aktuelle Barrieren für die Endverbraucher*innen sind die Vielfalt und Unhandlichkeit von Bechern und Mehrweggefäßen, oftmals hohe Pfandbeträge, die Notwendigkeit einer App-Registrierung, aber insbesondere die fehlende flächendeckende Rückgabemöglichkeit. Daher ist die technische und organisatorische Gestaltung innovativer Mehrwegsysteme nur in Kombination mit sozialen und gesellschaftlichen Faktoren umsetzbar, um eine signifikante Steigerung der Mehrwegquote in der Takeaway-Gastronomie zu erreichen.

In diesem Kontext zielen die gestellten Forschungsfragen auf die Erkenntnisgewinnung hinsichtlich des sogenannten Attitude-Behaviour-Gaps in Bezug auf die Nutzung von Mehrwegverpackungen in der Takeaway-Gastronomie ab. Insbesondere wird betrachtet, inwieweit die Einstellungen und Absichten der Kund*innen hinsichtlich der Verwendung von Mehrwegverpackungen mit ihrem tatsächlichen Verhalten in Einklang stehen. Gleichzeitig werden die Faktoren untersucht, die die Einstellungen der Endverbraucher*innen gegenüber der Verwendung von Mehrwegverpackungen beeinflussen, sowie die Hindernisse und Barrieren, die der tatsächlichen Nutzung entgegenstehen, obwohl sie positive Einstellungen hegen.

2 Methodik

Zur Ermittlung der notwendigen empirischen Daten dient die quantitative Sozialforschung mit der Durchführung von standardisierten Befragungen von Endverbraucher*innen. Die Vorgehensweise, Durchführung und Auswertung der Befragungen orientieren sich an der vorgeschlagenen Methodik von Mayer (2013, S. 58): Definition der Stichprobe (Simple Random Sample: 385 Personen), Entwicklung eines Messmodells mit Hypothesen (Einbezug der Nutzen-, Barriere- und Kontext-Dimension), Operationalisierung, Fragebogenentwicklung, Pretest, Datenerhebung, Auswertung und Bericht.

Das entwickelte Messmodell basiert auf der Annahme, dass die Akzeptanz von Mehrwegverpackungen für Speisen und Getränke zum Mitnehmen durch den wahrgenommenen Nutzen, die Barrieren und den Kontext beeinflusst wird, dementsprechend wurden folgende Hypothesen formuliert:

- H₁: Der wahrgenommene Nutzen von Mehrwegverpackungen hat einen signifikant positiven Einfluss auf die Akzeptanz von Mehrweg in der Außer-Haus-Gastronomie.
- H₂: Die wahrgenommenen Barrieren von Mehrwegverpackungen haben einen signifikant negativen Einfluss auf die Akzeptanz von Mehrweg in der Außer-Haus-Gastronomie.
- H₃: Je höher die Zustimmung der Kontext-Dimension, desto höher die Akzeptanz von Mehrwegverpackungen in der Außer-Haus-Gastronomie.
- H₄: Je höher das Nachhaltigkeitsbewusstsein, desto höher die Akzeptanz.

Um die jeweilige Nutzen-, Barrieren- und Kontext-Dimension abzubilden, wurden diese theoretischen Begriffe dimensional aufgelöst und in einem folgenden Schritt operationalisiert.

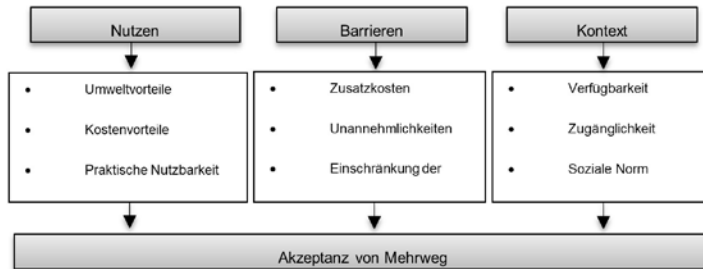


Figure 1: Operationalisierung Nutzen-, Barrieren-, Kontextdimension

Basierend auf den operationalisierten Begriffen wurde ein Fragebogen konzipiert, der nach Durchführung eines Pretests zur Überprüfung der Verständlichkeit anschließend leicht modifiziert wurde.

Die Datenerhebung erfolgte an zwei Aktionstagen im August in den Städten Mainz und Wiesbaden sowie parallel im Zeitraum 14.08. bis 30.09.2023 online. Insgesamt wurde eine Stichprobengröße von 402 befragten Personen, und somit die geforderte Stichprobengröße von 385 Personen, erreicht. Zur Auswertung der Befragungen wurde die Statistiksoftware SPSS herangezogen.

3 Ergebnisse

Neben der Ermittlung der dargelegten Nutzen-, Kontext- und Barriere-Dimension interessierte insbesondere die Übereinstimmung mit dem angegebenen Nachhaltigkeitsbewusstsein und der Akzeptanz von Mehrweg. Zwar besitzen 88 % der Befragten ein hohes Nachhaltigkeitsbewusstsein, weisen hingegen zugleich ein geringes bis mittleres Akzeptanzniveau auf. Knapp 25 % der Befragten weisen ein hohes Nachhaltigkeitsbewusstsein bei gleichzeitigem geringen Akzeptanzniveau auf. Bei 30 % besteht ein hohes Nachhaltigkeitsbewusstsein bei mittlerer Akzeptanz und lediglich bei 32 % der Befragten stimmt das hohe Nachhaltigkeitsbewusstsein mit einer hohen Akzeptanz überein. Dies verdeutlicht die Diskrepanz zwischen der Einstellung und dem tatsächlichen Handeln. Die formulierten Hypothesen H_1 , H_3 und H_4 konnten nicht verifiziert werden, wohingegen H_2 angenommen werden kann. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Befragten zwar ein hohes Nachhaltigkeitsbewusstsein besitzen, eine hohe Kontext-Dimension aufweisen und zudem den Nutzen von Mehrweg

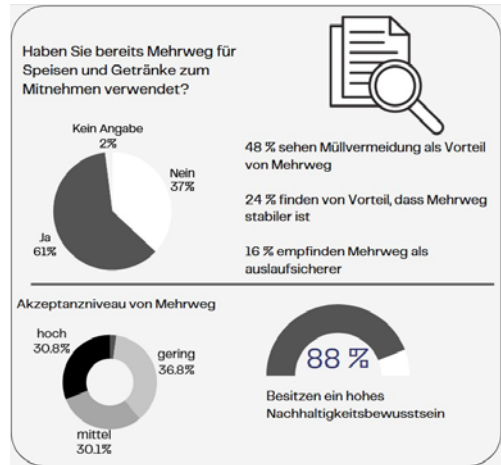


Figure 2: Auszug Ergebnisse

positiv einschätzen, die wahrgenommenen Barrieren hingegen einer Nutzung bzw. häufigeren Nutzung von Mehrweg entgegenstehen. Als Barriere wurde zum einen die ökonomische Barriere wahrgenommen. Demnach würden 60 % Mehrweg häufiger nutzen, wenn es günstiger als die Einwegalternative wäre. Zudem empfinden 44 % die Rückgabe von Mehrweg als umständlich und in ihrer Flexibilität einschränkend.

Die Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit, dass Mehrweg ökonomisch vorteilhafter für Endverbraucher*innen sein muss. Denkbar wären hier beispielsweise die Gewährung von Rabatten oder die Implementierung eines Bonusprogramms bei Mehrwegnutzung. Eine noch größere Wirkung bleibt hingegen bei der Besteuerung der Einwegverpackungen nach dem Tübinger Modell anzunehmen.

Der Abbau von Rückgabebarrrieren für Endverbraucher*innen ist ein weiterer wichtiger Schritt zur Erhöhung der Mehrwegquote und damit zur ressourcensparenden Kreislaufführung von Verpackungen. Zudem sollten Gastronomen aktiv das Mehrwegangebot bewerben, damit Kund*innen hierauf aufmerksam gemacht werden und somit die Mehrwegverpackung als Alternative wahrnehmen. Die Etablierung einer neutralen übergeordneten Organisations- und Informationsstruktur, die eine kollektive Sammlung, Reinigung und Rückführung von Mehrwegverpackungen im Verbund verschiedener Mehrweggefäßanbieter und Gastronomen in standardisierten Prozessen ermöglicht, kann als eine konkrete Anforderung im Sinne der Nutzerfreundlichkeit angenommen werden, um eine signifikante Zunahme der Mehrwegquote in der Takeaway-Gastronomie zu erreichen.

Danksagung

Die wissenschaftliche Begleitung des Pilotprojekts Mehrweg Modell Stadt wird durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität des Landes Rheinland-Pfalz gefördert und durch die Initiative „Reusable-to-Go GmbH“ im Rahmen des Pilotprojekts aktiv unterstützt.

Literatur/Quellen

- GVM (2023): Mehrweg in der deutschen Gastronomie - Status Quo, Herausforderungen und Potenziale, in: WWF Deutschland (Hrsg.), 02/2023, Berlin
- Mayer, Horst Otto (2013): Interview und schriftliche Befragung. Grundlagen und Methoden empirischer Sozialforschung, 6. Auflage, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag
- NABU (2018): Abfallaufkommen durch Einweggeschirr und To-Go-Verpackungen nach Art in Deutschland im Jahr 2017, Hg. v. Statista, 01.10.2018, unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1013433/umfrage/abfallaufkommen-durch-einweggeschirr-nach-art-in-deutschland/> (08.04.22)

Kontakt

M. A., Anne Mich, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld

Tel.-Nr. +49 6782 / 17 – 1513

E-Mail: a.mich@umwelt-campus.de

Homepage: www.umwelt-campus.de

Hydrochar from Digestate. Quality Control through Repeatability and Legal Framework as Soil Amendment

Abstract: *Digestate from manure and straw was submitted to seven batch HTC runs at 220°C, 3h, 200rpm, and 14.6 %wt. DM. Five runs were carried out in a 1L reactor, and the rest were performed with a 18.75L reactor. The aim of the study was to assess the repeatability of HTC runs between the same reactor size and among the different sizes. The results showed a positive trend when analyzing the C, H, N, S, O and ash content of the 7 different hydrochars. The heavy metal content in the hydrochars were also evaluated against the limit values of different regulations and standards for soil application. Some hydrochars contained elevated thallium contents, which were higher than the limit values set in the German Fertilizer Ordinance. All other heavy metal concentrations in the hydrochars were within all limit values.*

1 Introduction

Anaerobic digestion in the European Union (EU) boosted in recent years due to the need of increasing renewable energies (by 2030, 45% of energy must be renewable), the need of managing agricultural residues and closing material loops (zero waste goals), and the need of decreasing greenhouse gases emissions (climate neutral by 2050) (Kovačić et al., 2022; Scarlat et al., 2018). livestock, and bioenergy production is attracting increasing interest from farmers. Livestock produces large amounts of animal manure which can serve as organic fertilizer for crops and pasture growth. However, the nutrients contained in manure can adversely affect air, water, and soil quality and pose a public health risk if not handled properly. Existing manure management practices vary widely on a global scale. Researchers are striving to identify appropriate manure management practices with the aim of environmental protection. Anaerobic digestion of manure and subsequent digestate (DG). Biogas production in the EU increased from 167PJ in 2005 to 654PJ in 2015(Scarlat et al., 2018). Additionally, to the biogas production, anaerobic digestion plants generate digestate. In the EU it is estimated that an annual amount of 180 million tons of digestate in Europe (Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited, 2019). Germany is the main producer of biogas, and therefore the main digestate producer with almost 90 million tons/a (Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited, 2019).

Digestate water content depends on the anaerobic digestion process utilized and, on the feedstock. It oscillates between 70- 97wt.% (Drosg et al., 2015). It has a high organic matter (in average 69%wt. DM) and it is rich on nutrients (N 10.9%wt.DM; P2O5 3.8%wt.DM; K2O 5.3 %wt. DM) (AlgaeBioGas, 2018).

The different utilization pathways for digestate includes its application directly into the agricultural land (the most common pathway but recently in Europe prohibited due to its high nutrient content leading to soil and groundwater pollution). All other pathways need a pre-treatment of digestate in order to de-water it and

concentrate its solid fraction. Then the digestate undergoes to a composting process or to a thermal drying method (Kovačić et al., 2022). Thermal drying methods are energy intensive since they dried the material from an initial dry matter of 35%wt. DM to around 98%wt. DM(Kovačić et al., 2022). Composting of digestate also brings disadvantages: carbon loss as CO₂, greenhouse gases emissions as N₂O, a low composting efficiency (due to the high water content, low C/N ratio of digestate, long time requirement, low degradability). Combine to this low efficiency is the failure to disinfect the digestate since required temperatures for the elimination of pathogens 60°C-70°C are not reached (Kovačić et al., 2022).

In this study an alternative thermal treatment pathway for digestate is being investigated. This method is hydrothermal carbonization (HTC) which is a thermochemical conversion method that is performed under low temperatures ranging from 180°C to 300°C in presence of water (Libra et al., 2011). Benefits of HTC are the absence of digestate pre-treatment as dewatering, the pathogens elimination, and the recovery of nutrients (Stutzenstein et al., 2018). Another advantage is the carbon sequestration potential. Chars from hydrothermal carbonization (hydrochars) can recover between 40 to 85% of the initial carbon content from the feedstock (Ipiates et al., 2021). Therefore, HTC has the ability to close the loop of nutrients and reduce greenhouse gases with no pre-treatment of wet digestate.

Drawbacks from HTC include the contaminants concentration in the hydrochar as heavy metals (Wang et al., 2019), and that the repeatability of the method is not fully assessed. Therefore, this study focused on the following research questions: 1. are hydrochars similar if same operational conditions and same samples are utilized although the reactor size are different? 2. can hydrochars be utilized for soil applications despite the accumulation of heavy metals?

2 Material & Methods

2.1 Experimental Design

Seven HTC batch runs with digestate were done at 220°C, 3h, with a heating rate of 2K/min and a solid content of 14.6 wt. %. The digestate utilized in this study was collected from the anaerobic pilot plant built for the Stramento Project located in Trebbin, Germany (Herbst Umwelttechnik GmbH, 2019). The plant treats straw and poultry manure and operates at thermophilic and mesophilic conditions. The digestate for this study was collected after the mesophilic reactor.

The HTC runs were carried out in two different reactor size 1 L (Model 4520, Parr Instrument Company, Moline, Illinois, USA) and 18.75 L (Model 4557, Parr Instrument Company, Moline, Illinois, USA). Runs 1, 3, 4, 6 and 7 were performed in the 1-L Parr reactor, while runs 2 and 5 were carried out on an 18.75-L Parr reactor, as shown in Figure 1.

Two samples of hydrochar from each run were taken and a total of 3 samples from the digestate were obtained. All HTC runs were performed in the laboratories of the Leibniz Institut für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) located in Potsdam, Germany. As quality control, the samples were analyzed at ATB and at TU Berlin, and at the certified laboratory Eurofins.

2.2 Analytical Analysis

In order to assess the repeatability of the HTC runs the following parameters were selected to be compared: solid yield, C, H, N, S content, ash content. In order to assess the compliance with legislation, the heavy metals were additionally determined. For the scope of this study only the results from the TUB laboratories are presented.

The C, H, N, S were determined based on DIN 51732 with an Elemental Analyzer Vario EL and O was calculated by difference. Ash content was determined at 550°C based on DIN EN 15935. The trace elements were determined with two different methods: 1- microwave digestion with aqua regia according to the DIN EN 16174:2023 and 2- microwave digestion with nitric acid based on the DIN EN 16173:2011. The digested solutions were measured with an ICP-OES (Model 6300 Duo from the company Thermo Fisher). Both microwave digestions were realized in a Mars 5 device at 190°C for 20 min at a pressure of 30bar. All samples were measured in triplicate for the CHNS and in duplicate for ash and trace elements content.

2.3 Compliance with rules

To assess the compliance of the hydrochar as soil amendment, the heavy metal content was compared to the limit values stated in the German Fertilizer Ordinance (DüMV, 2012), the European Fertilizer Regulation 2019/1009 as soil amendment (EUFR) (EU Parliament, 2019), and the voluntary standard from the European Biochar Certificate as class Agro-organic (EBC) (European Biochar Foundation, 2022).

Table 1. Heavy metals limit values for soil amendment use from different standards:

German Fertilizer Ordinance (DüMV) and European Fertilizer Regulation (EUFR), European Biochar Certificate (EBC)

Rule/ Heavy metal (mg/kg DM)	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Tl	Zn
DüMV	40	1.5	40	300	500	1	80	150	1	1000
EUFR	40	2.0		2*	300	1	50	120	2	800
EBC	13	1.5		70	70	0.4	25	45		200

*Cr VI and not total Cr

3 Results

3.1 Repeatability among reactors

The repeatability of the chars from the seven runs was assessed, firstly between the runs of the same reactor size (runs 1,3,4,5,6 for the 1L reactor and runs 2 and 5, for the 18.75L reactor). The parameters evaluated included the elemental analysis (C, H, N, S, O), and the ash content as illustrated in Figure 2. The results show similar elemental composition among the runs not only performed in the same reactor size, but also among the different reactor sizes. There was no striking difference for any element at any run, except for ash

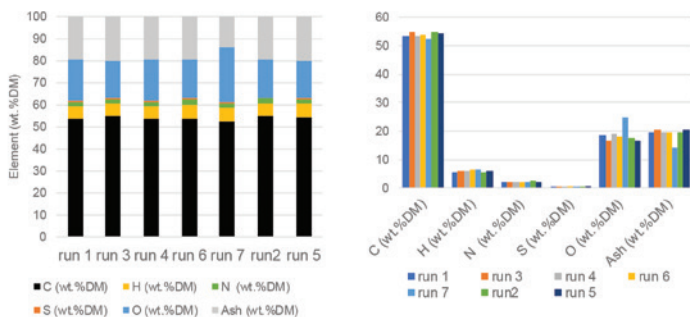


Figure 1. C, H, N, S, O and ash content in %wt. DM of hydrochars from the 7 different runs at same HTC conditions: 220°C, 3 h, 200rpm, 14.6%wt. DM. Runs 1,3,4,6, and 7 in a 1L Parr reactor; runs 2 and 5 in an 18.75-L Parr reactor

Element	Digestion type	Run 1			Run 2			Run 3			Run 4			Run 5			Run 6			Run 7			
		EUFR	DüMV	EBC	EUFR	DüMV	EBC	EUFR	DüMV	EBC	EUFR	DüMV	EBC	EUFR	DüMV	EBC	EUFR	DüMV	EBC	EUFR	DüMV	EBC	
As	Nitric acid																						
	Aqua regia																						
Cd	Nitric acid																						
	Aqua regia																						
Co	Nitric acid																						
	Aqua regia																						
Cr	Nitric acid																						
	Aqua regia																						
Cu	Nitric acid																						
	Aqua regia																						
Ni	Nitric acid																						
	Aqua regia																						
Pb	Nitric acid																						
	Aqua regia																						
Tl	Nitric acid																						
	Aqua regia																						
Zn	Nitric acid																						
	Aqua regia																						

Figure 2. Compliance of the hydrochars with the limit values of heavy metals set in the German Fertilizer Ordinance (DüMV), the European Fertilizer Regulation 2019/ (EUFR) and in the European Biochar Certificate (EBC) Heavy metals were determined through two different analytical methods one based on a nitric acid digestion and the other base on an aqua regia digestion. Green= complied, red= not complied, white = no limit value set.

content and therefore oxygen in run 7. This might have occurred, due to the heterogeneity of the digestate used as input material for the HTC runs.

3.2 Compliance with rules

Heavy metals content in general increased from the raw digestate utilized to the hydrochars. A comparison between limit values summarized in Table 1 and the mass fractions of heavy metals determined by the two different digestions methods (nitric acid and aqua regia) concluded if the hydrochars can be potentially utilized in soil applications. The results are shown in Figure 2.

This study limits to only the compliance with heavy metals. Further studies should address other pollutants relevant for the soil application rules and relevant for the health and the environment such as furans and polyaromatic hydrocarbons (PAHs).

4 Conclusions

Hydrothermal carbonization for treating wet materials can be a promising pathway for digestate management. In this study hydrochars showed similar characteristics among seven HTC batch runs performed at the same conditions: 220°C, 3h, 200rpm, 2k/min and 14.6wt% DM. Similar C, H, N, S content was found (53%wt. DM, 6%wt. DM, 2%wt. DM and 0.4%wt. DM). The hydrochars complied with all limit values concerning heavy metals except for TI in some runs. However, not all regulations limit TI. Further studies should focus on the TI determination, since it is not a common element to measure. Also, other pollutants relevant for the soil application such as furans and polyaromatic hydrocarbons (PAHs) should be addressed.

Acknowledgements

The project Stramento would like to thank the Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz for their financial support. We would like to thank Herbst Umwelttechnik for the support in this project. Special thanks to the analytical labs at ATB, TUB and Eurofins.

References

- AlgaeBioGas. (2018). Biogas digestate: Composition, use, logistics, processing. Algal Treatment of Biogas Digestate. https://algaebiogas.eu/biogas_digestate
- Drosg, B., Fuchs, W., Seadi, T. A., Madsen, M., & Linke, B. (2015). Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing.
- DüMV. (2012). Fertiliser Ordinance (DüMV), Ordinance about the placing of fertilisers, soil additives, growing media and plant additives on the market. Federal Law Gazette 2524 (2008).
- EBC. European Biochar Foundation. (2022). v10.3E-2022 – Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.pdf.
- EU Parliament. (2019). Regulation (EU) 2019/1009 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products. Official Journal of the European Union.

- Herbst Umwelttechnik GmbH. (2019). Stramento-Blog. <https://www.herbstumwelt.com/stramento-blog>
- IpiALES, R. P., De La Rubia, M. A., Diaz, E., Mohedano, A. F., & Rodriguez, J. J. (2021). Integration of Hydrothermal Carbonization and Anaerobic Digestion for Energy Recovery of Biomass Waste: An Overview. *Energy & Fuels*, 35(21), 17032–17050. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01681>
- Kovačić, Đ., Lončarić, Z., Jović, J., Samac, D., Popović, B., & Tišma, M. (2022). Digestate Management and Processing Practices: A Review. *Applied Sciences*, 12(18), 9216. <https://doi.org/10.3390/app12189216>
- Libra, J. A., Ro, K. S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., Titirici, M.-M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., & Emmerich, K.-H. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2(1), 71–106. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.81>
- Scarlat, N., Dallemand, J.-F., & Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129, 457–472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
- Stutzenstein, P., Bacher, M., Rosenau, T., & Pfeifer, C. (2018). Optimization of Nutrient and Carbon Recovery from Anaerobic Digestate via Hydrothermal Carbonization and Investigation of the Influence of the Process Parameters. *Waste and Biomass Valorization*, 9(8), 1303–1318. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9902-4>
- Wang, L., Chang, Y., & Liu, Q. (2019). Fate and distribution of nutrients and heavy metals during hydrothermal carbonization of sewage sludge with implication to land application. *Journal of Cleaner Production*, 225, 972–983. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.347>
- Wood Environment & Infrastructure Solutions UK Limited. (2019). Digestate and compost as fertilisers: Risk assessment and risk management options (Final Report Doc Ref. 40039CL003i3).

Contact

MSc. Daniela Moloeznik Paniagua, Scientific Assistant

Technical University of Berlin/ Chair of Circular Economy and Recycling Technology

E-Mail: d.moloeznikpaniagua@tu-berlin.de

Homepage: <https://www.tu.berlin/circulareconomy>

Ein Kraftstoff aus ungenutzten Ressourcen: Rest- und Abfallstoffe als Kohlenstoffquelle für die Biomethanproduktion

Abstract: Biogas ist mit seinem hohen Gehalt an CO_2 ein idealer Einsatzstoff für die katalytische Methanisierung. Nach einer Entfernung von katalysatorschädigenden Nebenbestandteilen lässt sich das Biogas ohne vorherige Separation des CO_2 vom CH_4 mit einem geeigneten Katalysator und Wasserstoff fast vollständig zu Methan umwandeln. Zur Auswahl geeigneter Materialien für den Einsatz in einer Pilotanlage werden Vorversuche im Labormaßstab mit Adsorbentien für die Biogasreinigung und Katalysatoren für die direkte Methanisierung von Biogas durchgeführt. Die Auswahl der Materialien, die ab 2024 in der Pilotanlage eingesetzt werden sollen, wird durch ökonomische und ökologische Bewertungskriterien unterstützt.

1 Einleitung

Die optimierte Verwertung biogener Rest- und Abfallstoffe aus dem städtischen oder ländlichen Raum (z. B. Bioabfälle oder Stroh) kann zur Produktion erneuerbarer Kraftstoffe und damit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor beitragen. Im Projekt *Pilot-SBG* wird eine mögliche Prozesskette an einer Forschungsanlage im Pilotmaßstab demonstriert und optimiert.

Die anaerobe Vergärung von Biomasse zu Biogas, das sich aus den Hauptkomponenten Methan (CH_4) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) sowie weiteren Nebenkomponten zusammensetzt, ist ein Hauptbestandteil der Pilotanlage und ein bereits gut erforschter Prozess. In den meisten Fällen bleibt jedoch fast die Hälfte des im Biogas enthaltenen Kohlenstoffs in Form von CO_2 ungenutzt. Um den Anteil des energiereichen Biogasbestandteils Methan zu erhöhen und den gesamten verfügbaren Kohlenstoff zu nutzen, kann das CO_2 durch Zugabe von Wasserstoff (H_2) an einem Katalysator zu CH_4 reduziert werden (Zhang et al. 2022). Dieser als thermokatalytische Methanisierung bezeichnete Prozess erfordert ebenfalls hohe Drücke und Temperaturen im Bereich von 200–450 °C (Esa und Sapawe 2020). Die Methanisierung kann nach einer Gasreinigung zur Entfernung von Katalysatorgiften wie Schwefelwasserstoff (H_2S) direkt mit dem Biogas ohne vorherige CO_2 -Abtrennung erfolgen.

Eine solche Kombination von Biogasreinigung und -aufwertung wird im Projekt *Pilot-SBG* im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr untersucht. Dabei sollen im ersten Schritt geeignete Materialien für die Biogasreinigung durch Adsorbentien und für die Biogasaufwertung durch Katalysatoren identifiziert und in Vorversuchen im Labor getestet werden. Im Anschluss an die Laboruntersuchungen wird eine geeignete Kombination aus Adsorptionsmaterial und Katalysator für den Betrieb an der Pilotanlage vorgeschlagen, wobei ökonomische und ökologische Bewertungen berücksichtigt werden.

Das Ziel ist es, nach der Methanisierung ein methanreiches Produktgas zu erhalten, das entsprechend den Kraftstoffanforderungen nach DIN EN 167232 weniger als 2 Vol.% H₂ und möglichst wenig nicht umgesetztes CO₂ enthält.

2 Methodik

2.1 Auswahl von Adsorbentien für die Biogasreinigung

Für die Biogasreinigung in der Pilotanlage ist zunächst ein Adsorptionsmaterial auf Fe-Basis vorgesehen. Dieses Material dient als Referenz für die Laborversuche. Als Vergleichsmaterialien wurden ein weiteres Metalloxid auf Cu-Basis sowie sechs verschiedene dotierte und imprägnierte kommerzielle Aktivkohlen unterschiedlicher Hersteller ausgewählt. Die Auswahl erfolgte für ein wasserdampfgesättigtes Biogas mit 47 Vol.-% CO₂, 50 Vol.-% CH₄, 1 Vol.-% O₂ und H₂S gemeinsam mit den Aktivkohleherstellern und einem Kooperationspartner für das Metalloxid. Mit den acht ausgewählten Materialien wurden Durchbruchversuche mit H₂S im Labor durchgeführt, um herauszufinden, welches Material am besten geeignet ist, H₂S durch Adsorption aus Biogas herauszufiltern. Dazu wurden die Materialien einzeln als 2 cm hohe Schüttung in einem Festbett-Rohrreaktor mit 3,8 cm Durchmesser bei Umgebungsdruck und -temperatur so lange mit der oben beschriebenen Biogaszusammensetzung und 2.000 ppm H₂S durchströmt, bis H₂S im austretenden Gas mit 50 ppm detektiert wurde. Die Eingangsgaszusammensetzung wird in einer Gasmischstrecke aus technischen Gasen gemischt. Hinter dem Reaktor wird das Gas alle vier Minuten mit einem Gaschromatographen (Micro GC Fusion®, Inficon Holding AG) gemessen, der unter anderem CO₂, CH₄, O₂ und H₂S quantitativ erfasst. Die Adsorptionskapazitäten (C_{ads}) der Adsorbentien werden aus der bis zum Erreichen der Durchbruchkonzentration adsorbierten H₂S-Menge und der Masse des im Reaktor eingesetzten Materials bestimmt. Vor den Versuchen mit den Adsorbentien wurde in gleicher Weise ein Blindversuch mit dem inerten Material Siliciumcarbid anstelle des Adsorptionsmaterials durchgeführt, um auszuschließen, dass das restliche Füllmaterial im Reaktor einen Teil des H₂S adsorbiert.

Anhand der ermittelten Adsorptionskapazitäten wird die zu erwartende Standzeit der Adsorbentien an der Pilotanlage abgeschätzt und bewertet, ob es im Vergleich zur Referenz besser geeignete Materialien für die Biogasreinigung des zu erwartenden Biogases gibt.

2.2 Auswahl von Katalysatoren für die Biogasaufwertung zu Biomethan

Für die Biogasaufwertung ist in der Pilotanlage zunächst ein kommerziell verfügbarer Methanisierungskatalysator aus 2 Ma.% Ru geträgert auf Al₂O₃ (Ru2/Al₂O₃) vorgesehen. Bei den Vorversuchen im Labor dient dieser Katalysator als Referenz. Als Vergleichsmaterialien wurden sechs weitere Katalysatoren auf der Basis von Ru (0.3 Ma.-% oder 1 Ma.-%) oder Ni (20 Ma.-%) auf Al₂O₃ als kugelförmige Formkörper bzw. CeO₂ als stäbchenförmige Formkörper hergestellt. Für jeden Katalysator wurde eine Temperaturrampe aufgenommen, um den Temperaturbereich zu bestimmen, in dem der Katalysator am aktivsten ist. Anschließend wurde der optimale Betriebspunkt jedes Katalysators durch Variation von Temperatur (T) von 250 – 350 °C (für Ru0.3/Al₂O₃: 300 – 400 °C), Raumgeschwindigkeit (GHSV) von 1776 - 5327 h⁻¹ und H₂/CO₂-Verhältnis von 2,9 - 4,7 mittels statistischer Versuchsplanung ermittelt. Das Eingangsgas besteht aus CH₄, CO₂ und H₂. Der CH₄-Gehalt im Eingangsgas ist mit 81 - 83 Vol.-% durch die Simulation einer Rezirkulation bereits sehr hoch. Mit den besten Betriebspunkten wird in einem anschließenden Experiment mit den jeweils frischen

Katalysatoren die Stabilität über einen Zeitraum von ca. 70 h unter konstanten Bedingungen getestet. Anschließend wird das Gas mit 500 ppm H₂S versetzt und die Dauer bis zum vollständigen Aktivitätsverlust durch Vergiftung untersucht. Das Produktgas der Methanisierung wird während dieser Versuchsreihe mindestens viertelstündlich analysiert. Die Auswahl der zwei besten Katalysatoren neben dem Referenzkatalysator erfolgt mithilfe einer ökologischen und ökonomischen Bewertung. Wichtige Kriterien für die Bewertung sind unter anderem die Preise der Ausgangsstoffe und die Toleranz gegenüber H₂S.

3 Ergebnisse und Ausblick

3.1 Adsorbentien für die Biogasreinigung

Anhand der H₂S-Adsorptionskapazitäten der Adsorbentien in Abbildung 1 wird deutlich, dass fast alle Aktivkohlen mehr H₂S aus dem Biogas adsorbieren können als die beiden untersuchten Metalloxide. Die mit K₂CO₃ und CaO dotierte Aktivkohle besitzt mit 115 mg(H₂S)/g(Adsorbens) die höchste Adsorptionskapazität der untersuchten Materialien. Aktivkohlen haben bei der Biogasreinigung zudem den Vorteil, dass sie neben schwefelhaltigen Molekülen auch andere unerwünschte Nebenbestandteile abtrennen können. Die mit Kaliumiodid imprägnierte Aktivkohle hingegen ist für das verwendete Biogas nicht geeignet, da sie unter den gegebenen Bedingungen kein H₂S adsorbiert.

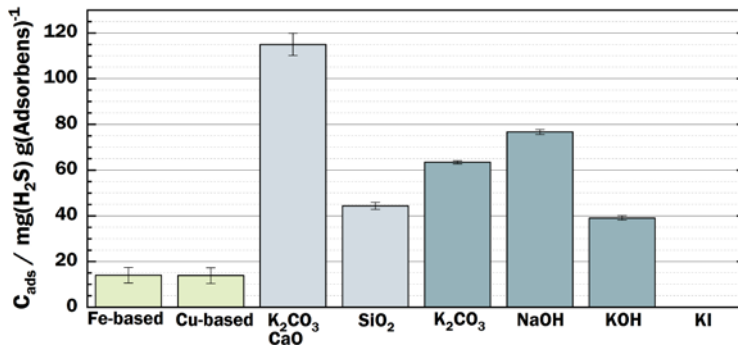


Abbildung 1: Experimentell ermittelte H₂S-Adsorptionskapazitäten der untersuchten Metalloxide (grün), dotierten Aktivkohlen (hellblau) und imprägnierten Aktivkohlen (dunkelblau)

3.2 Katalysatoren für die Biogasaufwertung zu Biomethan

Die Kombination von T, GHSV und H₂/CO₂-Verhältnis, die das Produktgas mit dem niedrigsten H₂-Gehalt und gleichzeitig dem höchsten CH₄-Gehalt ergibt, ist für jeden Katalysator in Tabelle 1 angegeben. Die Zusammensetzung des Produktgases aus CH₄, H₂ und CO₂, die die Katalysatoren bei ihrem besten Betriebspunkt erzeugen, ist in Abbildung 2 dargestellt.

Tabelle 1: Beste Betriebspunkte der Katalysatoren, ermittelt durch multivariate Analyse von T , GHSV und H_2/CO_2

	$T/^\circ\text{C}$	GHSV/ h^{-1}	H_2/CO_2
Ru2/ Al_2O_3	350	1776	2,9
Ni20/ Al_2O_3	300	1776	3,8
Ru0.3/ Al_2O_3	400	1776	2,9
Ru1/ Al_2O_3	350	1776	2,9
Ni20/ CeO_2	250	1776	2,9
Ru0.3/ CeO_2	300	1776	3,8
Ru1/ CeO_2	300	5327	3,8

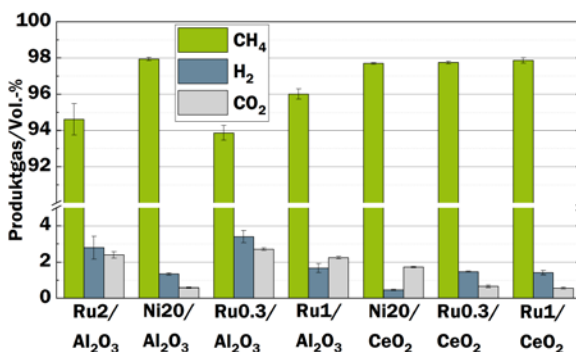


Abbildung 2: Produktgaszusammensetzung mit den besten Betriebspunkten der Katalysatoren

Für alle Katalysatoren außer dem Referenzkatalysator und Ru0.3/ Al_2O_3 konnte ein Betriebspunkt gefunden werden, bei dem so viel H_2 umgesetzt wird, dass weniger als 2 Vol.-% H_2 im Produktgas vorhanden ist. Diese Katalysatoren erzeugen somit durch eine direkte Biogasmethanisierung ein Produktgas, das als Kraftstoff genutzt werden kann. Derzeit wird geprüft, welcher Katalysator wirtschaftlich am besten geeignet ist. Durch die Verdünnung mit CH_4 aus der simulierten Produktgasrezirkulation wurden im Labormaßstab keine starken Hotspots im Reaktor beobachtet.

Die bisherigen Vergiftungsversuche, die unter den in Tabelle 1 aufgeführten Bedingungen mit 500 ppm H_2S durchgeführt wurden, zeigen, dass die Katalysatoren auf CeO_2 bis zur vollständigen Vergiftung länger aktiv bleiben als die analogen Katalysatoren auf Al_2O_3 . Neben dem Trägermaterial ist die Zeit bis zur vollständigen Vergiftung eine Funktion der H_2S -Konzentration im Eingangsgas und der Metallbeladung auf dem Katalysator.

3.3 Kombination von Adsorptionsmaterial und Katalysator für die Pilotanlage

Im Vergleich zur Fe-basierten Referenz kann die Adsorptionskapazität und damit die Standzeit der Adsorbentien in der Pilotanlage durch den Einsatz von Aktivkohle erhöht werden. Bei den Katalysatoren zeigten

sowohl die Ni-Katalysatoren sowie die Katalysatoren auf CeO₂ eine erhöhte Toleranz gegenüber H₂S im Vergleich zum kommerziellen Referenzkatalysator. Eine Auswahl von zwei Katalysatoren, die in einer analogen Versuchsreihe zu den Laborversuchen ab 2024 im Pilotmaßstab getestet werden sollen, findet aktuell anhand von ökonomischen und ökologischen Betrachtungen statt.

Danksagung

Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des *Bundesministeriums für Digitales und Verkehr* unter Aktenzeichen 3544.1 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt ausschließlich bei den Autoren.

Literatur/Quellen

Esa, Yusak Asri Mohd; Sapawe, Norzahir (2020): A short review on carbon dioxide (CO₂) methanation process. In: *Materials Today: Proceedings* 31, S. 394–397. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.191.

Zhang, Liu; Ma, Fangping; Zeng, Qing; Peng, Fang; Hu, Qiang; Wu, Kejing et al. (2022): Direct Methanation of CO₂ in Biogas with Hydrogen from Water Electrolysis: The Catalyst and System Efficiency. In: *Energy Fuels* 36 (8), S. 4416–4426. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.2c00437.

Kontakt

M.Sc. Selina Nieß, wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin
Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig
Tel.-Nr.: 0341 23 34 420
E-Mail: Selina.Niess@dbfz.de

Website

Mehr Informationen zum Projekt Pilot-SBG gibt es hier: <https://www.dbfz.de/projektseiten/pilot-sbg/start>

Metallrückgewinnung aus EoL-LED-Stableuchten mithilfe von chlorhaltigen Abfällen

Abstract: Durch die thermochemische Verwertung von chlorhaltigen Kunststoffabfällen wird nicht nur eine Schadstoffentfrachtung, sondern auch die zusätzliche Rückgewinnung von kritischen Metallen ermöglicht. Ein Großteil des in den Abfällen enthaltenen Chlors wird als HCl-Gas freigesetzt und zur Chlorierung von Indium in End-of-Life(EoL)-LED (engl. light-emitting diode)-Stableuchten verwendet. Dieses reichert sich nahezu vollständig im flüssigen Metallkonzentrat an. Aus dem festen Rückstand der EoL-LED-Stableuchten wurden die optimalen Laugungsparameter eruiert. Hierbei konnten 99 Gew.-% Kupfer, 46 Gew.-% Nickel, 85 Gew.-% Kobalt und 71 Gew.-% Lutetium gelöst werden. Durch Gewinnungselektrolysen, Flüssig-Flüssig-Extraktion und Fällung könnten diese Metalle aus der Laugungslösung separiert und so dem Wirtschaftskreislauf wieder zurückgeführt werden.

1 Einleitung

Die Europäische Kommission veröffentlichte 2023 eine Liste mit 34 Rohstoffen wie Kupfer, Germanium oder Metalle der seltenen Erden, die als versorgungskritisch eingestuft wurden. Bei diesen Rohstoffen existiert ein höheres Risiko gegenüber anderen Rohstoffen hinsichtlich eines Versorgungsengpasses und dessen Folgen für die Wirtschaft (Europäische Kommission 2023). Um diese kritischen Metalle aus Abfallströmen zurückzugewinnen, wurden bisher verschiedene Prozesse, meist hydrometallurgische Verfahren, angewendet. Mangels wirtschaftlichen Interesses werden daher viele High-Tech-Metalle wie Kobalt in LEDs in gängigen Recyclingprozessen nicht wiedergewonnen, sodass sie dem Wirtschaftskreislauf irreversibel verloren gehen.

Die Verwertung chlorhaltiger Kunststoffabfälle stellt das produzierende und verarbeitende Gewerbe ebenso wie die Entsorgungswirtschaft zunehmend vor Probleme. Chlorhaltige Kunststoffabfälle fallen bspw. in Form von Baumaterialien (Fenster, Bodenbeläge, Rohre), Elektronik-Altgeräten, kurz EAG, oder Altfahrzeug-Bestandteilen (Interieur) an. Selbst für Abfälle mit geringen Chloranteilen (1 Gew.-%) werden infolge der aufwändigen Abgasreinigung und der Gefahr von Korrosionsschäden hohe Entsorgungskosten fällig. Diese belaufen sich derzeit auf ca. 285 €/t Abfall (Hofmann 2022). In Deutschland sind im Jahr 2017 insgesamt 695.000 t PVC-haltige Abfälle angefallen und im Jahr 2021 schon 861.000 t (Conversio 2018, 2022). Davon wurden 324.000 t bzw. 38 % der Gesamtmenge werkstofflich oder rohstofflich verwertet. Der überwiegende Rest mit 537.000 t bzw. 62 % wurde energetisch verwertet oder beseitigt. Für eine entsprechende Entsorgung dieses Anteils ergeben sich Kosten in Höhe von geschätzten 153 Mio. €.

Erste Investitionen der Industrie zeigen den dadurch entstehenden Handlungsbedarf. So errichtete die Firma Ecoloop in Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) eine

Pilotanlage, in der chlorhaltige Kunststoffabfallströme in Synthesegas umgewandelt werden. Das enthaltene Chlor wird hierbei in der Asche gebunden und zusammen mit dieser entsorgt. Es steht somit keiner weiteren stofflichen Verwertung zur Verfügung (Hüser 2016).

Eine neuartige Alternative der Verwertung chlorhaltiger Kunststoffabfälle stellt die thermochemische Konversion (Pyrolyse) dar. Mit diesem Verfahren kann eine Schadstoffentfrachtung bei gleichzeitiger Bereitstellung von werthaltigen Produkten erfolgen. Im Projekt „Chlor-Plattform“ konnten neben der Erzeugung hochwertiger Produkte wie Pyrolysegas, Pyrolyseöl und einem koksähnlichen Ersatzbrennstoff durch Chlorierung zusätzlich kritische Metalle aus weiteren Abfallströmen zurückgewonnen werden (Berninger, Peer 2022).

Dieses vielversprechende Verfahren wird im laufenden Projekt „CHM-Technologie“ im Demonstrationsmaßstab weiter untersucht.

2 Methodik

2.1 Rückgewinnung von Indium aus LED-Stableuchten mithilfe von PVC

Als Vorbehandlung wurden von den LED-Leuchten die Endkappen und Glasröhren bestmöglich entfernt, sodass hauptsächlich der Leuchtstreifen für die Versuche verwendet wurde.

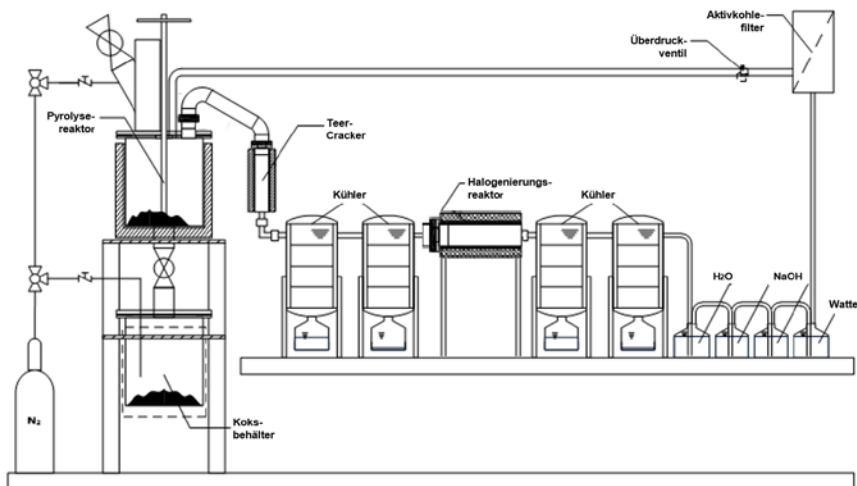


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Technikumsanlage

In einem Halogenierungsreaktor im Technikumsmaßstab werden ca. 400 g LED-Leuchten vorgelegt. Unter Sauerstoffausschluss wird der Halogenierungsreaktor auf über $600^\circ C$ erhitzt. Hierbei zersetzen sich alle restlichen organischen Bestandteile, werden verflüchtigt, ausgetragen und in einer Kondensationseinheit als Öl abgeschieden. Die gasförmigen Komponenten werden durch ein mobiles Gasmessgerät der Fa.

Pollutek detektiert. Nachdem die Öl- und die Gasbildung abgeschlossen sind, kann mit der Zugabe des PVC im vorgeschalteten Pyrolysereaktor begonnen werden. Der Betrieb des Pyrolysereaktors erfolgt bei Temperaturen von 300°C bis 360°C. Das reine PVC bzw. Fensterprofile werden dem Reaktor in 6 Chargen zu je 150 g zugeführt. Als Produkt bildet sich ein koksähnlicher, fester Rückstand, der nach 30 Minuten Verweildauer in den Koksbehälter entleert und gesammelt wird. Eine Wasserkühlung verhindert dabei Nachreaktionen. Zum anderen entsteht ein HCl-haltiges Pyrolysegas. Dieses wird zunächst zur Reaktion durch den Halogenierungsreaktor geleitet. In der mit Wasser gefüllten Wäschereinheit wird das enthaltene HCl weitestgehend als Salzsäure aus dem Pyrolysegas abgeschieden. Weitere saure Bestandteile des Pyrolysegases werden in den beiden Waschflaschen mit Natronlauge abgetrennt. Abbildung 1 zeigt schematisch den Versuchsaufbau im Technikumsmaßstab. Insgesamt werden drei Versuche mit reinem PVC und ein Versuch mit PVC-Profilen durchgeführt.

Die erzeugten Produkte Koks aus der Pyrolyse von PVC, Koks aus den LED-Leuchten (festes Metallkonzentrat) und flüssiges Metallkonzentrat werden mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse (edRFA) analysiert. Das flüssige Metallkonzentrat bildet eine wässrige und ölige Phase aus. Diese werden gravimetrisch getrennt und separat auf den Indiumgehalt analysiert. Dieser beträgt in den wässrigen Phasen bei den drei Versuchen mit reinem PVC 42 ppm, n.d. (nicht detektiert) und 10 ppm sowie mit PVC-Profilen 70 ppm. Beim ersten Versuch mit reinem PVC wird in der öligen Phase 3 ppm Indium detektiert. Bei den anderen Produkten Koks aus der Pyrolyse von PVC und den festen Metallkonzentraten wird kein Indium detektiert.

Tabelle 1: Indiumgehalt von den Pyrolyseprodukten [ppm].

Einsatzmaterial	Koks aus Pyrolyse von PVC	Festes Metallkonzentrat	Wasser-Phase	Öl-Phase
reines PVC	n.d.	n.d.	42	3
reines PVC	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
reines PVC	n.d.	n.d.	10	n.d.
PVC-Profile	n.d.	3	70	n.d.

Bei diesem Verfahren konnte Indium vollständig im flüssigen Metallkonzentrat angereichert werden.

2.2 Laugung des festen Metallkonzentrates

Im festen Metallkonzentrat lagen weitere Metalle wie Kupfer, Nickel, Kobalt und Lutetium aufkonzentriert vor. Durch Laugungsversuche mit den festen Parametern 32%ige Schwefelsäure und 10 ml 50%iges Wasserstoffperoxid wurde möglichst viel Kupfer aus dem festen Metallkonzentrat herausgelöst, um die Laugungseffektivität der anderen genannten Metalle zu untersuchen. Hierbei werden die Parameter Laugungsdauer (120 min und 360 min), Fest-Flüssig-Verhältnis (1:5 und 1:10) und die Temperatur (Raumtemperatur und 70°C) variiert, um den Einfluss auf die Laugungseffektivität der Metalle zu untersuchen.

Hierbei stellt sich bei einer Laugungsdauer von 120 min, einem Fest-Flüssig-Verhältnis von 1:10 und bei Raumtemperatur die Laugungseffektivität als am höchsten heraus. Diese sind für Kupfer 99 Gew.-%, für Nickel 46 Gew.-%, für Kobalt 85 Gew.-% und für Lutetium 71 Gew.-%.

Aus der Laugungslösung kann qualitativ mithilfe einer Gewinnungselektrolyse Kupfer und Nickel gewonnen werden. Anschließend wurde mit fünf Volumenprozent Tributylphosphat in 1-Octanol Lutetium aus der restlichen Laugungslösung extrahiert. Durch Fällung mit Natronlauge nach dem Stand der Technik kann Lutetium als Hydroxid gefällt werden. Cobalt verbleibt in der Lösung und kann durch Fällung mit Natronlauge ebenfalls als Hydroxid gefällt werden. Allerdings wird hierbei ein Teil der Schwefelsäure als Natriumsulfat gefällt und die Säure verbraucht.

3 Zusammenfassung

Indium wurde aus EoL-LED-Stableuchten in einem flüssigen Produkt unter Verwendung von PVC als billiges Chlorierungsmittel angereichert. Das Verfahren ist geeignet, um flüchtige Metallchloride aus stark verdünnten Materialströmen in einer flüssigen Phase aufzukonzentrieren. Durch Verdampfen von Wasser könnte das konzentrierte Indium dann durch elektrolytische Gewinnung zurückgewonnen werden.

Nicht flüchtige Metalle oder Metallchloride verbleiben im festen Produkt und können mit 32%iger Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid ausgelaugt werden. Durch Gewinnungselektrolysen, Flüssig-Flüssig-Extraktion und Fällung könnten Lutetium, Nickel, Kupfer und Kobalt aus der Laugungslösung separiert und so dem Wirtschaftskreislauf wieder zurückgeführt werden.

Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit, zwei abfallwirtschaftliche Probleme gemeinsam zu lösen: Das Chlorproblem bei der Müllverbrennung und die Rückgewinnung von High-Tech-Metallen wie Indium und Lutetium.

Danksagung

Das Projekt „CHM-Technologie“ wird im Rahmen des Projektverbundes „ForCYCLE TECHNIKUM“ vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert und vom Ressourceneffizienz-Zentrum Bayern (REZ) am Bayerischen Landesamt für Umwelt koordiniert.



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Literatur/Quellen

- Berninger, B., Peer, M. (2022). Plattformtechnologie zur Verwertung chlorhaltiger Abfälle und Rückgewinnung kritischer Metalle – Chlor-Plattform. Online verfügbar unter: https://www.stmuv.bayern.de/themen/ressourcenschutz/forcycle/forcycle2/doc/07_abschlussbericht.pdf, zuletzt aufgerufen am 03.12.2023
- Conversio Market & Strategy GmbH (2018): Analyse der PVC-Produktion, Verarbeitungs-, Abfall- und Verwertungsströme in Deutschland 2017. Online verfügbar unter: <https://newsroom.kunststoffverpackun->

gen.de/wpcontent/uploads/2018/10/PVC_Analyse_D_2017_Kurzfassung.pdf, zuletzt aufgerufen am 28.11.2023.

Conversio Market & Strategy GmbH (2022): Stoffstrombild PVC in Deutschland 2021 Zahlen und Fakten zum Lebensweg von PVC. Online verfügbar unter: https://plasticker.de/docs/news/PVC_Analyse_DE_2021_Kurzversion_final.pdf, zuletzt aufgerufen am 02.12.2023.

European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M., Veeh, C., *Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report*, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>

Hofmann (2022): Preisliste Abfälle. Online verfügbar unter: <https://hofmann-entsorgung.de/wp-content/uploads/2021/12/Preisliste-2022-Homepage-Design.pdf>, zuletzt aufgerufen am 07.12.2023.

Hüser Tobias (2016): Synthesegas aus Kunststoffabfall. Online verfügbar unter <https://www.process.vogel.de/synthesegas-aus-kunststoffabfaellen-a-533433/>, zuletzt aufgerufen am 15.12.2021 In: PROCESS, 6 (2016), S. 26-27

Kontakt

M. Sc., Michael Peer, wissenschaftlicher Mitarbeiter
Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
Tel.-Nr. 09621/482-3337
E-Mail: m.peer@oth-aw.de
Homepage: www.oth-aw.de

Recycling kunstharzgebundener Schleifwerkzeuge

Abstract: Kunstharzgebundene Schleifscheiben werden in allen materialverarbeitenden Industriezweigen eingesetzt. Dabei bleiben zwischen 30 und 50 % einer Schleifscheibe nach dem Einsatz als Abfall zurück. Die Herstellung von Schmelzkorund, dem häufigsten Schleifmittel, bei einer Temperatur von 2120 °C erfordert sehr viel Energie und ist mit einem erheblichen Verschleiß der eingesetzten Feuerfestmaterialien und damit mit zusätzlichem Abfallaufkommen verbunden. Bei Aluminiumoxid handelt es sich zudem um einen hochwertigen Werkstoff, dessen Weltmarktpreis starken Schwankungen unterliegt. Der Grund für die bisherige Deponierung von kunstharzgebundenen Schleifscheiben ist die nicht sortenreine und harzfreie Rückgewinnung der Schleifkörner, was einen Recyclateinsatz bislang unmöglich macht. Ziel des Projekts ist die Klärung der Frage, ob die zukünftige Forschung eher auf mechanische, thermische, chemische oder photokatalytische Prozesse bzw. auf welche Kombination der Verfahren zum Recycling kunstharzgebundener Schleifscheiben fokussiert werden sollte. In Laborversuchen wurden die vier Verfahrensrouten untersucht und ein systematischer Vergleich durchgeführt.

Eine ebenfalls große Herausforderung ist die anschließende sortenreine Trennung der unterschiedlichen Kornarten. Hierfür sollen u.a. Dichtentrennverfahren, Elektroscheidung oder auch Flotation untersucht werden. Die weiteren wissenschaftlichen Kriterien, anhand derer eine Bewertung erfolgte, umfassen wirtschaftliche Aspekte (Kosten des Recyclingverfahrens, Wert der Rezyklate, Deponie- und Transportkosten), technische Parameter (Wertstoffausbringen, Reinheit, Rezyklatqualität) und ökologische Faktoren.

1 Einleitung

In dem von der Forschungsgemeinschaft Schleiftechnik (FGS) beauftragten Projekt wurden verschiedene Aufschlussmethoden wie der mechanische, chemische, thermische und photokatalytische Aufschluss untersucht. Für eine saubere Trennung von Kunstharz und Schleifkorn ist eine Kombination aus mehreren Ansätzen nötig. Das Ziel eines Recyclings von kunstharzgebundenen Schleifscheiben ist die Rückgewinnung von Rezyklat mit geringen Kunstharzanhafungen. Die hohe Elastizität der Kunstharzmatrix ist dabei die große Herausforderung für den bislang limitierten mechanischen Aufschluss der Schleifkörner.

2 Methodik

2.1 Aufschlussverfahren zur Trennung von Faser, Harz und Schleifkorn

Zunächst erfolgte eine Vorzerkleinerung und Metallentfernung bei Schleifscheiben. Die Grobzerkleinerung mittels Backenbrecher lieferte keinen hinreichenden Aufschlussgrad. Als besser geeignet erwiesen sich reißende Verfahren. Eine gute Vorzerkleinerung gelang mittels Einwellen-Shredder. Hierbei wurde mittels eingebrachtem Siebkorb eine Größe $<10\text{mm}$ erreicht. Die mechanische Vorzerkleinerung hinterließ jedoch die ebenfalls enthaltenen Glasfasern in undefinierter Länge. Eine Abtrennung der Fasern erfolgte mittels Zickzack-Windsicher in der Leichtfraktion. Eine mechanische Zerkleinerung bis zur Ausgangskorngröße der Schleifkörner von $<1\text{mm}$ befreite diese nicht von Anhaftungen des Harzes. Eine Feinmahlung in der Kugelmühle mit dem Ziel der Abscherung dieser Anhaftungen beschädigte jedoch bereits das Korn.

Der thermische Aufschluss bewirkte eine Zersetzung des Harzes. Dies wurde sowohl unter oxidierenden Bedingungen unter Luftsauerstoff sowie bei erhöhtem O_2 -Gehalt und auch unter Pyrolyse-Bedingungen untersucht. Die Zersetzungstemperatur des Harzes wurde zuvor mittels thermoanalytischer Messungen (TGA mit IR-Messung) bestimmt. Die thermische Behandlung führte zu einer weitgehenden Freilegung der Körner. Nach der thermischen Behandlung des Ausgangsmaterial im Veraschungssofen unter Luftsauerstoff gelang eine einfache mechanische Zerkleinerung. Durch Autogenmahlung und Sichtung mittels Luftstrahlmühle erfolgte eine Trennung von unbeschädigtem Korn von verbrannten Harzresten. Analysen mittels REM/EDX ergaben lediglich geringe verbleibende Harzanhaftungen an den Körnern.

Als weiteres Verfahren wurde eine Kryogenmahlung, d.h. ein Mahlen unter tiefen Temperaturen untersucht. Hierbei soll durch das Abkühlen in flüssigem Stickstoff eine Versprödung des Harzes und damit eine verbesserte mechanische Trennung erreicht werden. Nach Kryogenmahlung bleiben jedoch weitgehend Harzanhaftungen am Korn erhalten.

Ein chemischer Aufschluss zum Lösen der Harzsysteme wurde unter Normal- und erhöhten p-T-Bedingungen im Autoklav untersucht. Hierfür wurden anorganische und organische Säuren sowie verschiedene Alkohole untersucht. Im photokatalytischen Ansatz erfolgte eine Zersetzung des Harzes durch freie Radikale nach einer Beschichtung der Materialien mit CeO_2 oder TiO_2 und der anschließenden Bestrahlung mit UV-Licht. Die beiden letzteren Verfahren erreichten nur eine bedingte Freilegung des Kornes aus dem Ausgangsmaterial. Sie eignen sich daher höchstens zur Nachbehandlung von thermisch freigelegtem Korn.

2.2 Quantifizierung von Kornform und Kornreinheit mittels REM/EDX

Mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) und Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) erfolgte eine chemische Charakterisierung der Körner sowie die Analyse der Morphologie des Schleifkorns (Abb. 1). Hierzu wurde ein Zeiss Merlin 450 mit Feldemitter Kathode sowie die EDX-Detektoren von Oxford Instruments X-MaxN 80 und der Oxford Instruments Ultim Max 170 eingesetzt. Die Analysen mittels REM/EDX ergeben teilweise noch verbleibende Harzanhaftungen an ansonsten weitestgehend freigelegten Körnern, welche im wesentlichen unverbranntes Harz sowie fluorhaltige Rückstände aus Schleifzusätzen enthalten.

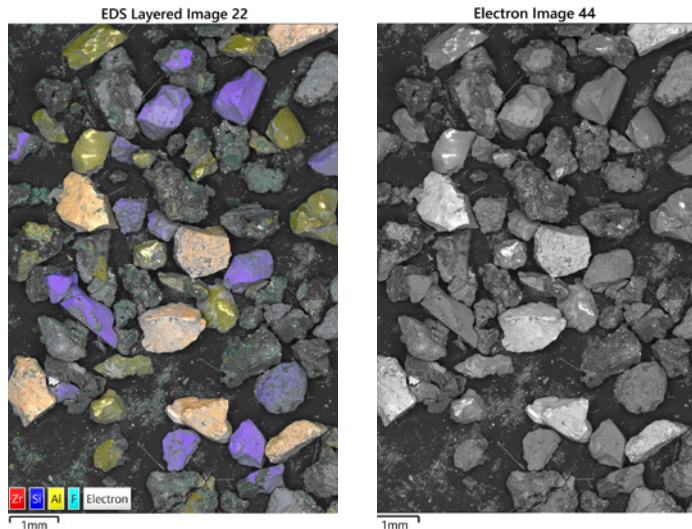


Abbildung 1: recycelte Schleifkörner nach einer Kombination unterschiedlicher Aufschlussverfahren
 a) das Rückstreuелеktronenbild zeigt die Kornmorphologie b) das EDX-Überlagerungsbild ergibt die Kornart sowie verbleibende Verunreinigungen

Mittels EDX-Analysen kann eine Zuordnung der in Abbildung 1 markierten Körner (1-4) erfolgen. Bei Korn 1 handelt es sich um Siliciumcarbid, Schleifkorn 2 ist Korund, Korn 3 ist Zirkonkorund und Nummer 4 ein verbleibendes Rußpartikel mit Verunreinigung (u.a. Kohlenstoff als Harzrest und Fluor aus Schleifzusatzstoff). Der erhöhte Kohlenstoffanteil resultiert aus dem verwendeten Graphitpad zum Aufkleben der Körner im REM.

Tabelle 1: Detail EDX-Zusammensetzung [At.-%] der in Abbildung 1 markierten Körner Nummer 1-4

At.-%	C	O	F	Na	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Zr
1	50,9	15,1	4,9	1,2	1,2	25,6	0,4	0,0	0,3	0,4	0,1
2	18,9	51,1	1,7	0,5	27,1	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0
3	25,7	42,9	7,8	1,6	16,6	0,1	0,5	0,1	0,4	0,4	4,0
4	66,0	17,3	7,9	2,3	2,1	0,3	1,3	0,1	0,6	2,3	0,0

Danksagung

Das Projekt Recycling kunstharzgebundener Schleifwerkzeuge „RecySchleif“ wurde durch die Forschungsgemeinschaft Schleiftechnik FGS beauftragt.

Kontakt

Dr., Sebastian, Pentz, akademischer Rat auf Zeit

Universität Augsburg, Lehrstuhl für Resource and Chemical Engineering,

Institut für Materials Resource Management

Tel.-Nr.: +49 821 598 69137

E-Mail: sebastian.pentz@uni-a.de

Homepage: <https://www.uni-augsburg.de/de/fakultaet/mntf/mrm/prof/reseng/team/sebastian-pentz/>

Waste-Based Geopolymer Construction Materials

Abstract: *The building and construction industry generates enormous amounts CO₂ emissions. To counteract this impact and to reduce the quantity of landfilled mineral waste in Austria, the Christian Doppler Laboratory GECCO₂ attempts to generate highly resistant environmentally friendly waste-based geopolymer building and construction materials. These geopolymers, also referred to as alkali-activated materials, are utilized based on the specific material properties. One example is their use in chemically aggressive waste systems. Therefore, potential unexploited Austrian mineral waste and secondary raw material (SRM) streams are examined by various chemical, mineralogical and environmental characterization methods and techniques. The results are then used to compare the mineralogical and geochemical patterns of the waste and SRMs. These patterns define respective material categories and enable the development of a portfolio of Austrian mineral waste materials and SRMs. Subsequently, their suitability and recycling potential through geopolymerization are reviewed.*

1 Introduction

In Austria, mineral waste is the largest stream, accounting for about 75% of the total waste. Of this waste stream currently over 50% are disposed of in landfills (BMLFUW, 2023). Additionally, the waste generation has increased significantly over the last decades, and in the next years no decrease is expected. Specifically, mineral waste increased by approximately 20% from 2015 to 2020. (BMLFUW, 2017, 2023). The building and construction sector is responsible for nearly 40% of the global anthropogenic CO₂ emissions, of which about 6-10% can be ascribed to the manufacturing of building construction materials (United Nations Environment Programme (UNEP), 2021, 2022). Due to the production of Portland cement clinker, the main part of Ordinary Portland cement which is used for mixing concrete, the cement industry alone contributes 5-8% to the global CO₂ emissions (Scrivener and Kirkpatrick, 2008; Benhelal et al., 2013). To reduce the amount of disposed waste material and the significant carbon footprint attributed to the building and construction sector, waste-based geopolymer materials could pose as a possible alternative. Geopolymers, also referred to as alkali-activated materials (AAM), are inorganic binders, where a solid precursor is mixed with an alkaline activator. The binding phase mainly consists of an amorphous aluminosilicate gel, where aluminum and silicon tetrahedra build a three-dimensional network (Provis and van Deventer, 2009). For the production of a final product, e.g., geopolymer concrete or mortar, aggregates and, if needed, water is added (see Figure 1).

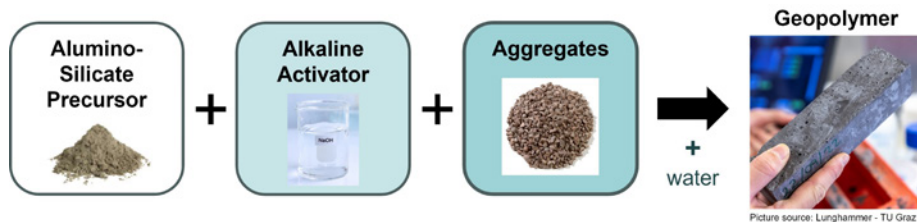


Figure 1: Schematic display of the geopolymer production process

Precursors such as calcinated clays, fly ash from coal combustion, blast furnace slag (BFS) or natural pozzolans are most widely used (Provis, 2014). Regional differences have to be considered regarding these secondary raw materials (SRMs), as for example no coal combustion is taking place in Austria, resulting in a lack of coal fly ash, or BFSs are widely used as supplementary cementitious materials (SCMs) (Snellings et al., 2012). Therefore, the GECCO₂ project aims to replace the commonly used precursors with currently unexploited Austrian mineral waste and SRM, e.g., construction and demolition waste (C&D waste), mineral wool or glass waste.

The GECCO₂ project is a Christian Doppler Laboratory for waste-based geopolymer construction materials in the CO₂-neutral circular economy and enables the development of an interdisciplinary research initiative, combining various research areas such as waste management, material-, environmental- and geosciences, and civil engineering. The goal is to produce environmentally friendly and highly resistant OPC-free geopolymer building materials. These geopolymers are then utilized in biochemically aggressive environment systems, such as sewer manholes, tanks, basins or biowaste treatment facilities.

As part of this project, a dissertation is written with the main emphasis on the recycling of Austrian mineral waste streams using geopolymerization. One of the tasks, as seen in Figure 2, is to identify, select and then to characterize mineral residues to produce a portfolio of potential usable Si- and/or Al-rich Austrian waste materials. Furthermore, standard leaching tests are carried out to investigate the leaching behavior and mobility of potential environmental pollutants. The results will then be compared against the thresholds given for landfills and the recycling building material quality classes. By examining mineralogical and geochemical factors, patterns among the waste materials are investigated. The results should enable the classification of different mineral groups, containing materials with similar geochemical factors, which are e.g., favorable for

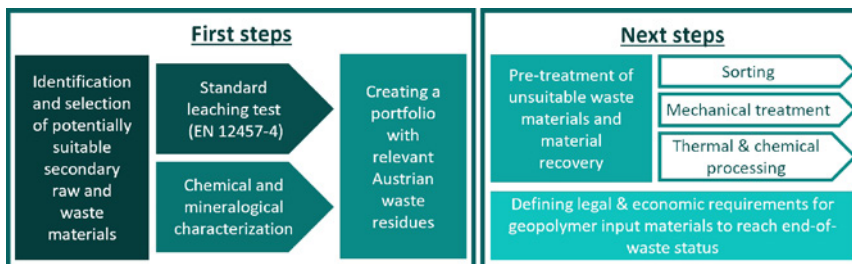


Figure 2: Tasks within the Dissertation at the Chair of Waste Processing Technology and Waste Management at the Montanuniversitaet Leoben

geopolymerization. Based on the portfolio, the precursor materials will be categorized in (i) suitable, (ii) suitable after pre-treatment and (iii) unsuitable for alkali-activation. Subsequent steps are illustrated in Figure 2.

2 Methods

Various SRMs and waste materials, provided by the industry partners, are analyzed using techniques as described below.

2.1 Chemical Characterization

X-ray fluorescence analysis (XRF) using glass pellets was chosen to determine the bulk chemical composition, especially the silicon and aluminum amount, of the SRM and waste materials.

2.2 Mineralogical Characterization

Powder samples were measured using an X-ray diffractometer (XRD) to investigate the amount of reactive mineral phases and the amorphous content. Mineral phases were then qualitatively and quantitatively identified using the PANalytical Highscore Plus software Suite (version 3.0.5.). The quantification of the crystalline mineral phases and in turn the amorphous content was done by applying Rietveld Refinement analysis on powder diffraction patterns. This method was firstly described by Rietveld (1969), where a calculated fitted pattern is adapted to the measured pattern. With the help of a crystalline external standard, in this case corundum, the amorphous content of the waste materials can be determined.

2.2 Leaching Tests

Standard single-step batch leaching testes according to EN 12457-4 were performed to investigate the leaching behavior of the SRM and waste materials. The elemental composition of the eluates is then measured by ion chromatography (IC), Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES). For the trace elements Inductively Coupled Plasma – Mass Spectroscopy (ICP-MS) is applied.

3 Waste portfolio

Table 1 shows an exemplary portfolio of potential waste materials to be used as precursors. Based on the measured mineralogical and geochemical factors, and considering the type of the SRMs and wastes, seven material groups were created. The portfolio will be adjusted and expanded as new materials are added over the course of the project. In addition, multivariate statistical data analysis, such as principal component analysis, will be implemented in the systematic study of waste stream-related patterns.

Table 1: Portfolio of classified material groups, containing current SRM and waste samples of the GECCO₂ project as potential precursors

Nr.	Material group	Abbreviation	Number of samples
1	Incineration residues/Ash	ASH	1
2	Construction and demolition waste	CDW	4
3	Clay-based	CB	15
4	Slag	SL	6
5	Mineral wool	MW	8
6	Glass	GL	3
7	Coal	CO	1

Acknowledgements

This study was carried out in the course of the Christian Doppler Laboratory for Waste-based geopolymer construction materials in the CO₂-neutral circular economy (GECCO₂). The financial support by the Austrian Federal Ministry of Labour and Economy and the Christian Doppler Research Association is greatly acknowledged. The co-financing industry partners are Voestalpine Stahl Donawitz GmbH, Kirchdorfer Fertigteilverwaltung GmbH, Marienhütte Stahl- und Walzwerk GmbH, Brantner green solutions GmbH, Initiative Ziegel, Forschungsverein der Stein- und keramischen Industrie, Gemeinschaft Steirischer Abwasserentsorger (GSA), MM-Kanalrohr-Sanierung GmbH and CharLine GmbH.

References

- Benhelal, Emad; Zahedi, Gholamreza; Shamsaei, Ezzatollah; Bahadori, Alireza (2013): Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. In *Journal of Cleaner Production* 51, pp. 142–161. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049.
- BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft). 2017: Bundesabfallwirtschaftsplan, Teil 1. Wien.
- BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft). 2023: Bundesabfallwirtschaftsplan, Teil 1. Wien.
- Huang, Beijia; Gao, Xiaofeng; Xu, Xiaozhen; Song, Jialing; Geng, Yong; Sarkis, Joseph et al. (2020): A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials. In *One Earth* 3 (5), pp. 564–573. DOI: 10.1016/j.oneear.2020.10.010.
- Provis, J. L.; van Deventer, J.S.J. (2009): 1 - Introduction to geopolymers. In John L. Provis, Jannie S.J. van Deventer (Eds.): *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Woodhead Publishing, pp. 1–11. Available online at <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845694494500011>.

- Provis, John L. (2014): Introduction and Scope. In John L. Provis, Jannie S. J. van Deventer (Eds.): Alkali Activated Materials. Dordrecht: Springer Netherlands (13). DOI: 10.1007/978-94-007-7672-2_1
- Rietveld, H. M. (1969): A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. In J. Appl. Crystallogr. 2 (2), pp. 65–71. DOI: 10.1107/S0021889869006558.
- Scrivener, Karen L.; Kirkpatrick, R. James (2008): Innovation in use and research on cementitious material. In: Cement and Concrete Research 38 (2), S. 128–136. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.09.025.
- Snellings, R.; Mertens, G.; Elsen, J. (2012): Supplementary Cementitious Materials. In Reviews in Mineralogy and Geochemistry 74 (1), pp. 211–278. DOI: 10.2138/rmg.2012.74.6.
- United Nations Environment Programme (2021). 2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi
- United Nations Environment Programme (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi.

Contact

MSc., Bettina Ratz, Research Assistant

Montanuniversitaet Leoben / Chair of Waste Processing Technology and Waste Management

Tel.-Nr. +43 (0) 3842 / 402 - 5125

E-Mail: bettina.ratz@unileoben.ac.at

Homepage: <https://www.avaw-unileoben.at/>

Quantifiability of Sustainability and Circular Economy Measures in Austrian Manufacturing Companies

Abstract: Manufacturing companies are making efforts to contribute to the achievement of the Sustainable Development Goals and the Paris climate goals. In the case of manufacturing companies, this primarily concerns SDGs SDG 12 (responsible consumption and production) and SDG 9 (industry, innovation and infrastructure). Changing legalization and shifting interests in the B2B sector require a basis for communication between stakeholders. The efficient and prudent use of raw materials contributes to the reduction of emissions and thus to the achievement of the goals set. In order to know what can be achieved, it is first necessary to measure what is already available and how future technological steps can be quantified.

It must be possible to evaluate the efficiency of sustainability and circular economy measures in companies. The aim of this research is to create a framework for collecting measures in the companies and to enable quantification with the help of key performance indicators (KPIs) to be defined. The question of the submitted paper includes sustainability measures in general and resource conservation in particular. Based on the results, the possibility for new concepts and technologies will be developed and existing ones improved. The area of digitalization and its benefits for achieving the climate goals will also have to be considered as an important topic in the future. The company survey framework and related KPIs presented here are intended to be open for further research and can be quickly adapted to different companies. This should form the basis for further research work with a focus on deriving strategies and investigating the possibility of digital support in the area of material flow management, resource management and their (success) monitoring.

1 Introduction

In Austria, the manufacturing industry (excluding construction industry) has a share of 21.6% in total economic output; in relation to the EU as a whole, industry has a share of 20.5% (Eurostat, b, 2023).

In relation to the European Union, the manufacturing industry will emit 711,083,684.98 tons of CO₂ in 2022, while Austria's industry will emit at least 25,426,515.01 tonnes of CO₂ (Eurostat, a 2023). These emissions only take CO₂ emissions into account, not other greenhouse gases such as methane or nitrous oxide. With the Green Deal, the European Union is taking action to transform the economy, including industry. The aim is to achieve zero net greenhouse gas emissions by 2050 (European Commission [EU], 2019). The

details relating to industry are set out in the green industrial plan. This plan aims to make the European Union a crisis-proof and sustainable location. Funding, education campaigns, secure supply chains and simplified regulations are all intended to help the industry's move in a sustainable direction. The focus is on cooperation for the supply of critical raw materials, export strategies and industrial partnerships (European Commission, 2023). However, in order to make changes and set new standards, instruments are needed to make them quantifiable (Trianni, et.al, 2019). Resources in general, including the circular economy in detail, as aspects of sustainability are the focus of the author's research work and thus also of this article. In addition, questions are asked about digital applications that are already used in companies, but also how willing they are to add such technologies and what the obstacles and requirements would be.

This paper is part of the author's research into the foundations of sustainability issues in the industrial sector and, in particular, the feasibility of theoretical considerations.

2 Methods

2.1 Methods Determination for Measuring Sustainability Measures and Resource Efficiency

The first step is to define sustainability measures based on current research and literature as well as the latest legal framework such as the Green Deal Industrial Plan (EU, 2023). On this basis, a questionnaire for manufacturing companies in Austria will be developed. Resource efficiency will also be one of the core elements of the questionnaire. Resource efficiency and thus the resource conservation is one of the main pillars of sustainable manufacturing (Rashid, et.al., 2008).

This questionnaire is primarily intended to address the area of resource conservation and circular economy in the sense of sustainability. It determines the current status of measures and measurement tools. The questions also aim to assess the readiness of companies to implement the latest regulations and to identify possible gaps. In order to make these measures quantifiable, performance indicators should be assigned according to the current literature. The need to use performance indicators to determine the effectiveness of measures is evident from the current literature (Hristov & Chirico A.,2019). In addition, the possibility is created for the company to specify its own measures or indicators. In this way, the questionnaire can be extended to include industrial experience.

2.2 Survey of Digital Technological Applications for Sustainability Assessment

It also aims to explore digital aspects of current measurements and to derive potential for future implementation. By researching the latest developments and which digital applications are being used in companies according to the latest literature, the questions should enable companies to compare the current status of their own applications.

Current research shows that digital technologies such as artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), blockchain and big data are already being used in companies, although not to the greatest possible extent (Schöggl, et.al., 2023).

Another point should be the question of enablers and barriers, as is already partly discussed in the literature, for the application of digital technologies (Muench, et.al., 2022).

3 Framework Structure

The structure of the questionnaire is divided into the three points listed above, and the questions are then assigned to the respective subcategories:

1. Sustainability measures already implemented by the company.
 - 1.1 Management systems related to sustainability in the company?
 - 1.2 Measures to increase resource efficiency and promote internal recycling of raw materials?
 - 1.3 Monitoring of internal material and energy flows?
2. Digital technologies already in use and their degree of level of use in the organization.
 - 2.1 Digital technologies to monitor the relevant data?
 - 2.2 Digital applications to achieve sustainability goals?
3. The willingness to develop both and the barriers and enablers.
 - 3.1 Barriers to further adoption of new digital technologies in the company.
 - 3.2 Potential enablers for the implementation of new digital technologies.

The questionnaire will then be sent to industrial companies in Austria and the evaluation will be carried out according to different sectors.

Acknowledgements

The project in which my research is carried out (Zero3) is made possible by funding from the FFG. The author of the article would like to thank the project partners for their contribution to their research work.

References

- Eurostat [a] (2023): Air emissions accounts by NACE Rev. 2 activit, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_ainah_r2__custom_9162466/default/table?lang=en (last access: 30.12.2023)
- Eurostat [b] (2023): National accounts and GDP; https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=National_accounts_and_GDP (last access: 30.12.2023)
- European Commissio [EU], (2019). Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions- The European Green Deal. European Commission. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar%3Ab828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF
- European Commission [EU], (2023): Of the Regions – A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee; <https://commission.europa.eu/>

- system/files/2023-02/COM_2023_62_2_EN_ACT_A%20Green%20Deal%20Industrial%20Plan%20for%20the%20Net-Zero%20Age.pdf
- Hristov I, Chirico A.; (2019) The Role of Sustainability Key Performance Indicators (KPIs) in Implementing Sustainable Strategies. *Sustainability*, 11(20):5742. <https://doi.org/10.3390/su11205742>
- Muench, S., Stoermer, E., Jensen, K., Asikainen, T., Salvi, M. and Scapolo, F., (2022): Towards a green and digital future, EUR 31075 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-52451-9, doi:10.2760/977331, JRC129319.
- Rashid, S.H.A.; Evans, S.; Longhurst, P.; (2008): A comparison of four sustainable manufacturing strategies. In: *International Journal of Sustainable Engineering* 1 (3), S. 214–229. DOI: 10.1080/19397030802513836.
- Schögggl, J-P.; Rusch, M.; Stumpf, L; Baumgartner, R.J.; (2023): Implementation of digital technologies for a circular economy and sustainability management in the manufacturing sector. In: *Sustainable Production and Consumption* 35, S. 401–420. DOI: 10.1016/j.spc.2022.11.012.
- Trianni, A.; Cagno, E.; Neri, A.; Howard, M.; (2019): Measuring industrial sustainability performance: Empirical evidence from Italian and German manufacturing small and medium enterprises, *Journal of Cleaner Production*, Volume 229, Pages 1355-1376, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.076>.

Contact

Susanne Roßkogler MSc.

Montanuniversität Leoben

+43664/4370477

Susanne.rosskogler@unileoben.ac.at

<https://www.avaw-unileoben.at/>

Action recognition support system for recycling and sorting facilities

Abstract: *Developing an automatic waste sorting system that can overcome long- and short-term changes in the material flow necessitates a strong baseline. Human manual labor can be continually observed to learn undesirable objects on a conveyor belt. The objects being interacted with can be learned by detecting a sorting worker's hands. Using recent advances in deep learning and Ultra-wideband (UWB) localization we developed such a system, starting with the localization of hands. To this end, we engineered a prototypical glove with a mounted UWB sensor to use its localization alongside video footage processed by state-of-the-art object detection models. In the following, we showcase this system by comparing the two methods.*

1 Introduction

The efficiency of Recycling depends on the purity of the designated material flow. In the past, methods have been developed to automatically separate different waste materials with high throughput and accuracy – e.g., air-operated sensor-based belt sorters. These methods, however, do not work effectively on all materials – e.g., thin-film plastics – and do often not reach the required product purity. To achieve the purity needed, an additional manual sorting process is often necessary.

As this manual sorting represents a potential bottleneck, our intent is to augment sorting workers with an Artificial Intelligence (AI) assistant system. This will improve material purity and process efficiency without taking the human out of the loop. The AI assistant would automatically detect and categorize objects on the conveyor belt and indicate contaminants to be picked by the sorting worker. Since recycling trash particle flows often have similar-looking objects and change over time, e.g., seasonally, it is necessary for the AI system to continually learn from sorting workers while it is deployed.

Learning from human workers requires a smart waste sorting system to recognize a worker's actions, where sensors are used to observe the task execution using, for instance, cameras and wearables equipped with localization sensors. For action recognition, such a system would record the hands of the sorting worker, while they interact with the objects in the conveyor belt. Conventionally, Deep Learning of sequences of images, an AI technique, can be applied to learn to estimate hand positions and to detect hand-to-object interactions in the image sequences. This, however, requires a large amount of painstakingly manually annotated images.

In our approach, we combine vision-based action recognition with the localization of the worker's hands to alleviate the amount of high-quality data needed to train the vision-based Deep Learning action recognition

system. To estimate the position of the worker's hands, we have designed a glove equipped, among other sensors, with Ultrawideband (UWB) localization sensors.

2 Reasoning

To create a system to complement or automatize waste sorting, it first needs to be able to discern different pieces of waste. Deep learning has slowly started to become used for this task. In recent work [1] a robust deep-learning model was developed to classify the types of plastic PE-HD, PET, PP, and PS in images containing one piece of waste at a time. A similar idea was followed in the development of an automatic sorting bin [2], differentiating between 2 classes and dropping waste into either of the two bins automatically. Accuracies competitive to other deep learning benchmarks were achieved by [3] using the TrashNet [4] dataset as a deciding factor.

To sort recyclable waste on an industry scale it is necessary to work with images containing multiple waste objects and accurately detect those that are to be sorted out. To demonstrate a waste sorting system using a robot, an object detector was trained on single and combined images of waste.

Machine learning has already established itself as a universal solution to many industrial problems in areas where sufficient data is collected [5]. In the field of recycling and waste sorting there are a few open-source datasets [6], [7] available to develop robust classifiers as well as object detectors to specifically target objects in a waste stream that are undesired. These systems, however, have one drawback. Training necessitates a different infrastructure and hardware than on-the-edge usage in inference mode. Moreover, once a dataset has been used there is no more to be gained from further training. Following, models are generally deployed in inference mode and would need to be retrained on better hardware once new data becomes available.

Many factors can cause changes in the amount of waste produced in areas as well as its composition [8]. Waste sorting systems will be more affected by short-term visual changes like seasonal differences in packaging or rebranding of products and companies. Those changes warrant additional finetuning occasionally. However, this is only possible when there also exists a dataset. The process of finetuning is thus much more costly if the dataset must also be updated. A solution where the dataset is updated automatically is thus preferable. Although the waste to be classified changes over time, the method of separation does not.

2.1 Object Detection

There are two types of object detectors. Slower albeit more accurate two stage detectors and faster one-stage detectors [9]. The former first extract features using image classifiers, then an intermediary network generates regions of interest and finally classification and localization are performed on the regions of interest by a detection network. For the latter the intermediary stage is left out. This leads to faster inference and training, but lower accuracy. For this case the end-to-end detection transformer, short DETR [10], was used, as new improvements made it superior and easier to use than other systems.

2.2 Ultra-wide band localization

Ultra-Wideband's (UWB) high precision and speed make it ideal for real-time tracking and localization in indoor and industrial environments, which is crucial in many applications, but its human-body interactions have not been studied yet extensively [11]. When combined with Tiny Machine Learning (TinyML), UWB can be implemented on resource-constrained devices without compromising performance. Recent works in UWB and TinyML have focused on classifying Line-of-Sight and Non-Line-of-Sight conditions [12]. These can affect the UWB localization accuracy, error correction, and multi-node localization have also become a focus point of recent work [13]. Combining TinyML and UWB is ideal for wearables such as our glove design. It has the potential to allow for intelligent processing close to where data is generated. Thus, increasing device autonomy, reducing latency, and enhancing energy efficiency.

3 Approach

Ultra-wide band localization

In contrast to camera-based motion detection, the Hand Gesture Demonstrator captures hand movements using a glove. This glove, worn by the employee during waste sorting, allows for a direct and potentially more accurate way to record the intricate movements of the hand. This innovative tool creates a digital twin of your hand and offers a multitude of applications, including hand-tracking, action recognition, remote operation of machinery, and the generation of ground-truth data for AI models. The prototype is equipped with cost-effective sensors that deliver accurate data even in high-interference environments and on any kind of material. This data includes hand positioning using cutting-edge Ultra-Wideband (UWB) technology, hand rotation, finger movements, and events related to grasping and other object interactions.

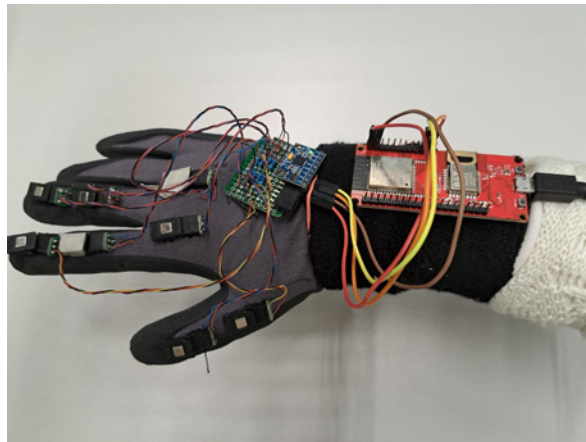


Figure 1 Glove equipped with HAL Sensors, IMU and ESP32 UWB

The movement of the fingers is recorded using Hall sensors on each finger joint. The rotation of the hand is captured with an IMU, and the positioning in space is recorded using UWB technology. The UWB technology

achieves an accuracy of ± 10 cm, which can be improved by fusing the data from the IMU sensor. Furthermore, accuracy can be improved by varying the number of UWB anchor points, thereby reducing the NLOS problem. The data is recorded at a frequency of approximately 70 Hz, which is sufficient for tracking a hand. This data can serve as ground truth to train the vision-based Deep Learning action recognition system. This approach provides a more comfortable and less intrusive method for workers, eliminating the need for constant surveillance by a camera. In addition, the glove is equipped with very cost-effective sensors. The prototype showcased here can be duplicated for less than €100.

Object detection

For object detection, we use DETR [10]. But in general, any deep learning approach producing bounding boxes is usable. As the model is also trained with the objective of predicting “interacted objects” as inspired by [14], the waste collected from the conveyor belt can be used as a potentially infinite training set for another classifier.

DETR is used with pre-trained weights made available by the authors. In order to make it usable for hand detection, it is further trained on the 100DOH dataset as presented in [14]. For this, the classification head is discarded entirely as only the classes “hand” and “interacting object” are used. The localization head is kept. For training all the models’ parameters a learning rate of 0.0001 is used.

The pre-trained object detector is applied to the per-channel normalized frames from the collected video data at 20 fps. As described in [10], first general features are extracted, and then a transformer encoder creates 100 bounding box embeddings from the given features. These are then decoded, a block of linear layers is used to predict classes for every bounding box embedding, and a separate linear localization head creates the final predictions as center x and y coordinates as well as the width and height of the predicted bounding box, a score s is also predicted. Boxes with a score of >0.3 are then seen as confident predictions by the model and further used.

Finetuning the model would mean that it is further trained on a small amount of labeled image data from the waste sorting experiments with UWB. As no finetuning was done on the object detector, the sensor-fitted glove was harder to detect for the object detector at close ranges, which is why a further away slightly angled perspective was chosen. Further, the object detector does not yet differentiate between the left and right hand. Since the camera perspective is always the same, we always chose the second highest-scored hand bounding box as the potential right hand when compared to UWB.

The notebook used for development and testing of the system has the following CPU and GPU specifications:

- Intel i7-7820HQ
- NVIDIA Quadro M2200 4GB.

Inference speed per frame is ~ 192 ms with a standard deviation of ~ 5 ms. Thus, the system could be effectively used on an edge device. Real-time performance could easily be achieved through the usage of real-time object detectors or state-of-the-art hardware.

4 Results

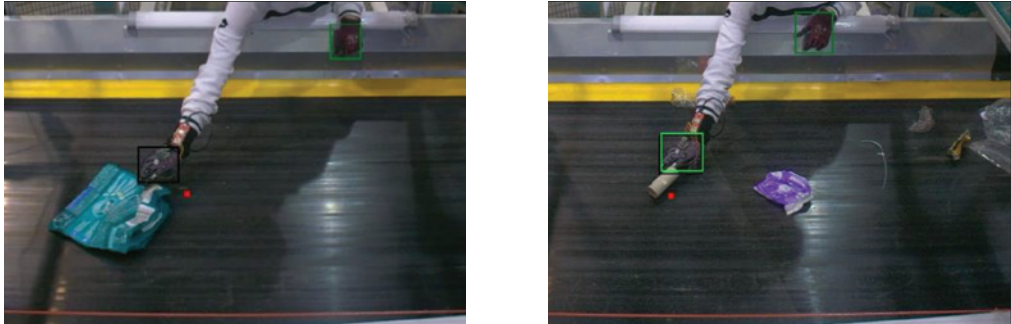


Figure 2 The object detection provides a sufficient prediction (black in the left image, light green in the right image) for the location of the right hand while the UWB localization (red dot) is off by a larger margin.

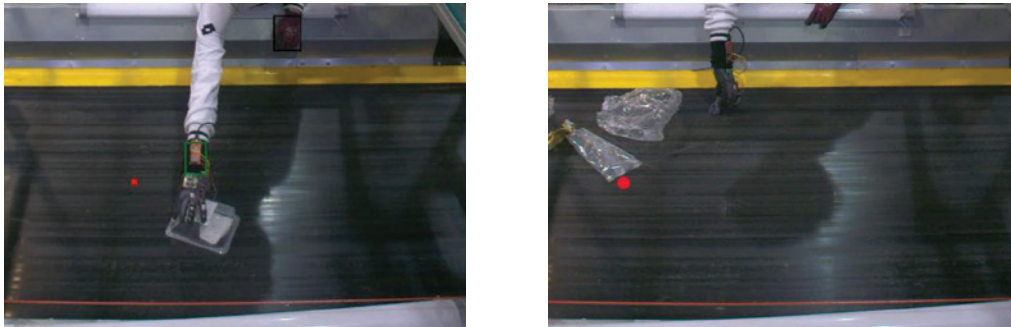


Figure 3 The image on the left shows a case where the object detection system falsely detects only the UWB sensor on the wrist. On the right, there is no detection by the object detector at all, due to the rotation of the hand, while the UWB localization is also far off.

Errors

Pixels [px]	Mean Absolute Error (MAE)	Root Mean Square (RMS)
UWB to real location	163.32	169.77
UWB to object detection	85.23	97.07

Discussion

Judging by the MAE and RMS of the UWB localization to the location of the sensor on the glove, there is still room for improvement. The object detection system performs the hand detection task sufficiently well. However, since it has not yet been trained in the waste sorting setting some peculiarities can be observed, like weaker detection results on still images due to motion blur, rotation of extremities or, general confusion

caused by unknown background objects. While UWB localization always tends to be off by a certain margin, there is less variation. For object-detection, there is a larger variance, as the non-finetuned deep learning system is prone to completely fail on adversarial samples.

Outlook

One further task regarding object and hand detection is to label the data obtained from the experiments and use it for evaluation and if necessary finetuning. This would also make it possible to compare the rather compute-intensive DETR to more performant solutions with negligible accuracy losses.

Equipping the glove with additional sensors would allow detecting touch and subsequently material types of objects from its surface, resistance, elasticity etc. With such modifications the system can recognize how different materials are handled, making it a powerful tool for an automatic waste sorting system, potentially even without cameras entirely.

Finally, a far more extensive evaluation of the systems capabilities needs to be performed in the future.

Acknowledgements

This work has been supported by the by the Austrian Research Promotion Agency FFG, as follows: (1) funding for the work through the AI for Green 2021 (KP) program, through the project *RecAIcle*, Contract No. 4352943, and (2) support through the *FFG-COMET-K1 Center "Pro²Future" (Products and Production Systems of the Future)*, Contract No. 881844.

References

- [1] J. Bobulski und M. Kubanek, „Deep Learning for Plastic Waste Classification System“, *Appl. Comput. Intell. Soft Comput.*, Bd. 2021, S. e6626948, Mai 2021, doi: 10.1155/2021/6626948.
- [2] T. Limsila, A. Sirimangkalalo, W. Chuengwutigool, und W. Feng, „Computer-vision-powered Automatic Waste Sorting Bin: a Machine Learning-based Solution on Waste Management“, *J. Phys. Conf. Ser.*, Bd. 2550, Nr. 1, S. 012030, Aug. 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2550/1/012030.
- [3] M. Yang und G. Thung, „Classification of Trash for Recyclability Status“.
- [4] G. Thung, „garythung/trashnet“. 24. Dezember 2023. Zugriffen: 29. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/garythung/trashnet>
- [5] A. Kajmakovic, J. Pestana, K. Diwold, und K. Römer, „Fault Diagnosis and Isolation Prediction for Redundant Relays Based on Discrepancy Analysis“, in *2023 13th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE)*, Feb. 2023, S. 286–295. doi: 10.1109/CPEEE56777.2023.10217439.
- [6] „Waste Classification data“. Zugriffen: 8. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kaggle.com/datasets/techsash/waste-classification-data>
- [7] N. V. Kumsetty, A. Bhat Nekkare, S. K. S., und A. Kumar M., „TrashBox: Trash Detection and Classification using Quantum Transfer Learning“, in *2022 31st Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Apr. 2022, S. 125–130. doi: 10.23919/FRUCT54823.2022.9770922.

- [8] S. Kaza, L. C. Yao, P. Bhada-Tata, und F. Van Woerden, *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank, 2018. doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0.
- [9] Z. Zou, K. Chen, Z. Shi, Y. Guo, und J. Ye, „Object Detection in 20 Years: A Survey“, *Proc. IEEE*, Bd. 111, Nr. 3, S. 257–276, März 2023, doi: 10.1109/JPROC.2023.3238524.
- [10] N. Carion, F. Massa, G. Synnaeve, N. Usunier, A. Kirillov, und S. Zagoruyko, „End-to-End Object Detection with Transformers“. arXiv, 28. Mai 2020. Zugegriffen: 20. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/abs/2005.12872>
- [11] T. Otim, A. Bahillo, L. E. Diez, P. Lopez-Iturri, und F. Falcone, „Impact of Body Wearable Sensor Positions on UWB Ranging“, *IEEE Sens. J.*, Bd. 19, Nr. 23, S. 11449–11457, Dez. 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2935634.
- [12] E. Ember u. a., „Impact of Feature Selection and CIR Window Length on NLoS Classification for UWB Systems“, Zugegriffen: 8. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.semanticscholar.org/paper/Impact-of-Feature-Selection-and-CIR-Window-Length-Ember-Pestana/dbd58923a8e494b5e-4abd79fcabd0551c2a19e46>
- [13] M. Gallacher, M. Stocker, und M. Baddeley, „InSight: Enabling NLOS Classification, Error Correction, and Anchor Selection on Resource-Constrained UWB Devices“.
- [14] D. Shan, J. Geng, M. Shu, und D. F. Fouhey, „Understanding Human Hands in Contact at Internet Scale“, in *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Seattle, WA, USA: IEEE, Juni 2020, S. 9866–9875. doi: 10.1109/CVPR42600.2020.00989.

Contact

Michael Siegl, Researcher

Iris Unterkircher, Jesus Pestana, Michael Krisper

Pro2Future GmbH, Graz, Austria

Tel.-Nr. +43-732-2468-4783

E-Mail: michael.siegl@pro2future.at

Homepage: <https://www.pro2future.at>

Julian Aberger, Researcher

Montanuniversitaet Leoben, Chair of Waste Processing Technology and

Waste Management, Leoben, Austria

Tel.-Nr. +43 3842 402-5123

E-Mail: julian.aberger@unileoben.ac.at

Homepage: www.avaw-unileoben.at

Development stage of waste management system in ASEAN cities

Abstract: *One of the biggest issues facing countries, particularly emerging nations with high population, production, and consumption growth, is an inadequate waste management system (WMS). This paper analyzes the development of the waste management systems of nine capital cities in the Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) region by using a recently developed approach, the Waste Management System – Development Stage Concept. This concept comprises five development stages and various components, including Collection and Transport, Waste Disposal, Energy Recovery, Waste Recycling, and Waste Prevention and Reuse. The findings indicate that in terms of waste collection, waste disposal, and energy recovery, Singapore is at a higher development stage (Stage 5) and is more advanced than other ASEAN cities. For most of the components, Bangkok, Jakarta, Kuala Lumpur, and Manila fall into stage 2 to 4, whereas early development stage 1 to 3 are present in Bandar Seri Begawan, Hanoi, Phnom Penh and Vientiane. The results will be used to determine the next steps in developing the WMSs, including the introduction of separate collection for recycling or the installation of a waste-to-energy plant. The environmental impact of each measure will be later assessed using the LCA approach, and the most effective measures shall be identified in future studies.*

1 Introduction

With a high population growth rate and increasing urbanization, the Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) is one of the fastest-growing regions in the world. In 2016, 243 million tons of waste were produced by just six ASEAN member states: Indonesia, Malaysia, the Philippines, Singapore, Thailand, and Vietnam. Only 47% of the waste produced in the ASEAN region is estimated to be collected, and only one-fourth of the amount collected is recycled (ASEAN, 2021). Illegal waste disposal (such as open burning and open dumping) is still a serious issue as it accounts for 34% of collected waste (ASEAN, 2021). Illegal disposal causes negative impacts on the environment, including contamination of air, water, and soil, thereby posing a potential risk to human health (Ferronato et al., 2019). Additionally, five ASEAN nations were listed among the world's top 10 for poor handling of plastic waste, a significant contributor to marine littering (Jambeck et al., 2015). Despite this, ASEAN countries such as Vietnam, Thailand, Indonesia, and Malaysia are among the top importers of plastic waste, as plastic waste shifted to Southeast Asia after China's waste import ban in 2017 (Greenpeace, 2019). These countries also play a major role in plastic waste recycling despite their inadequate waste management system. Furthermore, exporting waste to countries with lower energy and labor costs has aided unsustainable recycling practices in the informal context, with severe consequences in terms of human health and emissions to the environment (Salhofer et al., 2021).

Landfills and dumpsites continue to be the predominant method of disposal in many ASEAN nations, despite the rise in popularity of waste-to-energy and the 3Rs (Reduce, Reuse, Recycle) strategy. To assist decision-makers in creating policies that are most suitable for the local environment, it is necessary to identify the first-priority solution to the existing problem, which requires essential data in various dimensions.

Therefore, the objective of this study is to establish baseline data on the current state of waste management and conduct a comparison of the status quo among ASEAN cities by using the Waste Management System – Development Stage Concept (WMS-DSC) approach provides an additional degree of detail and the explicit processes of each development stage (Campitelli et al., 2022).

2 Methodology

2.1 WMS-DSC Approach

This paper analyzes the development of the WMSs of nine capital cities in the ASEAN region. This region has very dynamic characteristics, with similar cultures and lifestyles but distinct geographic constraints and economic development, leading to the diverse development of their WMSs. To describe and analyze the development stages of these cities, a recently developed approach, WMS-DSC, was used (Campitelli et al.,2022). WMS-DSC is built on five development stages, with stage 1 representing a WMS without essential waste management components and stage 5 illustrating a working CE. The WMS-DSC is relevant to all WMSs, whether urban or rural, and can be adapted to both Global South and Global North nations. It is designed for the evaluation of a WMS by practitioners and decision-makers who are familiar with the WMS (Campitelli et al.,2022).

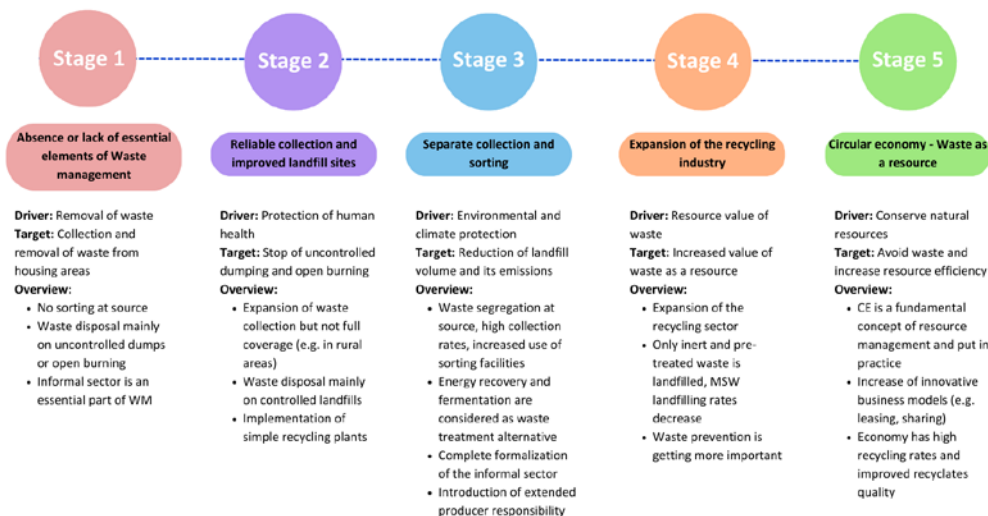


Figure 1 shows the five development stages along with their relevant drivers and targets.

For this study, the five technical components of WMS-DSC namely 1) Collection and Transport “CT”; 2) Waste disposal “WD”; 3) Energy recovery “ER”; 4) Waste recycling “WR” and 5) Prevention and reuse “PR”. The data for this analysis were gathered through desk research. The authors compiled publicly available documents and material from the internet, such as reports and publications from local government websites, NGOs, relevant research papers, local waste companies, and articles. The available data were, thereafter, utilized to analyze each component and its subcomponents using the WMS-DSC excel sheet provided by the approach’s developer (Campitelli et al., 2022).

3 Result

3.1 Collection and Transport “CT”

For waste collection, service provider, separate collection, collection of recyclables, waste transport, transfer station and collection of hazardous waste, the nine ASEAN cities have a similar path of development, whereas Singapore has a more advanced system (reached stage 5) and facilities due to the introduction of digitalization measures and full maintenance of urban hygiene with no littering in public spaces. Due to high collection rates in Hanoi and Bangkok, the two cities have reached stage 5 of CT.3, while Vientiane is still in stage 1 due to low collection rate, which is below 50%. However, the collection rates of recyclable materials for all the cities are not documented; thus, all the cities were ranked in stage 1. The informal sector still plays an active role in recyclable collection in all the cities, even in Singapore, where Karung Guni (waste collectors) are active in addition to the formal system (Wong, 2022). Overall, Singapore, Bangkok, and Hanoi fall under the range of stage 1 to 5. Bandar Seri Begawan, Phnom Penh, Jakarta, Kuala Lumpur, and Manila are considered to be within stage 1 to 4. Lastly, Vientiane is categorized within the stage range of 1 to 3.

3.2 Waste disposal “WD”

While some sanitary landfills have recently been established, many ASEAN cities (varying from stage 1 to 4) still rely on controlled landfills, e.g. Malaysia has currently a total of eight sanitary landfills out of 176 landfills (ITA, 2022); Vietnam has a total of 450 landfills, though only 120 of them follow the adequate sanitary regulations (Global Recycling, 2020). Open burning still occurs in many parts of the metropolis across the countries, creating climate impacts, e.g. it is estimated that burning MSW at the household level amount-ed to 71,763 kg/day in Padang City (Indonesia). In Steung Saen Municipality, Cambodia, nearly 50% of waste is open burned at the dumpsite (Singh, 2022). Food waste and recyclable waste are still primarily disposed of in landfills.

3.3 Energy recovery “ER”

Having operated the first incinerator plant in ASEAN back in 1979, thereby having at least 50 years of expertise, Singapore (Stage 3 to 5) plays a leading role in energy recovery (ER). Incineration and Waste to Energy (WtE) plants are still emerging in the remaining ASEAN cities due to the lack of financial support and operational experience (Tun et al., 2020), contradictions to national law and regulation (like in Philippines) [53] and environmental concerns from activists (like in Thailand and Indonesia) (Mongabay, 2022). However, due to the limitations associated with the option of landfills and the fast growing waste generation, WtE has

become an alternative among mega cities, such as Bangkok, Jakarta, Hanoi, Manila, and Kuala Lumpur (stage 2 to 4), where a number of incinerators have been installed, with the technology coming from Japan, Korea and Europe.

3.4 Waste recycling “WR”

Formal and informal waste recycling activities can be found in multiple places in Thailand, Vietnam, Malaysia, and Indonesia. For example, there are at least 22 formal plastic recycling businesses in Indonesia. However, Indonesian recycling facilities are still unregulated, and many of them lack adequate health and safety operating procedures (OECD, 2021). Craft villages in Vietnam play an essential role in the treatment of recyclable materials. However, in this informal context, technologies do not represent the state of the art, creating adverse impacts on workers' health and the environment (Salhofer et al., 2021). Bandar Seri Begawan, Phnom Penh and Vientiane, at stage 1 to 3, are still lacking a re-cycling industry, and most recyclable materials collected are exported for further treatment. Hanoi is also at stage 1 to 3 due to the high share of informal recycling activities. Jakarta, Kuala Lumpur, Manila and Bangkok range from stage 1 to 4 since higher sorting and recycling technology are adopted.

3.5 Prevention and reuse “PR”

Waste prevention is widely encouraged in ASEAN cities. A number of campaign activities regarding food waste, single use plastic and other packaging waste are conducted throughout the countries. The repair sector is widely present in the ASEAN region, especially in low-income cities, e.g. Vientiane, Phnom Penh, and Hanoi. However, the impact of these activities are not documented and has not been investigated so far. Initiatives of voluntary take-back systems have been implemented in different cities, e.g. return of bottles to a beverage company in Bangkok (ThaiBev, 2023) and beverage container return scheme in Singapore (NEA, 2023).

4 Conclusion and outlook

Nine ASEAN cities are moving towards the same direction regarding the WMS development stages, starting from simple waste removal to ensure a safe environment & human health and going towards CE. The development stages of each component were influenced by external factors, such as population size, income level, economic development, geographical location, and technical capacities, which are all interconnected. The results of this study also reflect the similarities of difficulties that each of the cities face regardless of their income level or population size, particularly regarding low recycling rates and difficulties in waste disposal management and monitoring. Hence, addressing budgetary constraints and technical limitations only may not always provide optimal solution. Public participation and political will are also key to improving a WMS. Due to the fact that the WMS-DSC is not designed to provide results on environmental impact, to identify priorities for further development, in the next step of this research, selected waste streams along the waste hierarchy will be analyzed using the life cycle assessment approach.

References

- ASEAN (2021): ASEAN Regional Action Plan for Combating Marine Debris in the ASEAN Member States - Action Plan Summary. Jakarta, ASEAN Secretariat.
- Ferronato N, Torretta V. (2019): Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. *Int J Environ Res Public Health*. 2019 Mar 24;16(6):1060. doi: 10.3390/ijerph16061060
- Jambeck, J.R., Andrady, A., Geyer, R., Narayan, R., Perryman, M., Siegler, T., Wilcox, C., Lavender Law, K., (2015): Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, 347, p. 768-771.
- Greenpeace (2019): Southeast Asia's struggle against plastic waste trade.
- Salhofer S., Jandric A. Soudachanh S., Thinh L.X. and Tran T.D.(2021): Plastic recycling practices in Vietnam and related hazards for health and environment, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18(8), 4203 2021.
- Campitelli, A., Kannengießler, J., Schebek, L., Approach to assess the performance of waste management systems towards a circular economy: waste management system development stage concept (WMS-DSC), *MethodsX*, Volume 9, 2022, 101634, ISSN 2215-0161, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101634>.
- Wong, Aidan Marc (2022): Valued waste/wasted value: Waste, value and the labour process in electronic waste recycling in Singapore and Malaysia. *Geography Compass*. 16, (4), Research Collection College of Integrative Studies. <https://doi.org/10.1111/gec3.12616>
- International Trade Administration (2022). Malaysia waste management solutions.
- Global Recycling (2020). Waste management in Vietnam. The race is on.
- Singh, R., Gamaralalage, P., Tatsuno, M., Inoue, M (2022). Open Waste burning in Asian cities: Challenges and Opportunity. Available online: <https://www.iges.or.jp/en/pub/open-waste-burning-asian-cities/en>
- Tun, M., Palacky, P., Juchelkova, D., Sitar, V (2020). Renewable Waste-to-Energy in Southeast Asia: Status, Challenges, Opportunities, and Selection of Waste-to-Energy Technologies. *Applied Sciences*.
- Mongabay (2022). As waste to energy incinerators spread in Southeast Asia, so do concerns.
- ThaiBev (2023). Waste and Packaging Management and Circular Economy.
- National Environmental Agency (2022). Beverage container return scheme.

Kontakt

Dipl.-Ing. Souphaphone Soudachanh, wissenschaftliche Mitarbeiterin

University of Natural Resources and Life Sciences Vienna,

Institute of Waste Management and Circularity

Tel.-Nr. +43 1 47654-81340

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

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

Bioraffinerie weiterentwickelt werden. Ein Überblick über das Gesamtprojekt BW2Pro, das in Zusammenarbeit mit weiteren Kooperationspartnern durchgeführt wird, mit seinen wesentlichen Komponenten, liefert Abb. 1. Nach Inbetriebnahme sollen täglich ca. 1.000 kg Bioabfall und Grüngut aus kommunaler Sammlung in der Demonstrationsanlage verarbeitet werden.

Eine Teilaufgabe 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 Abscheidungsgrad von 80 % erreicht. Hydrozyklone werden zur Fest-Flüssigtrennung eingesetzt und nutzen die Sedimentationsgeschwindigkeit zur Abtrennung von Partikeln aus flüssigen Medien (siehe Abb. 2). Um dies zu erreichen muss die Viskosität des Substrats reduziert werden, wodurch die Sedimentationsgeschwindigkeit erhöht wird (Senfter 2019). Der Abscheidungsgrad 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.

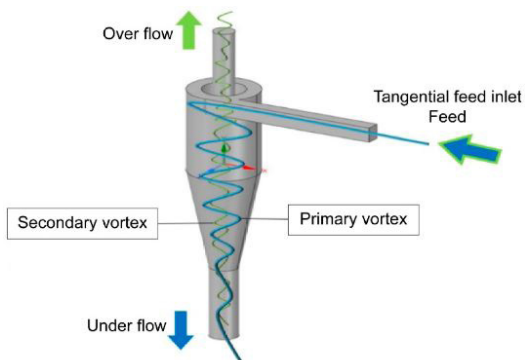


Abb. 2: Strömungsrichtung des Hydrozyklonabscheiders aus (Yi et al. 2021)

Da eine optimale Funktionsfähigkeit des Hydrozyklons ein Wassergehalt des Substrats von über 85 % (bzw. ein Trockenrückstandsgehalt von unter 15 %) erfordert, ist dem Bioabfall (TR-Gehalt ca. 35 %, erfahrungsgemäß zwischen 20 - 48 %, Kranert 2017) zunächst auch eine entsprechende Menge (Prozess-)Wasser zuzusetzen, das dann nach der Entfrachtung wieder entfernt wird.

Ziel dieser Arbeit ist die Charakterisierung des Inputmaterials von einer bestehenden Biovergärungsanlage in Baden-Württemberg, welches für die geplante Demonstrationsanlage verwendet werden soll.

2 Methodik

Die angelieferten Bio- und Grüngutabfälle an einer bestehenden Biovergärungsanlage in Baden-Württemberg werden vor Ort mittels Schredder zerkleinert und über ein Sternsieb mit einer Korngröße von ca. 50 mm abgesiebt. Dieser Siebdurchgang wird als Inputmaterial für die geplante Bioraffinerie verwendet und wurde 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 schweren Störstoffanteilen (Steine, Metalle, Glas) auch die Feststoffgehalte (TR-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.

2.1 Begleitende Voruntersuchungen

Zur Charakterisierung des Inputmaterials der geplanten Bioraffinerie wurden die Proben der bestehenden Biovergärungsanlage nach dem in der Bioabfallverordnung (DIN EN 12579:2013, 2014) beschriebenen Verfahren entnommen. Zur Abbildung von betrieblichen und (jahres-)zeitlichen Schwankungen wurden 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 wurden. Die Entnahme erfolgte an 15 Probenahmestellen eines Bioabfallhaufens. Es wurden jeweils ca. 2 l entnommen, sodass etwa 30 l bzw. etwa 12 kg Bioabfall pro Probenahme anfielen.

Gemäß Methodenhandbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate (Bidlingmaier 2006) wurde der TR-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 wurden 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 begleitenden Voruntersuchungen zur Charakterisierung des Bioabfalls ergaben Trockenrückstandsgehalte (TR-Gehalte) im Bereich zwischen 26 und 64 %, welcher gemittelt im Sommer etwas höher ist als im Herbst und Winter (Vgl. Abb. 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 TR-Gehalte im Sommer sein. Im Mittel über alle entnommenen Proben ergab sich ein TR-Gehalt von 37 %.

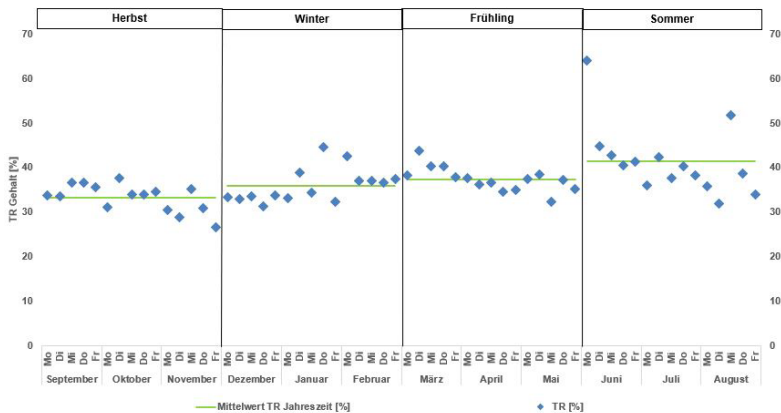


Abb. 3: Ergebnisse der gemittelten TR-Gehalte des Bioabfalls

Der Störstoffanteil bei den untersuchten Proben liegt im Mittel bei 1,5 % bezogen auf die Trockenmasse und befindet sich im Bereich zwischen 0,1 % (im Winter) und 7 % (ebenfalls im Winter). Gemittelt über die Jahreszeit reichen die Fremdstoffanteile von 1 % im Herbst bis 2,2 % im Sommer (siehe Abb. 4). Die größten Anteile der Störstoffe machen in den bisherigen Untersuchungen Steine aus. Metalle und Glas haben einen deutlich geringeren Anteil.

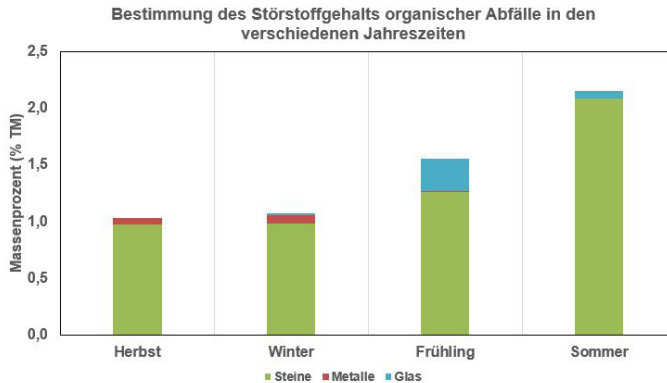


Abb. 4: Ergebnisse der gemittelten Störstoffanteile im Bioabfall

4 Ausblick und Fazit

Für eine weitere Detailanalyse des Inputmaterials ist zukünftig eine Erweiterung des Analytikumfangs vorgesehen. Zur Bilanzierung des Anlagenbetriebs wurden verschiedene Probenahmestellen definiert, damit dieser begleitet und fortlaufend optimiert werden kann. 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 TR-Gehalte des Inputmaterials. Es ist mit einem TR-Gehalt von ca. 35 % [26 %, 46 %] zu rechnen, sodass in der geplanten Anlage für eine Reduktion der täglichen Inputmenge von 1.000 kg auf 10 % TR-Gehalt etwa 2.500 l [1.600 l, 3.600 l] (Prozess-)Wasser benötigt werden. Dies kann je nach Wochentag und Jahreszeit, analog des TR-Gehalts, zum Teil erheblich schwanken, wie schon die ersten Messergebnisse zeigen. Des Weiteren ist mit einem Störstoffanteil im Bereich von 0,1 % - 7 % bezogen auf die Trockenmasse zu rechnen, welcher vorwiegend aus Steinen besteht und aus dem Bioabfall entfrachtet werden sollte. Die ersten Ergebnisse der Hydrozyklonversuche sind dabei vielversprechend.

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, 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, zuletzt geprüft am 13.01.2023.
- Senfter, T. (2019): Kontinuierliche Störstoffabscheidung in der Klärschlamm-Co-Fermentation mittels Zentrifugalabscheider.

Kontakt

M.Sc. Axel Steffens (Wissenschaftlicher Mitarbeiter)

Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft

Tel.-Nr. 0711 68565436

E-Mail: axel.steffens@iswa.uni-stuttgart.de

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

Bewertung von Biomassen in Sachsen zur Produktion von Pflanzenkohle für die Anwendung in der Landwirtschaft

Abstract: *Der Einsatz von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft hat nicht nur großes Potential als Bodenverbesserer, sondern auch als Negativemissionstechnologie, welche bereits auf Technical Readiness Level 9 verfügbar ist. Mit der Aktualisierung der EU-Vorschriften über Düngeprodukte (Verordnung 2019/1009) zum 16. Juli 2022 eröffnen sich neue Potentiale für regionale Verwertungskreisläufe von verschiedenen Biomassen zur Produktion von Pflanzenkohle. Insbesondere die neu verfügbaren Biomassen sollen, neben ökonomischen Betrachtungen, auch hinsichtlich ihrer ökologischen und gesundheitlichen Auswirkungen bewertet werden. Dabei werden Biomassenströme betrachtet, die regional in Sachsen verfügbar und zur Herstellung von Pflanzenkohle für landwirtschaftliche Anwendungen geeignet sind. Mögliche Umweltauswirkungen werden nach ISO 14040 und 14044 in einer umfassenden Ökobilanzierung ermittelt. Darauf basierend sollen Empfehlungen für eine nachhaltige Pflanzenkohleproduktion in Sachsen formuliert werden. Die Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) wurde mit dem umfangreichen Bezugsrahmen der Cradle-to-Cradle Analyse definiert.*

Erste Ergebnisse zeigen, dass der landwirtschaftliche Anbau zur Biomassenproduktion für die Pflanzenkohle die größten Umweltauswirkungen verursacht. Wasserverschmutzung und verwendete Rohstoffe sind hierbei die Hauptverursacher von Umweltauswirkungen in den Bereichen „Ökosystemqualität“ und „menschliche Gesundheit“. Nutzungskonflikte müssen zudem in die Diskussion der Ergebnisse maßgeblich einbezogen werden. Die positiven Umweltauswirkungen der Pflanzenkohle als Kohlenstoffsенke und Bodenverbesserer sorgen bei den meisten Biomassen für eine insgesamt positive Bewertung in der Ökobilanzierung im Vergleich zu anderen Nutzungsszenarien.

1 Einleitung

1.1 Pflanzenkohle

Pflanzenkohle (PK) wird durch Pyrolyse aus organischem Material gewonnen, hat eine innere Oberfläche von ca. 300 m²/g und einen Kohlenstoffgehalt von ca. 80%, abhängig von der Prozessführung und dem Ausgangsmaterial [European Biochar Certificate, 2022].

Kohlenstoffsenken, die auch als Negativemissionen bezeichnet werden, sind für das Erreichen der Klimaziele von Paris notwendig, Teil der meisten IPCC Szenarien und in den Klimaschutzplänen der EU enthalten. Für die im Jahr 2050 anvisierte Klimaneutralität der EU muss ein prognostiziertes Senkenvolumen von 850 Mio. t CO₂e pro Jahr geschaffen werden. Aktuell ist die Herstellung und Nutzung von PK die relevanteste industrielle Negativemissionstechnologie, mit einer Produktion von 33.500 t PK in 2022, äquivalent zu mehr als 90.000 t CO₂ [Bier et al 2020]. Für 2023 wird die Produktionskapazität auf über 90.000 t PK in Europa prognostiziert [European Biochar Industry Consortium, 2023]. Da PK den Kohlenstoff langfristig bindet (biologische Stabilität), hat sich zudem ein funktionskräftiger Zertifikatehandel etabliert, der die finanzielle Attraktivität der Technologie fördert [Shackley et al, 2016].

Für den Einsatz in der Landwirtschaft sind durch zahlreiche Studien signifikante positive Veränderungen von Ertrag und Bodeneigenschaften belegt. Die poröse Struktur der PK macht sie zu einem wertvollen Habitat für Bodenorganismen und sorgt dafür, dass bis zur fünffachen Menge ihres Eigengewichtes an Wasser und den darin gelösten Nährstoffen aufgenommen werden kann (Adsorptionskapazität) [Biederman & Harpole, 2013]. Die flüssigen und gasförmigen Nebenprodukte der Pyrolyse (Pyrolyse-Gase und -Öle) bieten viele Potentiale für die industrielle oder energetische Verwertung. Die bei der Erzeugung anfallende Abwärme kann in Nah- und Fernwärmenetze eingespeist werden und so die klimaneutrale Wärmeversorgung stützen.

1.2 Pflanzenkohle in der Landwirtschaft

Zunehmende Trockenheit und Extremwetterereignisse beeinflussen die sächsische Landwirtschaft in zunehmendem Maße. PK kann einen Beitrag dazu leisten, die notwendige Transformation der Landwirtschaft vom Netto Emittenten, insbesondere durch Methan-Emissionen aus der Tierhaltung und Lachgas-Emissionen als Folge der Stickstoffdüngung, zur Kohlenstoffsenke voranzutreiben [Bier et al, 2020].

Dabei kann der Einsatz von PK in der Landwirtschaft an verschiedenen Stellen erfolgen oder auch in Kaskadennutzung besonders effizient den Betrieb durchlaufen. Die Qualität der PK sowie die fachkundige Anwendung sind dabei elementar für den positiven landwirtschaftlichen Nutzen. Dazu gehören z.B. eine erhöhte Prozessstabilität in Biogas und Kompostanlagen sowie verringerte Emission von Lachgas, Ammoniak und Methan [Lone et al., 2015]. Mit Nährstoffen und Flüssigkeit angereicherte PK (sogenannte Beladung) verbessert auf dem Feld den Ertrag und die Wasserhaltekapazität des Bodens. Bei richtiger Bewirtschaftung beschleunigt sich zudem der Humusaufbau und weniger Nährstoffe werden, z.B. in das Grundwasser, ausgewaschen [Biederman & Harpole, 2013].

Die physikalischen Eigenschaften von PK beeinflussen sowohl direkt als auch indirekt die Bodensysteme, in die sie eingebracht wird. Die Porengröße der PK spielt dabei eine wichtige Rolle. Die Mikroporen (<2 nm im Durchmesser) tragen zur Oberflächengröße bei und sorgen für die hohen adsorptiven Kapazitäten des Bodens. Makroporen (<50nm Durchmesser) sind vor allem wichtig für die Belüftung und Hydrologie, sowie für die Bewegung von Wurzeln durch den Boden und als Lebensraum für eine große Vielfalt von Bodenorganismen relevant [Lone et al., 2015].

1.3 Pyrolyse

Bei Temperaturen über 120°C beginnen organische Materialien sich thermisch zu zersetzen. Hemicellulosen werden bei 200°C bis 260°C abgebaut, Cellulose bei 240°C bis 350°C und Lignin bei 280°C bis 500°C.

Diese Anteile und anorganischen Komponenten (Asche) beeinflussen maßgeblich die physikalische Struktur während der Pyrolyse [Wang et al. 2022]. Die meisten Pyrolyseanlagen nutzen Temperaturen von 450°C bis 600°C zur PK Herstellung. Hierbei gilt es einen Kompromiss zwischen Menge (niedrige Temperaturen) und Reinheit (hohe Temperaturen) der PK zu finden. Auch die Menge an Pyrolyse-Gas und -Öl wird vornehmlich durch die Temperatur bestimmt [Demirbas et al, 2004]. Das Gas besteht größtenteils aus Wasserstoff und Methan und kann energetisch oder stofflich genutzt werden. Das Pyrolyse-Öl wird aktuell wegen der geringen Reinheit meist energetisch verwertet. Zukünftig ist eine stoffliche Nutzung in der Petrochemie als klimaneutraler Ausgangsstoff denkbar. Die Ausbeute an PK liegt in modernen industriellen Anlagen, die auf den PK Ertrag optimiert wurden, bei ca. 50% des Kohlenstoffes im Ausgangsmaterial [Novak et al., 2016].

Die Adsorptionskapazität, welche für viele Anwendungen der PK von besonderer Wichtigkeit ist, erreicht die höchsten Werte bei einer Pyrolyse im Bereich von 450° C bis 700° C und bei Ausgangsstoffen wie Holz, Nussschalen und Obstkernen. Bei der Nutzung von Stroh als Biomasse wiederum wird nicht nur deutlich weniger Kohlenstoff gebunden, auch die Adsorptionskapazität der PK ist geringer [Polin, 2019]. Derartige Faktoren müssen bei einer Bewertung von Biomassen zu PK Herstellung berücksichtigt werden.

2 Methodik

2.1 Ökobilanzierung – Life Cycle Assessment

Das Life Cycle Assessment (LCA) Modell basiert auf vier verschiedenen Phasen: Ziel und Umfang, Bestandsaufnahme, Analyse des Einflusses (impact assessment) und Interpretation der Daten. Es wurde die Cradle-to-Cradle Analyse ausgewählt, um Umfang und Methodik der LCA festzulegen. Dieses Modell definiert den Lebenszyklus eines Produktes vom Abbau der Rohstoffe und der Produktion zum Recycling des Abfalls, sodass dieser für die Produktion neuer Produkte verwendet werden kann [European Commission, 2010]. Für diese Arbeit wird von einer landwirtschaftlichen Anwendung der PK als Bodenverbesserer ausgegangen. Hierbei entspricht der Abbau der Rohstoffe der Produktion der Biomasse und die Produktion dem Pyrolyse Prozess. Dann werden sowohl der Transport der Biomasse zur Pyrolyse Anlage als auch der Transport der PK zum Feld bzw. zum landwirtschaftlichen Betrieb berücksichtigt. In der Nutzungsphase wird die PK aufs Feld ausgebracht und als Bodenverbesserer genutzt. Die Beseitigung und das Abfall-Recycling wird auf die Entsorgung und Wiederverwendung der Nebenprodukte, die im Pyrolyse Prozess anfallen, bezogen.

2.2 Massenbilanzierung

Im Rahmen der Dissertation werden die für die Pflanzenkohleproduktion zur Verfügung stehenden Massenströme beispielhaft anhand des Landkreises Bautzen in der Oberlausitz untersucht. Für kurze Transportwege der Biomasse und um Nutzungskonflikte zu bestehenden Verwendungen zu vermeiden, wird der Fokus auf regionale Reststoffe gelegt. Die Datenerhebung basiert sowohl auf online verfügbaren GIS Daten und Daten der Landratsämter, sowie auf qualitativen Interviews mit Landbesitzer*innen und Expert*innen.

3 Erste Ergebnisse

Biomasse ist als Ressource begrenzt und kann entweder über die stoffliche Nutzung, über den Aufbau von organischer Bodensubstanz, über PK oder über ein BECCS-System in eine Senke verwandelt werden. Höhere Kohlenstoffeffizienz lässt sich durch Synergien und Kaskadenlösungen, die mit einer stofflichen Nutzung über Jahrzehnte beginnen und mit der Schaffung einer dauerhaften Senke enden, erreichen. Negativemissionstechnologien dürfen keinesfalls zu Lasten der Biodiversität, der Lebensmittelproduktion oder des Wasservorkommens gehen. Vor diesem Hintergrund ist der Anbau von Biomasse ein kritisches Stadium für die Nachhaltigkeit des gesamten Prozesses [Matustík et al, 2020]. Die Untersuchung und Bewertung verschiedener Biomassen zur Herstellung von PK ist damit elementar, um geeignete Governance-Ansätze, wie die EBC Zertifizierung, durchsetzen zu können. Eine umfängliche Nutzung der thermischen Energie aus der Pyrolyse und die vornehmliche Nutzung von schwer zu verwendenden Restbiomassen reduziert zudem mögliche Nutzungskonflikte. Denn um bis 2030 sechs Megatonnen CO₂ mit PK als Kohlenstoffsенke zu binden, müsste 1% der Trockenbiomasse pyrolysiert werden. Für die 100 Megatonnen CO₂ bis 2040 würden 19% der Trockenbiomasse benötigt [Panoutsou & Maniatis, 2021].

Danksagung

Das Projekt *thebiocharstory* wird vom BMBF im Rahmen des Programmes *Neue Produkte für die Bioökonomie* gefördert.

Literatur/Quellen

- Bier, H., Gerber, H., Huber, M., Junginger, H., Kray, D., Lange, J., Lerchenmüller, H., Nilsen, P.J. (2020). EBI Whitepaper. Biochar-based carbon sinks to mitigate climate change. EBI. http://www.biochar-industry.com/wp-content/uploads/2020/10/Whitepaper_Biochar2020.pdf
- Biederman, L.A., Harpole, W. S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis, *GCB Bioenergy* 5; pp 202–214, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12037>.
- Demirbas, A. (2004). Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237004000646>
- European Biochar Certificate (EBC). (2022). Guidelines of European Biochar Certificate. EBC. https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_1.pdf
- European Biochar Industry Consortium (2023). European Biochar Market Report 2022|2023 - March 2023.
- European Commission –Institute for Environment and Sustainability. (2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCS) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment. Detailed guidance. Publications Office of the European Union. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>
- Lehmann, J., Joseph, S. (2015). Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation, second ed., Routledge, New York.
- Lone, A.H., Najar, G., Ganie, R., Sofi, G., Ali, T. (2015). Biochar for sustainable soil health: a review of prospects and concerns, *Pedosphere* 25; pp 639–653, [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30045-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30045-X).
- Matustík, J., Hnátková, T., Kocí, V. (2020). Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620310453>

- Novak, J.M., Ippolito, J.A., Lentz, R.D., Spokas, K.A., Bolster, C.H., Sistani, K., Trippe, K.M., Phillips, C.L., Johnson, M.G. (2016). Soil health, crop productivity, microbial transport, and mine spoil response to biochars, *Bioenergy Res.* 9 <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9720-8>.
- Panoutsou, C., Bauen, A., Böttcher, H., Alexopoulou, E., Fritsche, U., Uslu, A., Maniatis, K. (2013). Biomass Futures: An integrated approach for estimating the future contribution of biomass value chains to the European energy system and inform future policy formation. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(2), 106– 114. <https://doi.org/10.1002/bbb.1367>
- Polin, J.P., Carr, H.D., Whitmer, L.E., Smith, R.G., Brown, R.C. (2019). Conventional and autothermal pyrolysis of corn stover: Overcoming the processing challenges of high-ash agricultural residues. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237019303948>
- Shackley, S., Ruyschaert, G., Zwart, K., Glaser, B. (2016). *Biochar in European Soils and Agriculture. Science and Practice.* Routledge.
- Wang, L., Olsen, M.N.P, Moni, C., Dieguez-Alonso, A., de la Rosa, J.M., Stenrod, M., Liu, X., Mao, L. (2022). Comparison of properties of biochar produced from different types of lignocellulosic biomass by slow pyrolysis at 600 °C. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666352X22000334>

Kontakt

M.Sc. Freya Sternkopf, wissenschaftliche Mitarbeiterin

TU Dresden, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Tel.-Nr. 0351/463441 39

E-Mail: freya.sternkopf@tu-dresden.de

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

Überblick über die Bestimmungsmethoden für Polyolefine in Abfallproben

Abstract: Die Menge an Kunststoffabfällen in der EU nimmt ständig zu. Polyolefine, die aus Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) bestehen, machten im Jahr 2021 46,2% aller produzierten Kunststoffe aus und waren damit die am stärksten vertretene Gruppe unter den weltweit produzierten Kunststoffen. Angesichts der bedeutenden Verwendung von Polyolefinen in verschiedenen Anwendungen ist es wichtig, die Polyolefine in den Abfallproben als Grundlage für die Sortier- und Recyclingverfahren bestimmen zu können. Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen Überblick über die bestehenden Bestimmungsmethoden für Polyolefine in Abfallproben zu geben, um mit der Darstellung ihrer Vor- und Nachteile die Entscheidung innerhalb entwickelter Methoden zu erleichtern und zu beschleunigen.

1 Einleitung

Kunststoffabfälle und der Umgang damit sind eine der größten Herausforderungen unserer Generation. Im Jahr 2020 wurden in der EU 27+3 29,5 Tonnen Post-Consumer-Kunststoff gesammelt, von denen 17,9 Tonnen Verpackungsabfälle waren. Die Polyolefine machen fast 75% aller produzierten Verpackungen aus, wobei ein großer Teil der Einwegpackungen aus Polyolefinen hergestellt wird, was zu entsprechenden Abfallmengen führt. (Plastics Europe, 2022) Sie haben viele Vorteile wie geringes Gewicht, chemische Inertheit, niedrige Kosten, einstellbare Eigenschaften und einfache Verarbeitbarkeit (Wang et al., 2023). Eine der größten Herausforderungen im Zusammenhang mit Kunststoffen ist das End-of-Life-Management. Der größte Teil der Kunststoffabfälle wird derzeit verbrannt, und nur 35 % werden 2020 in der EU recycelt. In der Richtlinie 2008/98/EC von 2018 des Rates hat sich die EU das Ziel gesetzt, bis 2030 eine Recyclingquote von 55% für Kunststoffverpackungen zu erreichen. Um die Recyclingquote von 55 % für Kunststoffverpackungen zu erreichen, müssen die bestehenden Recycling Technologien weiterentwickelt werden. Hochgradiges Kunststoffrecycling erfordert eine exakte Trennung der verschiedenen Kunststoffarten nach ihren Hauptkomponenten, da Recyclingprozesse spezifisch für jeweilige Typen sind. Daher werden Bestimmungsmethoden in verschiedenen Formen benötigt, von den in den Labors verwendeten Methoden bis hin zu den Anlagen. Diese Arbeit fasst Methoden zusammen, die zur Bestimmung von Polyolefinen verwendet werden.

2 Methodik

Durch systematische Literaturrecherche wurden verschiedene Bestimmungsmethoden erhoben und deren wesentlichsten Charakteristika erfasst sowie Vor- und Nachteile bzw. Limits und Einschränkungen der verschiedenen Methoden erarbeitet. Die Literaturrecherche wurde für alle Methoden durchgeführt, bei

denen die Bestimmung von Polyolefinen (ausschließlich Polyolefine oder alle Kunststoffe einschließlich Polyolefine) durchgeführt wurde, ohne die Begrenzung hinsichtlich der Jahre der Veröffentlichungen.

3 Ergebnisse

Die Literaturrecherche hat verschiedene Methoden ergeben, die in zwei Untergruppen unterteilt werden können: a.) ob die Materialien in großer Menge und im Anlieferungszustand charakterisiert werden können (On-line-Methoden) oder b.) ob aus ihnen Sub-Proben zu entnehmen sind und damit nur kleinere Mengen charakterisiert werden können (Labormethoden).

3.1 On-line-Methoden

In die Gruppe der On-line-Methoden gehören die spektroskopischen Methoden (Nahinfrarot Hyperspectral Imaging (NIR-HIS), Mittelinfrarot Hyperspectral Imaging (MIR-HIS)), Dichtentrennungs-Methoden (Schwimm-Sink, Hydrozyklone, Flotation, Magnetische Dichteseperation (MDS)) und andere Methoden wie triboelektrostatische Trennung, selektive Lösung und selektive Zerkleinerungsprozesse. Die Infrarot Spektroskopie ist eine physikalische Methode zur Bestimmung von meist organischen Molekülbindungen. Die NIR (Nahinfrarot)-Spektroskopie arbeitet mit Licht mit einer Wellenlänge zwischen 800 und 2500 nm und MIR (Mittelinfrarot)-Spektroskopie 2500-25000 nm (Burns and Ciurczak, 2001). Hyperspectral Imaging (HIS) ist eine Technik, die ein breites Lichtspektrum analysiert, anstatt jedem Pixel nur Primärfarben zuzuordnen (Schneider and Feussner, 2017), in Kombination mit den spektroskopischen Methoden entstehen NIR-HIS und MIR-HIS. Bei den Dichtentrennungsmethoden werden die Kunststoffe in einem flüssigen Medium getrennt, wie z.B. Wasser, Wasser mit Aufschäummittel und magnetisierte Flüssigkeiten. Beim Hydrozyklon-Verfahren werden Kunststoffteile innerhalb eines Fliehkraftscheiders in einen Wasserwirbel gegeben (Bauer et al., 2017), und für die Flotation ist das Ziel, die selektiv hydrophoben Oberflächen mit Blasen in Kontakt zu bringen (Wang et al., 2015). Triboelektrostatische Technologien ermöglichen es, verschiedene Materialien aufgrund ihrer unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften zu trennen (Silveira et al., 2018). Die auf der Löslichkeit basierenden Verfahren umfassen Stufen, in denen eine Reihe von inkompatiblen Polymeren in einem gemeinsamen Lösungsmittel bei verschiedenen Temperaturen oder in unterschiedlichen Lösungsmitteln gelöst werden, sodass jedes Mal ein Polymer abgetrennt wird (Pappa et al., 2001). Die selektive Zerkleinerung ist ein Verfahren, das darauf beruht, Polymere nach der Zerkleinerung zu sortieren. Spezifische Partikelgrößenverteilungen charakterisieren jedes Polymer im Outputstrom, und diese Unterschiede werden genutzt, um bestimmte Polymere durch Sichtung zurückzugewinnen (Froelich and Maris, 2010). Die Vor- und Nachteile aller genannten Methoden sind in Tabelle 1 beschrieben.

Table 1 Überblick über die Vor- und Nachteile verschiedener On-line-Methoden zur Bestimmung von Polyolefine

Methoden	Vorteile	Nachteile
IR Spektroskopie		
NIR (Nahinfrarot) Hyperspectral Imaging	– schnell, kosteneffizient, gut erforscht, keine Probenvorbereitung notwendig, nicht invasiv, Fernerkennung	– Analyse von schwarzen oder dunkel gefärbten Kunststoffen limitiert, Mögliche Beschränkung durch Probendicke und Oberflächenverunreinigungen, relativ große Mindestpartikelgröße (20-50 mm)
MIR (Mittelinfrarot) Hyperspectral Imaging	– Mögliche Klassifizierung von schwarzen Kunststoffen, Fernerkennung	– wenig erforscht, begrenzte Geschwindigkeit der Spektralaufnahme, hohe Gerätkosten im Vergleich zu NIR
Dichtentrennung		
Schwimm-Sink	– hocheffizient, kostengünstig, hoher Kapazität, einfach, leicht automatisierbar, flexible in der Anwendung	– erfordert viel Platz und Zeit, für Kunststoffe mit ähnlicher Dichte nicht effizient, Umweltproblem wenn andere Medien statt Wasser verwendet werden
Hydrozyklone	– einfaches, robusten Gerät mit geringer Komplexität und hoher Kapazität	– beeinflusst durch den Zerkleinerungsschritt vor dem Sortierschritt
Flotation	– kosteneffizient, einfaches Konzept, hohe Effizienz	– Diskrepanz zwischen den Bedürfnissen der Industrie und der Publikationen, Oberflächenbehandlungen, die in vielen Fällen erforderlich sind
Magnetische Dichteseperation (MDS)	– einfache Einstellung der Flüssigkeitsdichte, keine Größenbeschränkung	– zusätzliche Kosten für die Verwendung und Wartung von Magneten und Eisenoxidpartikeln, in einige Fällen ist eine Vorbehandlung mit kochendem Wasser erforderlich
Die anderen Methoden		
Triboelektrostatische Trennung	– hohe Effizienz, niedrige Kosten, keine Bedenken hinsichtlich Umweltverschmutzung	– hohe Kontroll- und Kalibrierungsaufwand
Selektive Lösung	– Sortierung von Polymergemische ohne nennenswerte Wertminderung, Sortierung von inhomogenen Kunststoffen und auch beide Mono- und Multilayer Kunststoffe	– Verwendung von verschiedenen Chemikalien als Lösungsmittel, Ungelöste Bestandteile müssen mechanisch abgetrennt werden
Selektive Zerkleinerungsprozess	– effiziente Technologie zur Sortierung inkompatibler Kunststoffe	– die Ausbringmenge und die Reinheit werden durch die Qualität des Vorzerkleinerungsschritts stark beeinflusst

3.2 Labormethoden

Die Labormethoden lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Spektroskopie (NIR, Fouriertransformation Infrarot (FTIR), Raman, Laser-induzierte Plasmaspektroskopie (LIPS), Fluoreszenz, Kernspinresonanzspektroskopie (NMR) und thermoanalytische Methoden (Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC), Pyrolyse Gaschromatographie)

Table 2 Überblick über die Vor- und Nachteile verschiedener Labormethoden zur Bestimmung von Polyolefine

Methoden	Vorteile	Nachteile
Spektroskopie		
NIR Spektroskopie	– kosteneffizient, gut erforscht, keine Probenvorbereitung notwendig, nicht invasiv	– Analyse von schwarzen oder dunkel gefärbten Kunststoffen limitiert, in Form von Laborgeräten, nicht so schnell wie in Kombination mit Hyperspectral Imaging
FTIR Spektroskopie	– hohe Nachweisempfindlichkeit, Messungengenauigkeit, Auflösung, schnell, zerstörungsfrei, keine Beeinflussung durch Effekte unterschiedlicher Kristallinität	– FTIR-ATR ist ggü. der Kontaktfläche empfindlich, Oberflächenrauigkeit und Verunreinigungen führen zu Rauschen, nur Oberflächenmessung, zeitaufwändig
Raman Spektroskopie	– zerstörungsfrei, erkennt Schwingungsmoden, die nicht IR-aktiv sind	– geringe Empfindlichkeit, Beeinträchtigung durch Fluoreszenz, Limitierte Analyse von gefärbten Proben, zeitaufwändig
LIPS	– keine Limitierung durch gefärbte Proben, schnell, Fernerkennung, Robust, kaum/keine Probenvorbereitung	– Differenzierbar, Matrixeffekte, spektrale Interferenzen, relativ neu und noch meistens im Labor eingesetzt
Fluoreszenz-Spektroskopie	– zerstörungsfrei, kann Additive im Spurenbereich identifizieren	– den verwendeten Farbstoffen sind gefährliche toxische Stoffe, die mit großer Vorsicht handhaben sind
NMR	– schnell, nicht invasiv	– um die Signale von Proben mit kurzer Reaktionszeit zu messen braucht man zwei-NMR Systeme, sehr kleine Probengröße benötigt, auf Laborumgebung beschränkt
Thermische Analyse		
DSC	– die Möglichkeit kleine Probengrößen zu verwenden, kurze Analysezeit, Möglichkeit der automatischen Analyse, einfache Kalibrierung	– destruktive Methode
Pyrolyse-Gaschromatographie	– erlaubt die Analyse einer Probemasse <0,5 mg, effektiv, zeit- und kostensparend	– nicht für größere Mengen an heterogenen Umweltproben geeignet
Thermogravimetrie	– Möglichkeit zur quantitativen Bewertung, können relativ große und inhomogene Probenmassen analysiert werden	– sehr Messtemperatur abhängig, kleine Stichprobengröße

matographie, Thermogravimetrie). Alle Spektroskopischen Methoden beruhen auf dem Prinzip der Erfassung von Spektren elektromagnetischer Strahlung in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge oder Frequenz, die mit spektrografischen Geräten gemessen werden, um Informationen über die molekulare Struktur zu erhalten und auf dieser Grundlage Kunststoffe zu klassifizieren (The Oxford University, 2002). Andererseits bestehen die Thermoanalytische Methoden aus Messungen, bei denen die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Materialien unter kontrollierten Temperaturen bestimmt werden (Arévalo et al., 2017). Die Vor- und Nachteile der beiden genannten Methoden-Gruppen werden in Tabelle 2 beschrieben.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entscheidung, welche Bestimmungsmethoden durchgeführt werden sollen, kann eine Herausforderung sein. Daher sind Kenntnisse über Vor- und Nachteile eine signifikante Unterstützung. Die zu den Labormethoden gehörenden Verfahren sind oft zeitaufwändig und erfordern eine aufwändige Probenvorbereitung, liefern aber genauere Ergebnisse. Auf der anderen Seite können On-line-Methoden für größere Probenmengen in kürzer Zeit, aber oft mit geringerer Genauigkeit eingesetzt werden. Je nach geplanter Nutzung kann entschieden werden, welche Methode verwendet werden soll.

Danksagung

Wir danken dem österreichischen Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort, der Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung und der Christian-Doppler-Forschungsgesellschaft für die finanzielle Unterstützung. Darüber hinaus bedanken wir uns für die finanzielle und nichtfinanzielle Unterstützung unserer Unternehmenspartner Abfallbehandlung Ahrental GmbH, Altstoff-recycling Austria AG, Linz Service GmbH, OMV Downstream GmbH und Wien Energie GmbH.

Literatur/Quellen

- Arévalo, A.M.Z., Ortega, G.C.C., Lozada, W.A.V., Ariza, I.E.P., Bautista, M.M.C., Ríos, J.S.V., 2017. Conceptual approach to thermal analysis and its main applications. *Prospectiva* 15, 117–125.
- Bauer, M., Lehner, M., Schwabl, D., Flachberger, H., Kranzinger, L., Pomberger, R., Hofer, W., 2017. Bestandsaufnahme und mögliche Perspektiven der nass-mechanischen Aufbereitung von Altkunststoffen für das rohstoffliche Recycling. *Österr Wasser- und Abfallw* 69, 446–459. <https://doi.org/10.1007/s00506-017-0420-1>
- Burns, D., Ciurczak, E., 2001. *Handbook of Near-Infrared Analysis*. <https://doi.org/10.1201/9781003042204>
- Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste (Text with EEA relevance), 2018. , OJ L.
- Froelich, D., Maris, E., 2010. Sorting Mixed Polyolefins from End-of-Life Product by a Selective Grinding Process. *Waste Biomass Valor* 1, 439–450. <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9037-3>
- Pappa, G., Boukouvalas, C., Giannaris, C., Ntaras, N., Zografos, V., Magoulas, K., Lygeros, A., Tassios, D., 2001. The selective dissolution/precipitation technique for polymer recycling: a pilot unit application. *Resources, Conservation and Recycling* 34, 33–44. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00092-1)
- Plastics Europe, 2022. *Plastics – the Facts 2022*.

- Schneider, A., Feussner, H., 2017. Chapter 5 – Diagnostic Procedures, in: Schneider, A., Feussner, H. (Eds.), *Biomedical Engineering in Gastrointestinal Surgery*. Academic Press, pp. 87–220. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803230-5.00005-1>
- Signoret, C., Caro-Bretelle, A.-S., Lopez-Cuesta, J.-M., Ienny, P., Perrin, D., 2019. MIR spectral characterization of plastic to enable discrimination in an industrial recycling context: II. Specific case of polyolefins. *Waste Management* 98, 160–172. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.010>
- Silveira, A.V.M., Cella, M., Tanabe, E.H., Bertuol, D.A., 2018. Application of tribo-electrostatic separation in the recycling of plastic wastes. *Process Safety and Environmental Protection* 114, 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.019>
- The Oxford University, 2002. *The Oxford American College Dictionary*. G.P. Putnam's Sons.
- Wang, C., Wang, H., Fu, J., Liu, Y., 2015. Flotation separation of waste plastics for recycling – A review. *Waste Management* 41, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.027>
- Wang, X.-Y., Gao, Y., Tang, Y., 2023. Sustainable developments in polyolefin chemistry: Progress, challenges, and outlook. *Progress in Polymer Science* 143, 101713. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2023.101713>

Kontakt

Mag.ing.min, Hana Stipanovic, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft

Tel.-Nr. +43 677 / 64 02 13 50

E-Mail: hana.stipanovic@unileoben.ac.at

Homepage: <https://www.avaw-unileoben.at/>

Analyse der systemischen Kosten von Mehrwegsystemen unter Berücksichtigung der ökologischen Nachhaltigkeit und der Nutzer*innen-Akzeptanz

Abstract: Die Mehrwegangebotspflicht gemäß § 33 des Verpackungsgesetzes verpflichtet seit dem 01. Januar 2023 Gastronomiebetriebe in Deutschland Mehrwegverpackungen für Speisen und Getränke zum Mitnehmen als Alternative für Einwegkunststoffverpackungen anzubieten, um den Verpackungsabfall zu reduzieren und Umwelt und Ressourcen zu schonen. Das Angebot von Mehrwegverpackungen als Alternative zu Einweg ist für die Gastronomiebetriebe zunächst mit zusätzlichen Kosten verbunden, welche bei der Wahl eines geeigneten Systems berücksichtigt werden müssen. Grundsätzlich unterscheidet man hierbei zwischen Individualsystemen, Inselsystemen, Verbundsystemen und Poolsystemen, die sich überwiegend hinsichtlich der Organisationsstruktur, der Investitions- und laufenden Kosten für die Gastronomiebetriebe, der Rücknahmesystematik und Logistik voneinander abgrenzen. Mehrwegsysteme werden bisher jedoch nicht als Business-Case mit einem potenziellen ökonomischen Vorteil verstanden, die Kostentreiber und Kosteneinsparungspotenziale für die Gastronomiebetriebe sind nicht bekannt. Fehlende Kooperationen und eine damit einhergehende Anbietervielfalt (Inselsysteme statt Verbund- oder Poolssysteme) verursachen zusätzlich höhere Kosten für die Nutzer*innen und senken damit die Akzeptanz von Mehrwegsystemen. Ziel dieser Dissertation ist daher die Analyse der systemischen Kosten von Mehrwegsystemen unter Berücksichtigung der ökologischen Nachhaltigkeit und der Nutzer*innen-Akzeptanz. Es soll weiterhin untersucht werden, welchen Einfluss regionale Kooperationen (bspw. zwischen Gastronomiebetrieben, Logistikunternehmen, Spüldienstleistern) in einer Mehrweg Modell Region auf die Wirtschaftlichkeit und Effizienz von Mehrwegsystemen haben.

1 Einleitung

Der Verpackungsabfall pro Kopf lag in Deutschland im Jahr 2020 bei ca. 226 kg, der Anteil von Verpackungen aus Kunststoff lag dabei bei rund 17 %. 60 % der angefallenen Kunststoffverpackungsabfälle wurden stofflich verwertet und 40 % wurden einer energetischen Verwertung zugeführt (vgl. Burger, Cayé, & Schüler, 2022). Die im Kreislaufwirtschaftsgesetz geregelte Abfallhierarchie besagt jedoch, dass der Abfallvermeidung die höchste Priorität zugeschrieben werden muss. Eine Maßnahme, um die Abfallvermeidung zu stärken, ist die Verwendung von Mehrwegverpackungen. Dadurch können Abfall vermieden, die Neukunststoffproduktion reduziert und Treibhausgasemissionen reduziert werden. Seit dem 1. Januar 2023 gilt in Deutschland daher

die sogenannte Mehrwegangebotspflicht. Diese verpflichtet Gastronomiebetriebe, Mehrwegverpackungen als Alternative für Einwegkunststofflebensmittelverpackungen und Einweggetränkebecher im Take-away anzubieten. Hiervon ausgenommen sind Betriebe, die weniger als fünf Beschäftigte haben und deren Verkaufsfläche kleiner als 80 m² ist. Speisen und Getränke in einer Mehrwegverpackung dürfen nicht zu schlechteren Bedingungen oder einem höheren Preis angeboten werden. Die Rücknahmepflicht für die Betriebe beschränkt sich ausschließlich auf die Mehrwegverpackungen, die sie selbst in Umlauf gebracht haben. Durch die Einführung der Mehrwegangebotspflicht sollen das Verpackungsmüllaufkommen reduziert und Ressourcen geschont werden.

Auf dem deutschen Markt existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Mehrwegsystemanbieter, die in unterschiedlichen Systemvarianten Mehrwegverpackungen für die Take-away-Gastronomie anbieten. Diese unterscheiden sich überwiegend hinsichtlich der Organisationsstruktur, der Logistik und der Rücknahmesystematik sowie hinsichtlich der Investitions- und der laufenden Kosten für die Gastronomiebetriebe. Die Auswahl eines geeigneten Systems stellt viele Betriebe vor eine Herausforderung. Darüber hinaus werden Mehrwegsysteme bisher kaum als Business-Case mit einem potenziellen ökonomischen Vorteil für die Gastronomiebetriebe verstanden. Vielmehr führt die aktuell angespannte Situation für Gastronomiebetriebe (Coronakrise, Erhöhung der Mehrwertsteuer, gestiegene Preise für Lebensmittel) zu einer Investitionszurückhaltung und einer geringen Akzeptanz bezüglich der Einführung eines Mehrwegsystems. Ein Test der Deutschen Umwelthilfe im Juni 2023, sechs Monate nach dem Inkrafttreten der Mehrwegangebotspflicht, zeigte, dass fast zwei Drittel der dabei getesteten Gastronomiebetriebe gegen die Vorgaben der Mehrwegangebotspflicht verstoßen und nur unzureichend oder in einigen Fällen gar keine Mehrwegalternative zu Einwegkunststoffverpackungen anboten (vgl. Deutsche Umwelthilfe, 2023). Die hohe Anbietervielfalt und geringe Kooperationen der Gastronomiebetriebe untereinander (Inselsysteme statt Verbund- oder Poolsysteme) verursachen darüber hinaus vermeidbare Kosten sowohl bei den Gastronomiebetrieben als auch bei den Nutzer*innen und senken folglich weiterhin die Akzeptanz für Mehrweg.

Das Ziel dieser Dissertation ist eine eingehende Analyse der systemischen Kosten von Mehrwegsystemen und eine Untersuchung deren Einflussfaktoren, um u. a. die Fragen zu beantworten, welche betriebswirtschaftlichen Optimierungspotenziale in Mehrwegsystemen bestehen, wer die Kosten eines Mehrwegsystems trägt und wie diese umgelegt werden können. Besondere Bedeutung erhält hierbei die sinnvolle Lokalisierung und gemeinschaftliche Nutzung der Spülinfrastruktur sowie die technischen Potenziale von Rücknahmesystemen (eigene Rücknahmesysteme oder mögliche Kooperationen mit dem Getränkehandel). Ökonomische sowie auch ökologische Aspekte werden berücksichtigt. Kostentreiber und Kosteneinsparungspotenziale werden identifiziert und fundierte Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Mehrwegsystemen für Betreiber, Gastronomiebetriebe, politische Entscheidungsträger und weitere Stakeholder formuliert. Der Fokus liegt auf der Entwicklung praxisorientierter Lösungsansätze, die eine effiziente, kostengünstige und nachhaltige Nutzung von Mehrwegsystemen ermöglichen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden nicht isoliert betrachtet, Skalierbarkeit und Übertragbarkeit auf unterschiedliche regionale Gegebenheiten sowie die Flexibilität, um sich Veränderungen anpassen zu können, spielen hierbei eine wichtige Rolle. Weiterhin wird betrachtet, in welchen Räumen Mehrwegsysteme eingesetzt werden und wie diese sinnvoll vernetzt werden können (Mehrweg-Modell-Stadt, Mehrweg-Modell-Region).

2 Methodik

2.1 Analyse der systemischen Kosten

Mehrwegsysteme finden Anwendung in vielen Bereichen, insbesondere in der Logistik (Transportverpackungen), in der Getränkeindustrie sowie in der Take-away-Gastronomie. Diese Dissertation stellt den Mehrweg-Anwendungsbereich in der Take-away-Gastronomie in den Fokus.

Zur Analyse der systemischen Kosten eines Mehrwegsystems wird ein Mehrwegkreislaufmodell entwickelt. Abbildung 1 stellt diesen in vereinfachter Form dar. Auf die Produktion der Mehrwegverpackung folgt der Vertrieb über den Großhandel (Insel- oder Verbundsystem) oder einen Mehrwegsystemanbieter (Poolsystem). In den Gastronomiebetrieben werden die Mehrwegverpackungen befüllt und an die Nutzer*innen ausgegeben. Nach der Nutzung werden diese zurückgegeben, gereinigt und anschließend wieder befüllt und ausgegeben. Am Ende ihres Lebenszyklus werden die Mehrwegverpackungen entsorgt und recycelt (closed-loop, open-loop).

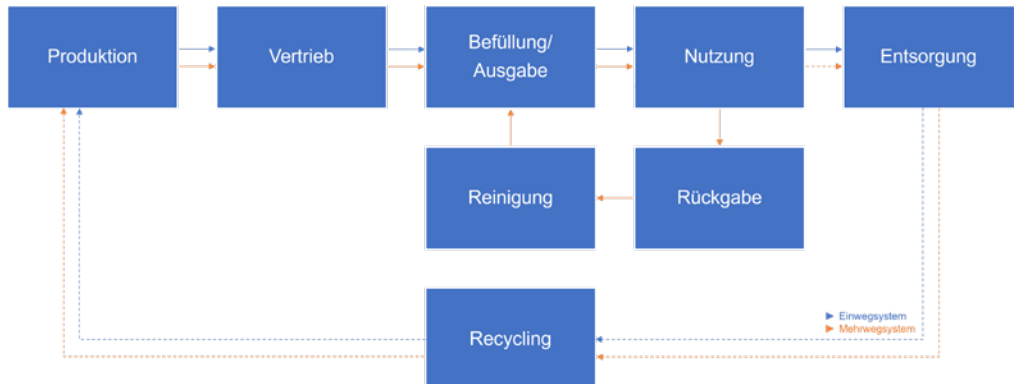


Abbildung 1: vereinfachtes Mehrwegkreislaufmodell (Quelle: eigene Darstellung)

Beteiligte Akteure in einem Mehrwegkreislauf sind:

- Produzenten,
- Großhandel,
- Systemanbieter,
- Gastronomie,
- Entsorgungsunternehmen,
- Reinigungsdienstleister,
- Logistikunternehmen,
- Recyclingunternehmen,
- Nutzer*innen sowie
- weitere Unternehmen, bspw. NGOs.

Basierend auf dem Modell des Mehrwegkreislaufs wird ein Stoffstromkostenmodell entwickelt, anhand dessen die Kreislaufkosten eines Mehrwegsystems modelliert und analysiert werden. Dies ermöglicht, die finanziellen Aufwendungen entlang des Kreislaufs zu quantifizieren und zu verstehen. Kostentreiber, Variablen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtkosten haben, und Kosteneinsparungspotenziale können identifiziert und so gezielt Maßnahmen entwickelt werden, um die Kosten zu optimieren. Anhand des Modells wird die Frage beantwortet, wer die Kosten innerhalb des Mehrwegkreislaufs trägt und wie diese umgelegt werden können, um eine hohe Akzeptanz für die Nutzung von Mehrweg seitens aller beteiligten Akteure zu erreichen.

Des Weiteren wird der Einfluss technischer Innovationen bspw. im Bereich der Rückgabefrastruktur oder der Reinigung untersucht. Hierunter fallen u. a. die Implementierung effizienterer Reinigungstechnologien oder automatisierte Rücknahmesysteme. Mit dieser Analyse wird die Bewertung dieser technologischen Innovationen und ihrer Auswirkungen auf die Gesamtkosten des Mehrwegsystems ermöglicht. Das Stoffstromkostenmodell bietet eine fundierte Grundlage für die ökonomische Bewertung von Mehrwegsystemen und ermöglicht eine präzise Analyse der Kostenstruktur sowie die Identifikation von betriebswirtschaftlichen Optimierungspotenzialen.

2.2 Klassifizierung von Mehrwegsystemen

Um die Stoffstromkosten von Mehrwegsystem zu analysieren, müssen diese zunächst klassifiziert und definiert werden. Ein mögliches Kriterium zur Klassifizierung von Mehrwegsystemen ist die Organisationsstruktur. Man unterscheidet hierbei grundsätzlich zwischen Individualsystemen, Inselsystemen, Verbundsystemen und Poolssystemen (vgl. Kleinhüchelkötten, Behrendt, & Neitzke, 2022):

- Individualsystem: Die Nutzer*innen bringen ihre eigenen Mehrwegverpackungen mit, diese werden in den Gastronomiebetrieben befüllt. Die Anschaffungskosten der Mehrwegverpackung sowie die Kosten für die Reinigung liegen bei den Nutzer*innen. Für die Gastronomiebetriebe entstehen keine direkten Kosten. Die Rückgabe der Mehrwegverpackung entfällt.
- Inselsystem: Ein Gastronomiebetrieb kauft eigene Mehrwegverpackungen. Die Mehrwegverpackungen werden meist gegen die Zahlung eines Pfandbetrags an die Nutzer*innen ausgegeben. Die Rückgabe erfolgt in dem ausgebenden Betrieb, der Pfandbetrag wird bei Rückgabe erstattet. Die Anschaffungskosten und die Kosten für die Reinigung der Verpackungen liegt beim Gastronomiebetrieb.
- Verbundsystem: Mehrere Gastronomiebetriebe schließen sich zu einem Verbundsystem zusammen und kaufen gemeinsam Mehrwegverpackungen. Die Mehrwegverpackungen werden meist gegen die Zahlung eines Pfandbetrags an die Nutzer*innen ausgegeben. Die Rückgabe erfolgt in einem der teilnehmenden Betriebe, der Pfandbetrag wird bei Rückgabe erstattet. Die Anschaffungskosten sowie die Kosten für die Reinigung der Verpackungen werden anteilig auf die teilnehmenden Betriebe verteilt.
- Poolsystem: Ein Gastronomiebetrieb schließt sich einem Poolsystembetreiber an. Die Mehrwegverpackungen werden von dem Betreiber gestellt, der Gastronomiebetrieb erhält Unterstützung bei der Organisation. Die Mehrwegverpackungen werden meist gegen die Zahlung eines Pfandbetrags oder die Herausgabe persönlicher Daten (elektronische Verknüpfung mit der Mehrwegverpackung) ausgegeben. Die Rückgabe kann in jedem Gastronomiebetrieb erfolgen, der sich dem Poolsystem angeschlossen hat. Die Anschaffungskosten für die Mehrwegverpackungen liegen beim Poolsystemanbieter, die Kosten für die Reinigung entstehen in den Gastronomiebetriebe-

etrieben. Möglich ist auch eine Reinigung in einem externen Spüldienstleister. Die teilnehmenden Gastronomiebetriebe zahlen einen Systembeitrag, möglich sind ein Beitrag pro Nutzung oder ein monatlicher Beitrag.

Weiterhin können Mehrwegsysteme räumlich klassifiziert werden. Als Unterscheidungskriterium dient hierbei der Ort/Kontext, in dem die Mehrwegsysteme eingesetzt werden:

- Events/Veranstaltungen: Hierbei handelt es sich um einen geografisch und temporär begrenzten Einsatz von Mehrwegsystemen. Man unterscheidet zwischen geschlossenen Veranstaltungen (Konzerte, Sportereignisse mit Ticketverkauf und Einlasskontrollen) und offenen Veranstaltungen (bspw. Rheinland-Pfalz-Tag mit Laufpublikum).
- Städte/Kommunen: Der Einsatz des Mehrwegsystems ist räumlich auf eine Stadt oder eine Kommune begrenzt. Gastronomiebetriebe kooperieren mit lokal ansässigen Logistikunternehmen und Spüldienstleistern.
- Regional: Das Mehrwegsystem kommt in größeren geografischen Regionen (Bundesländern) zum Einsatz. Eine effiziente Logistik für den Transport/Reinigung der Mehrwegverpackung zwischen den Standorten ist Voraussetzung.
- National: Ein umfassender Einsatz eines Mehrwegsystems auf nationaler Ebene. Es gibt einheitliche Standards und Infrastrukturen für die Rückgabe/Reinigung von Mehrwegverpackungen.

Im Rahmen dieser Dissertation wird untersucht, in welchen Räumen ein Einsatz von Mehrwegsystemen sinnvoll ist, wie dieser gestaltet werden kann und wo eine Vernetzung zwischen diesen Räumen (Mehrweg-Modell-Stadt, Mehrweg-Modell-Region) sinnvoll sein kann, um Synergieeffekte zu nutzen und die Kosten gering zu halten.

Literatur/Quellen

- Burger, A., Cayé, N., & Schüller, K. (2022). Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2020. Mainz: Umweltbundesamt. Abgerufen am 15. Dezember 2023 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-09-29_texte_109-2022_aufkommen-verwertung-verpackungsabfaelle-2020-d.pdf
- Deutsche Umwelthilfe. (5. Juli 2023). Mehrwegpflicht in der Gastronomie nach sechs Monaten katastrophal umgesetzt: Deutsche Umwelthilfe geht rechtlich gegen Backwerk, Dunkin Donuts, Cineplex und Co. vor. Abgerufen am 15. Dezember 2023 von <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/mehrwegpflicht-in-der-gastronomie-nach-sechs-monaten-katastrophal-umgesetzt-deutsche-umwelthilfe-ge/>
- Kleinhüchelkotten, S., Behrendt, D., & Neitzke, H.-P. (Juli 2022). Mehrweg in der Takeaway-Gastronomie - Grundlagen und Erfahrungen aus dem Projekt ‚Klimaschutz is(s)t Mehrweg‘. (ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung, Hrsg.) Abgerufen am 5. Januar 2024 von https://esseninmehrweg.de/wp-content/uploads/2022/09/Studie_Mehrweg-Takeaway-Gastronomie_2022.pdf

Klara Theobald

Kontakt

Klara Theobald, M.A., wissenschaftliche Mitarbeiterin

Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld

Tel.-Nr.: +49 6782 17-1524

E-Mail: k.theobald@umwelt-campus.de

Homepage: <https://www.umwelt-campus.de/>

Ansätze zur Materialcharakterisierung und -quantifizierung infektiöser Krankenhausabfälle durch bildgebende Verfahren

Abstract: Die weltweite Gesundheitsversorgung ist für etwa 4,4 % der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich, wobei der zunehmende Einsatz von Einwegprodukten seit den 1970er Jahren einen erheblichen Beitrag dazu leistet. Die COVID-19-Pandemie hat diesen Trend weiter beschleunigt. Etwa 90 % der entsorgten Medizinprodukte sind Einwegprodukte, von denen etwa 70 % aus Kunststoffen bestehen. Die mangelnde stoffliche Verwertung dieser Einwegprodukte trägt erheblich zu den hohen CO₂-Emissionen des Gesundheitswesens bei. Um die hochwertige Verwertung von Abfällen aus dem medizinisch-pflegerischen Bereich substantiell zu verbessern, sind im Vergleich zum derzeitigen Stand deutlich verbesserte Kenntnisse über die spezifischen Abfallmengen und ihrer (materialspezifischen) Zusammensetzung erforderlich. Die hier vorgestellte Forschungsarbeit konzentriert sich darauf, die bildgebenden Verfahren Computertomographie (CT) und Radiographie zur Materialcharakterisierung und -quantifizierung von Krankenhausabfällen zu analysieren und zu bewerten. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf infektiösen Krankenhausabfällen, die etwa 3 % der in Deutschland anfallenden Abfälle aus dem Gesundheitswesen (Abfallschlüssel 180103*) ausmachen. Die so gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, innovative und klimafreundliche Verwertungslösungen zu entwickeln. Im Rahmen der Auswertung des CT-Datensatzes eines modellhaft gepackten Abfallbehälters war es möglich, verschiedene Materialgruppen segmentiert darzustellen sowie erste Strategien für eine medizinabfallbezogene Kalibrierung von CT-Geräten zu entwickeln. Diese Arbeiten verfolgen das Ziel, Abfallbehälter mit unbekanntem Inhalt hinsichtlich der Materialzusammensetzung und einzelner Materialmassen untersuchen zu können. Bei der Auswertung der vom selben Abfallbehälter erzeugten Röntgenbilder war zwar eine klare Unterscheidung zwischen Kunststoffen und Metallen möglich, jedoch erweist sich eine feingliedrigere Materialcharakterisierung innerhalb der beiden Materialkategorien als schwer umsetzbar.

1 Einleitung

Das weltweite Gesundheitswesen trägt zu etwa 4,4 % der globalen CO₂-Emissionen bei (Karlner et al. 2019). Mit ein Grund für diese Situation ist die seit den 1970er Jahren (Rizan et al. 2020; Lee et al. 2002) bis in die Gegenwart rasant ansteigende Nutzung medizinischer Einwegprodukte (Siu et al. 2017; Ibbotson et al. 2013), die sich im Zuge der COVID-19-Pandemie noch einmal sprunghaft erhöht hat (Abu-

Qdais et al. 2020; Hanedar et al. 2022). Mittlerweile sind etwa 90 % aller entsorgten Medizinprodukte den Einwegprodukten zuzuordnen (Sousa et al. 2021), die in Ländern wie beispielsweise Deutschland etwa zu 70 % aus Kunststoffen oder anderen Polymeren bestehen. Diese Entwicklung erweist sich als problematisch, da bisher keine umfassende stoffliche Verwertung von medizinischen Einmalprodukten praktiziert wird. Stattdessen findet eine thermische Verwertung statt, die klimawirksam ist. Um dem entgegenzuwirken und dabei eine weitgehend klimaneutrale, hochwertige stoffliche Verwertung für medizinische Einmalgebrauchsprodukte mit hohem Kunststoffanteil in Deutschland zu ermöglichen, ist ein umfassendes Verständnis der Mengen und Eigenschaften beziehungsweise der (materialspezifischen) Zusammensetzung der großen, zu entsorgenden Abfallmengen aus dem Gesundheitswesen erforderlich (Diaz et al. 2008). Um dies zu erreichen, wird das Ziel verfolgt, die beiden bildgebenden Verfahren CT und Radiographie zu analysieren und zu bewerten, um Krankenhausabfälle hinsichtlich ihrer Materialzusammensetzung sowie ihrer -quantität zu untersuchen. Dabei dient die Gruppe der infektiösen Krankenhausabfälle (Abfallschlüssel 18 01 03*), die etwa 3 % des Mülls aus Krankenhäusern gemäß § 6 des Infektionsschutzgesetzes ausmachen (Statistisches Bundesamt Deutschland 2021), und stellvertretend hierfür ein modellhaft mit medizinischen Einwegprodukten befüllter Abfallbehälter (50 l Füllvolumen) als Untersuchungsgegenstand. Zum einen stellt gerade der Umgang mit (potenziell) infektiösem Abfall eine besondere Herausforderung im Hinblick auf die (Arbeits-)Sicherheit dar. Zum anderen sind auch etwa bis zu 90% der infektiösen Abfallmenge aus Krankenhäusern Einmalgebrauchsprodukte (Siu et al. 2017). Darüber hinaus bieten sich die speziellen Abfallbehältnisse der infektiösen Abfälle gut dafür an, praktische Versuche mit den beiden bildgebenden Verfahren CT und Radiographie durchzuführen. Die gewonnenen Erkenntnisse über den Einsatz bildgebender Verfahren zur Materialcharakterisierung und Quantifizierung am Beispiel der infektiösen Abfälle aus dem Gesundheitswesen sollen damit grundlegende Ansätze zur Erfassung der gesamtdeutschen Abfallmengen aus dem Gesundheitswesen und deren materialspezifischer Zusammensetzung bereitstellen.

2 Methodik

Das Untersuchungsobjekt ist ein standardisierter 50-L-Einweg-Abfallbehälter mit Gefahrgut-/UN-Zulassung des Herstellers Mauer aus Polypropylen mit einer Masse (einschließlich Deckel) von 1,41 kg (leer). Er wurde mit ausgewählten Einwegprodukten wie z.B. Abdecktücher, Tupfer und Binden aus Zellstoff, Schalen und OP-Kittel aus Polypropylen, Handschuhe aus Neopren, Latex und Polycarbonat/Polybutylenterephthalat, verschiedene Verpackungen aus Polyethylen und Polyethylenterephthalat, aber auch Einweginstrumente wie Skalpelle, Lanzetten und Scheren aus Stahl und anderen typischen Abfällen aus dem Gesundheitswesen aus Chrom-Cobalt-Legierungen, Titanlegierungen und Stahl (u. a. Endoprothesen aus Chrom-Cobalt-Legierungen und Stahl) sowie Metall- und Kunststoff-Fehlwürfen mit einer Gesamtmasse von 5,386 kg befüllt. Dabei liegt der Massenanteil der Fehlwürfe bei 10,92 %.

Im Rahmen der hier vorgestellten Forschungsarbeit wurde der Modell-Abfallbehälter einer Röntgenuntersuchung unter anderem mit dem Röntgenprüfsystem HI-SCAN 7555aTiX der Firma Smiths Detection Germany GmbH unterzogen, welches zeitgleich zwei Röntgenaufnahmen vom Untersuchungsobjekt erstellen kann (siehe Abbildung 1) (Smiths Detection 2020). Dabei handelt es sich um ein Röntgengerät, das speziell für die Anwendung in der Gepäckkontrolle in Bereichen mit erhöhtem Sicherheitsbedarf (z.B. Flughäfen) entwickelt wurde und die Untersuchungsobjekte (bzw. die erzeugten Grauwerte) standardmäßig in der sogenannten HI-MAT+-Farbbild-Darstellungsweise, je nach Dichte beziehungsweise effektivem Atomgewicht

beziehungsweise effektiver Ordnungszahl Z_{eff} der beteiligten chemischen Elemente in den drei Farben orange, grün und blau einfärbt. Des Weiteren wurde der Modell-Abfallbehälter in einem ZEISS Metrotom 1500 Computertomographen gescannt (Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH 2023). Im Anschluss daran wurde der erzeugte CT-Datensatz mit einer Software von Volume Graphics ausgewertet und analysiert (siehe Abbildung 2) (Volume Graphics 2023).

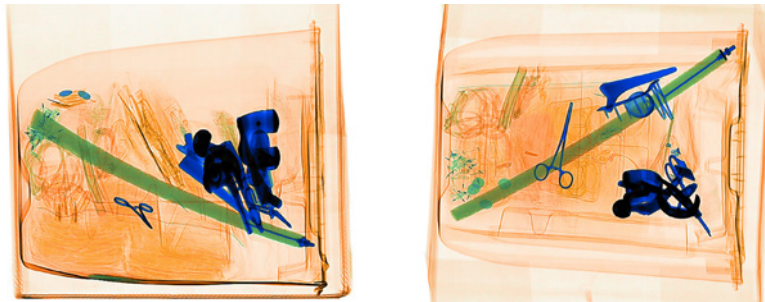


Abbildung 1: Radiographie des Modellbehälters (links: Frontansicht, rechts: Seitenansicht)



Abbildung 2: CT-Scan Ergebnis, Quelle: Zeiss

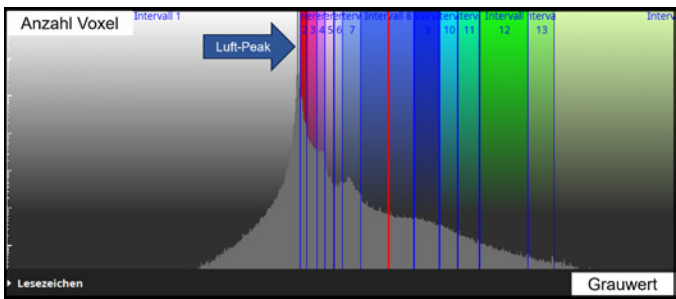


Abbildung 3: Symbolisch definierte materialspezifische Grauwertintervalle für diverse Materialien im Rahmen einer beispielhaften Kalibrierung (eigene Darstellung, erstellt mit der Software myVGL von Volume Graphics)

3 Ergebnisse

3.1 Radiographie

Bei der Radiographie („Röntgen“) werden Röntgenstrahlen (sehr energiereiche elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von etwa 10-14 bis 10-8 m) genutzt, die beim Durchtritt durch Materialien dichteabhängig abgeschwächt werden (Schwächungseffekt) (Mahnken und Günther 2013). Da der Untersuchungsgegenstand hierbei nur aus einer Richtung bestrahlt wird, können nur 2D-Bilder erzeugt werden. Überlappende Untersuchungsobjekte werden deshalb auch übereinander liegend abgebildet (Mahnken und Günther 2013), was oftmals eine sichere Aussage über die Geometrie und Positionierung der Objekte erschwert. Alle nichtmetallischen Materialien erscheinen im Röntgenbild orange (siehe Abbildung 1). Zudem ist es schwierig, einzelne Artikel aus Kunststoff im Röntgenbild klar zu erkennen, da die Produktgrenzen verschwimmen.

Hingegen fällt die Unterscheidung zwischen den Materialkategorien Kunststoffe (orange) und Metalle/Legierungen (grün = mittelschwere Elemente, z.B. Leichtmetalle wie Magnesium; blau = schwere Elemente, z.B. Eisen) sehr leicht. Innerhalb der jeweiligen Materialkategorien ist eine weitere Charakterisierung jedoch schwierig umsetzbar. Titanlegierungen werden grün oder blau dargestellt. Eine Möglichkeit zur Quantifizierung hinsichtlich einer Volumen- oder gar Massenbestimmung konnte nicht abgeleitet werden.

3.2 Computertomographie

Die Computertomographie-Bildgebung (CT) funktioniert physikalisch gesehen nach dem gleichen Prinzip wie die Radiographie, allerdings erfolgt beim CT die Durchstrahlung rotierend um den Untersuchungsgegenstand. So kann das CT-Gerät auf Basis der detektierten, abgeschwächten Strahlung ein 3D-Modell des Untersuchungsgegenstands generieren. Jedem Volumenelement (1 Voxel = 0,44mm x 0,44mm x 0,44mm) wird hierbei ein eigener Dichtewert in Form eines Grauwerts zugeordnet. Unterschiedlich dichte Strukturen werden so in unterschiedlichen Grautönen dargestellt (Dössel 2016; Kalender 2006; Alkadhi et al. 2011). Im Zuge der Auswertung konnte eine erste Strategie entwickelt werden, wie mit Hilfe des Modell-Abfallbehälters eine medizinabfallbezogene Kalibrierung des CT-Geräts möglich ist (*kontextuelle Materialspezifität*). Diese Kalibrierung, im Rahmen derer die Definition von materialspezifischen Grauwertintervallen (im zugehörigen Histogramm beispielhaft zur besseren Darstellung farblich eingefärbt, *siehe Abbildung 3*) durchgeführt wurde, ermöglicht bei Abfallbehältern unbekanntem Inhalt aus dem Gesundheitswesen Aussagen über die enthaltenen Materialien. Da die Auswertungssoftware für jedes materialspezifische Grauwertintervall auch eine Volumeninformation (als Voxelanzahl oder in [mm³]) bereitstellt (siehe Abbildung 3, vertikale Achse), wäre es zudem möglich, für jedes materialspezifische Grauwertintervall, sprich für jedes Material beziehungsweise jede definierte Materialgruppe, eine Masseninformation zu ermitteln und auszugeben (Volume Graphics 2023).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass sich die Radiographie für die reine Überprüfung, ob metallische Materialien in einem Abfallbehälter vorhanden sind, gut eignet. Für eine feingliedrigere Materialcharakterisierung sowie für eine annäherungsweise Materialquantifizierung ist zwingend eine CT-Untersuchung notwendig.

Es ist geplant, den hier skizzierten analytischen Ansatz im Rahmen des durch das BMWK geförderten Vorhabens „Medizinische Einmalgebrauchsprodukte in der Kreislaufwirtschaft – Wege von der Beseitigung zur stofflichen Verwertung (Akronym „MEiK“)“ mit den Projektpartnern aus Industrie und Gesundheitswirtschaft weiter auszuarbeiten und konkret anzuwenden.

5 Danksagung

Besonderer Dank gilt der Firma Smiths Detection Germany GmbH aus Wiesbaden, welche die Radiographie-Untersuchung des Modell-Abfallbehälters vor Ort möglich machte.

Literatur/Quellen

- Abu-Qdais, H. A.; Al-Ghazo, M. A.; Alghazo, E. M. (2020): Statistical analysis and characteristics of hospital medical waste under novel Coronavirus outbreak. In: *Global Journal of Environmental Science and Management (GJESM)* (6), S. 21–30. Online verfügbar unter <https://www.gjesm.net/>, zuletzt geprüft am 08.10.2023.
- Alkadhi, Hatem; Leschka, Sebastian; Stolzmann, Paul; Scheffel, Hans (2011): *Wie funktioniert CT? Eine Einführung in Physik, Funktionsweise und klinische Anwendungen der Computertomographie*: Springer Medizin.
- Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH (2023): ZEISS METROTOM. Technische Daten.
- Diaz, L. F.; Eggerth, L. L.; Enkhtsetseg, Sh; Savage, G. M. (2008): Characteristics of healthcare wastes. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 28 (7), S. 1219–1226. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.04.010.
- Dössel, Olaf (2016): *Bildgebende Verfahren in der Medizin. Von der Technik zur medizinischen Anwendung*. 2. Aufl.
- Hanedar, Asude; Çifçi, Deniz İzlen; Zafer, Nur; Görgün, Erdem (2022): The impact of COVID-19 pandemic in medical waste amounts: a case study from a high-populated city of Turkey. In: *Journal of material cycles and waste management* 24 (5), S. 1760–1767. DOI: 10.1007/s10163-022-01428-3.
- Ibbotson, Suphunnika; Dettmer, Tina; Kara, Sami; Herrmann, Christoph (2013): Eco-efficiency of disposable and reusable surgical instruments—a scissors case. In: *Int J Life Cycle Assess* 18 (5), S. 1137–1148. DOI: 10.1007/s11367-013-0547-7.
- Kalender, Willi A. (2006): *Computertomographie. Grundlagen, Gerätetechnologie, Bildqualität, Anwendungen*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage 2006: Publicis Corporate Publishing, Erlangen.
- Karliner, J.; Slotterback, S.; Boyd, R.; Ashby, B.; Steele, K.; Wang, J. (2019): Health care's climate footprint: the health sector contribution and opportunities for action. In: *16th World Congress on Public Health*. Online verfügbar unter https://academic.oup.com/eurpub/article/30/Supplement_5/ckaa165.843/5914601, zuletzt geprüft am 18.09.2023.
- Lee; Ellenbecker; Moure-Eraso (2002): Analyses of the recycling potential of medical plastic wastes. In: *Waste Management* (22), S. 461–470. Online verfügbar unter https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X02000065?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8098db9ae8022c0a, zuletzt geprüft am 19.09.2023.
- Mahnken, Andreas; Günther, Rolf (2013): *Skript Radiologie. Grundlagen der Diagnostik und Intervention*, Philipps Universität Marburg.
- Rizan, Chantelle; Mortimer, Frances; Stancliffe, Rachel; Bhutta, Mahmood F. (2020): Plastics in health-care: time for a re-evaluation. In: *Journal of the Royal Society of Medicine* 113 (2), S. 49–53. DOI: 10.1177/0141076819890554.
- Siu, Joey; Hill, Andrew G.; MacCormick, Andrew D. (2017): Systematic review of reusable versus disposable laparoscopic instruments: costs and safety. In: *ANZ journal of surgery* 87 (1-2), S. 28–33. DOI: 10.1111/ans.13856.
- Smiths Detection (2020): HI-Scan 7555aTiX. Technische Informationen.
- Sousa, Ana Catarina; Veiga, Anabela; Maurício, Ana Collete; Lopes, Maria Ascensão; Santos, José Domingos; Neto, Belmira (2021): Assessment of the environmental impacts of medical devices: a review. In: *Environ Dev Sustain* 23 (7), S. 9641–9666. DOI: 10.1007/s10668-020-01086-1.
- Statistisches Bundesamt Deutschland (2021): *Datenabruf: Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre (2021), Abfallarten*. GENESIS Online Datenbank. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/ge>

Anton Vielsack, Jörg Woidasky

nesis/online?operation=ergebnistabelleUmfang&levelindex=2&levelid=1702652803980&downloadname=32111-0002#abreadcrumb, zuletzt geprüft am 15.12.2023.

Volume Graphics (2023): VGSTUDIO MAX. Software für industrielle CT. Online verfügbar unter <https://www.volumegraphics.com/de/produkte/vgsm.html>, zuletzt geprüft am 26.10.2023.

Kontakt

Anton Vielsack

Hochschule Pforzheim

Tel.-Nr.: 0151 4128 5053

E-Mail: vielsack@hs-pforzheim.de

Charakterisierung von Strohpellets zur Biogaserzeugung

1 Einleitung

Getreidestroh fällt als Reststoff bei der Getreideerzeugung an und bietet ein großes Potenzial für die Biogaserzeugung. In der Vergangenheit gab es bereits verschiedene Ansätze, Stroh nach einer Vorbehandlung zum Aufschluss der Lignocellulosestruktur wie Mahlen, Aufschluss per Extruder, Hydrolyse oder Schneidpumpe in Biogasanlagen energetisch zu nutzen (Andersen et al, 2022; Fjørtoft et al, 2019; Reuters et al, 2013; Victorin et al, 2019). Eine breite Anwendung konnte sich bisher nicht durchsetzen, da der erzielte Mehrertrag den Mehraufwand der Vorbehandlung oft nicht trägt (Reinhold, 2014). Eine Alternative stellt die Verwendung von pelletiertem Stroh dar. Obwohl die Pelletierung von Stroh zunächst einen größeren energetischen Aufwand darstellt, bietet diese aber auch Vorteile gegenüber den bisherigen Ansätzen zur Nutzung von Stroh in Biogasanlagen. Im Rahmen des Verbundvorhabens „StroPelGas – Nachhaltiger Einsatz von Strohpellets zur Biogaserzeugung“ lag der Fokus im Arbeitspaket „Charakterisierung von Strohpellets“ auf der Bewertung der Eignung von Strohpellets für den Einsatz in Biogasanlagen. Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt 11 Pelletproben aus stationärer, teilmobiler und mobiler Herstellung untersucht. Dabei waren neun Proben aus Weizenstroh und jeweils eine aus Roggen- und Gerstenstroh. Bei sechs Pelletproben wurde das Stroh, aus denen die Pellets hergestellt wurden, ebenfalls analysiert. Neben der chemisch-physikalischen Charakterisierung wurde auch das Biogas- und Methanbildungspotenzial bestimmt. Zusätzlich wurden aus einer Weizenstrohprobe zwei unterschiedliche Pellets im eigenen Technikum gepresst und analysiert.

2 Methodik

Um eine Aussage darüber treffen zu können, ob pelletiertes Stroh als Co-Substrat für die Vergärung in der anaeroben Vergärung geeignet ist, wurden verschiedene Analysen durchgeführt. Parameter wie die Trockensubstanz (TS), der organische Anteil (oTS), Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis und Nährstoffgehalt sind wichtig für eine optimale anaerobe Vergärung. Darüber hinaus wurden auch Untersuchungen, wie das Auflöseverhalten, die Schüttdichte, die Partikelgrößenverteilung sowie die Form und Beschaffenheit der Pellets durchgeführt.

2.1 Methoden zur physikalisch-chemischen Charakterisierung von Stroh und Strohpellets

Die Beschreibung der Pelletform erfolgte anhand von Durchmesser und Länge der Pellets. Diese Werte wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 17829 bestimmt. Außerdem wurden das Aussehen, die Farbe, die Textur und die Struktur der Pellets beschrieben. Die Bestimmung der Trockensubstanz (TS) und der organischen Trockensubstanz (oTS) erfolgte nach DIN EN 12880:2001-02 und nach DIN EN ISO 12879:2001-02. Die Schüttdichte ist eine wichtige Lagergröße und wurde nach DIN 51705:2001-06 bestimmt. Das Auflöseverhalten von Pellets in Wasser sowie die Bildung von Sink- und Schwimmschichten wurden anhand einer an der HAWK entwickelten Versuchsanweisung betrachtet. Dazu wurden ein Glasgefäß mit 2200 ml Wasser

(20°C) befüllt und anschließend 100 g Strohpelletprobe dazu gegeben. Direkt nach Zugabe der Pellets (Zeitpunkt 0) wurde ein Foto gemacht. Die Auflösung und Verteilung der Strohpellets wurde nach 60, 120, 180 und 240 Minuten durch ein weiteres Foto dokumentiert. Die Partikelgrößenverteilung der Strohpartikel in den untersuchten Pellets wurde durch mechanische Siebung nach DIN EN ISO 17830:2016-11 bestimmt. Dabei wurden die Fraktionen in folgende Kategorien eingeteilt: Feinfraktion bis 2 mm, Mittelfraktion von 2 mm bis 5,6 mm und Grobfraktion > 5,6 mm. Die Verteilung der Partikelgrößen des Ausgangsmaterials kann Einfluss auf die Biogasbildung haben.

2.2 Bestimmung des Biogas (BBP)- und Methanbildungspotenzials (MBP)

Um die generelle Eignung für den anaeroben Abbau von Strohpellets zu beurteilen, wurde das BBP und MBP nach der Norm VDI 4630 als Batch-Ansatz in dreifach-Wiederholung untersucht. Für die Untersuchungen wurden 30-Liter-PET-Fässer als Reaktoren verwendet, mit Gassäcken für das produzierte Biogas. Der Test wurde bei 37°C in einer Klimakammer bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums durchgeführt. Zur Vorbereitung der Batch-Tests wurden die Fässer mit einem Inokulum und der entsprechenden Menge an Strohpellets oder Stroh gefüllt. Das Stroh wurde mit der Schere auf ca. 15 cm eingekürzt, die Pellets wurden unzerkleinert eingesetzt. Um ein Aufschwimmen des Strohs zu verhindern, wurden die Proben mit Gewichten in Batchversuch I in Nylonstrümpfe und in Batchversuch II in Wäschenetze gepackt und in den Fermenter eingebracht. Als Inokulum wurde die flüssige Fraktion eines separierten Gärrestes aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage verwendet. Der Biogasertrag wurde mit einem Trommelgaszähler gemessen. Die Biogasqualität wurde mit einem Gaszähler mit Infrarotsensoren erfasst.

3 Ergebnisse

Sieben Proben sind mit einem Durchmesser von 15 mm und vier Proben mit einem Durchmesser von 8 mm gepresst worden. Die Längen der einzelnen Pellets variieren zwischen 8 mm und 65 mm. Die Pellets weisen verschiedene Färbungen von hellbeige bis grünbraun auf, wobei kein Zusammenhang zwischen Getreideart und Farbe beobachtet werden konnte. Die Pelletproben unterscheiden sich hinsichtlich der Festigkeit, der sichtbaren Faser- und Krümelanteile sowie der Oberfläche deutlich. Die Pellets der Proben P1 und P11 sind locker gepresst mit deutlich sichtbarem Krümel- und Faseranteil. Die Pellets P2 bis P8 weisen eine feste Form mit geringem oder fehlendem Krümel- und Faseranteil auf.

Alle untersuchten Strohpellet- und Strohproben wiesen hohe mittlere TS- und oTS-Gehalte auf, welche in Tabelle 1 dargestellt sind.

Tabelle 1: Trockensubstanz und organische Trockensubstanz von Stroh und Strohpellets

	Stroh (n=6)	Strohpellets (n=11)	Strohpellets eig. Herstellung (n=2)
TS in %FS	90,7	92,0	85,7
oTS in % TS	94,2	94,0	94,1

Strohpellets weisen im Vergleich zu anderen Biogassubstraten wie Mais- oder Grassilage sehr hohe TS-Gehalte und somit eine hohe Energiedichte auf. Hohe Schüttdichten sind vorteilhaft für die Transportwür-

digkeit, die Lagerung und die Einbringung in den Fermenter. Die Strohpellets mit 15 mm Durchmesser wiesen eine Schüttdichte von 546 kg/m³ und die Pellets mit 8 mm Durchmesser wiesen 568 kg/m³ auf. Die Pellets aus eigener Herstellung hatten mit 499 kg /m³ die geringste Schüttdichte. Im Vergleich dazu liegen die Schüttdichten von losem Stroh bei 40 kg/m³ und bei Häckselstroh zwischen 35 und 80 kg/m³ (Sächs. Staatsmin., 2023)

Das Auflöseverhalten in Wasser ist sehr gut. Die Pellets lösen sich innerhalb der ersten Minuten vollständig auf. Im weiteren Verlauf bildeten sich teilweise leichte Schwimmschichten. Bei der Beobachtung des gleichen Versuchsaufbaus mit Fermenterinhalt anstelle von Wasser als flüssiges Medium konnte nur ein leichtes Aufquellen und keine Auflösung der Pellets festgestellt werden.

Die Partikelgrößenverteilungen in den Pellets sind von ihrem Herstellungsverfahren abhängig. Die Pellets aus teil-mobiler bzw. mobiler Herstellung ohne vorherige Aufbereitung des Strohs zeigten in der Partikelgrößenverteilung einen mittleren Anteil der Feinfraktion von 32 %. Im Vergleich dazu liegt dieser bei den Pellets aus stationärer Herstellung, welche aus gehäckseltem Stroh gepresst wurden, bei 85 %. Die Pellets aus eigener Herstellung wurden mit einer Hammermühle vorzerkleinert. Dort liegt der Feinanteil bei 69 %. Dementsprechend fällt die Partikelgrößenverteilung der untersuchten Pelletproben je nach Pressverfahren und Vorbehandlung des Strohs sehr unterschiedlich aus.

Das ermittelte C/N-Verhältnis der untersuchten Strohpellets liegt bei 88:1 (n=11) und bei den untersuchten Strohproben bei 90:1 (n=6). Das ideale C/N-Verhältnis für eine gute Stickstoffversorgung der Mikroorganismen im Fermenter wird nach Eder (2012) mit 10-40:1 angegeben. Dabei werden die Gehalte an Kohlenstoff (C) und an Stickstoff (N) bestimmt und dividiert. Im Vergleich dazu wird das C/N-Verhältnis von Gülle mit 8-10 :1 und von Maissilage mit 35:1 angegeben (Amon et al,2007).

Die Methanerträge der einzelnen Pelletproben liegen zwischen 271 und 340 NL/kg oTS. Die Biogaserträge liegen dementsprechend zwischen 523 und 593 LN/kg oTS. Auf Frischmasse bezogen weisen die Strohpellets 251 NL/kg FM auf (Tabelle 2). Im Vergleich dazu werden die Methanerträge für Maissilage in der Literatur mit 102 - 121 NL/kg FM angegeben (Lfl, 2023; KTBL, 2021). Dies bedeutet, dass der gleiche Methanertrag wie aus einem kg Maisilage (FM) alternativ durch 0,4 – 0,48 kg Strohpellets erzeugt werden kann.

Tabelle 2: Methan- und Biogaserträge von Stroh und Strohpellets

	TS	oTS	Ertrag bezogen auf die organische Trockensubstanz		Ertrag bezogen auf Frischmasse		Methangehalt [%]
	[% FM]	[%TS]	Biogas [LN/kg oTS]	Methan [LN/kg oTS]	Biogas [LN/kg FM]	Methan [LN/kg FM]	
Strohpellets	92,0%	94,0%	560	291	484	251	51,9
Stroh	90,5%	93,9%	520	268	442	228	51,5
Maissilage (KTBL, 2021)	35,1%	96,5%	658	357	223	121	54,3

Die Methanerträge von Stroh und Strohpellets fallen bezogen auf die organische Trockensubstanz (oTS) um 20-25 % geringer aus als bei Maissilage, was sich durch die bessere Verdaulichkeit von Maissilage aufgrund hoher Anteile an schnell abbaubaren Kohlenhydraten erklären lässt (Eder et al, 2012). Durch die hohen Trockensubstanzgehalte weisen Strohpellets jedoch, bezogen auf die Frischmasse, deutlich höhere Methanerträge auf als Maissilage mit 121 LN/kg FM. Dabei liegt der durchschnittliche Methangehalt bei Maissilage mit 54,3 % etwas höher als bei den Strohpellets mit 51,9 %. Die ermittelten Methanerträge der Strohpellets liegen 10 % höher als die der untersuchten Strohproben.

4 Fazit

Strohpellets weisen durch hohe TS- und oTS-Gehalte mit mittleren Schüttdichten von 500-560 kg/m³ hohe Energiedichten und eine gute Lager- und Transportwürdigkeit auf. Beim Einsatz von Strohpellets in Biogasanlagen sollte ein möglicher Einfluss auf den Wassergehalt, die Rührfähigkeit und den Strombedarf im Fermenter beachtet werden. Ebenso konnte bei Strohpellets ein gutes Auflösungsverhalten in Wasser festgestellt werden, im Fermenter ist das Auflösungsverhalten von dessen Viskosität und TS-Gehalt abhängig. Die Viskosität kann durch den Pentosengehalt der Strohpellets beeinflusst werden. Werden Strohpellets als Co-Substrat im Biogasprozess eingesetzt, ist je nach Substratmischung auf eine ausreichende Zufuhr von Stickstoff zu achten, da Stroh und Strohpellets ein weites C/N Verhältnis aufweisen. Die Partikelgrößen in den Pellets sind vom Pressverfahren abhängig. Der Einfluss der Partikelgrößenverteilung auf den Abbau im Fermenter konnte in Batchversuchen nicht eindeutig nachgewiesen werden. Die Untersuchung von Strohpellets zeigte eine gute Abbaubarkeit und Methanerträge von 251 L_N/kg FS. Aufgrund der starken Vorzerkleinerung der Pellets aus eigener Herstellung konnte eine schnellere Biogas- und Methanbildung im Vergleich zu dem Stroh, aus dem die Pellets hergestellt wurden, festgestellt werden. Insgesamt weisen Strohpellets eine gute Eignung zur Vergärung im Biogasfermenter sowie eine hohe Methanbildung auf.

Danksagung

Das Projekt *StroPelGas* wurde vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) gefördert durch das Förderprogramm Wachsende Rohstoffe des Projektträgers FNR.

Literatur/Quellen

- Amon, T.; Machmüller, A.; Kryvoruchko, V.; Milovanovic, D.; Hrbek, R.; Eder, M. W.; Stürmer, B. (2007): Optimierung der Methanausbeute aus Zuckerrüben, Silomais, Körnermais, Sonnenblumen, Ackerfutter, Getreide, Wirtschaftsdünger und Rohglyzerin unter den Standortbedingungen der Steiermark. Endbericht BMLFUW1421, Universität für Bodenkultur Wien.
- Andersen, L.F., Parsin, S., Lüdtke, O. (2022): Biogas production from straw—the challenge feedstock pretreatment. *Biomass Conv. Bioref.* 12: 379–402. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00740-y>
- Eder, B. (Hrsg) (2012): Biogas Praxis. Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele. Wirtschaftlichkeit, Umwelt. 5. Auflage. Ökobuch Freiburg
- Fjørtoft, K., Morken, J., Hanssen, J. F., Briseid, T. (2019): Pre-treatment methods for straw for farm-scale biogas plants, *Biomass and Bioenergy*, Volume 124: 88-94, ISSN 0961-9534,

- Reinhold, G. (2014): Vergärung von Stroh in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Hg. v. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL). Jena.
- Reuters, A. (2013): Vergleich bekannter Methoden für den Aufschluss von Stroh zum Einsatz in Biogasanlagen, Bachelorarbeit, Hochschule Neubrandenburg, Bioprodukttechnologie. urn:nbn:de:gbv:519-thesis-2012-0103-4
- Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (2023): Raummaße und Raumbedarf von Rau- und Krafffutter. https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Tab_Raumeinheiten_LW_2014.pdf. Abgerufen am 27.12.2023
- Victorin, M., Davidsson, Å., Wallberg, O. (2020): Characterization of mechanically pretreated wheat straw for biogas production. *Bioenerg. Res.* 13: 833–844. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10126-7>

Kontakt

M.Eng., Meike Walz, wissenschaftliche Mitarbeiterin

HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst / Fakultät Ressourcenwissenschaft

Tel.-Nr. +49 551 5032-270

E-Mail: meike.walz@hawk.de

Homepage: <https://neutec.hawk.de/de>

Untersuchungen zur Abbaubarkeit von Vorsammelhilfen nach der Lagerung in Küchen- und Speiseabfällen

Abstract: In Haushalten werden häufig Vorsammelhilfen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen eingesetzt, um die anfallenden Küchen- und Speiseabfälle zu erfassen. Solche Vorsammelhilfen gelten unter anaeroben Bedingungen in Biogasanlagen als eher schlecht abbaubar, was die Gärrestqualität vermindert und eine weitere stoffliche Nutzung der Gärreste einschränkt. Gleichzeitig können Vorsammelhilfen zu Betriebsproblemen (z.B. Verstopfungen und Verzopfungen) in Biogasanlagen führen und Zusatzkosten verursachen. In Laborversuchen wurde bei 10 °C und 20 °C über 28 Tage untersucht, ob die Lagerung von Vorsammelhilfen in Küchen- und Speiseabfällen die anaerobe Abbaubarkeit verbessert. Als Lagerungs-substrat wurde aufgrund einer ähnlichen Zusammensetzung wie Küchen- und Speiseabfälle und aufgrund der Störstofffreiheit Hundefutter verwendet. Während der Lagerung säuerte das Hundefutter an ($\text{pH} < 4$). Optische und gravimetrische Analysen sowie eine Fourier- Transform Infrarot-Spektroskopie zeigten keine Unterschiede zwischen den originalen und gelagerten Vorsammelhilfen. Im Gärtest konnte kein signifikanter Unterschied im Methan-ertrag zwischen den originalen und gelagerten Vorsammelhilfen festgestellt werden. Zum Teil zeigten die gelagerten Vorsammelhilfen aber eine beschleunigtere Abbaukinetik im Vergleich zu den Originalproben. Insgesamt führte eine Lagerung von Vorsammelhilfen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen in Küchen- und Speiseabfällen nicht zu einem verbesserten Abbau in Biogasanlagen.

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 durch die Vergärung 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. Kommunale Bioabfälle zeichnen sich durch einen hohen Methanertrag und die Möglichkeit der Nutzung des Gärrests als Dünger aus. Zur Steigerung der Bioabfallsammelmengen werden zunehmend Vorsammelhilfen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen eingesetzt. Solche Vorsammelhilfen sind unter anaeroben Bedingungen meist schlecht abbaubar, verursachen Betriebsprobleme im Vergärungsprozess (z.B. Verstopfungen bei der Gärrestentwässerung), vermindern die Gärrestqualität und schränken damit eine stoffliche Verwertung des Gärrests ein.

Häufig werden Bioabfälle vor der Vergärung in der Biogasanlage zwischengelagert. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass Bioabfälle während ihrer Lagerung versäuern und dadurch konserviert werden (vgl. Aichinger et al., 2015; Schneider et al., 2015; Wehner et al., 2023). Das Säurespektrum in den gelagerten Bioabfällen wird vor allem durch die Milchsäure dominiert.

Die zentrale Fragestellung dieser Studie ist es zu untersuchen, ob die Lagerung der Bioabfälle die Abbaubarkeit von Vorsammelhilfen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen im nachgelagerten Vergärungsprozess beeinflusst. Eine Verbesserung der Abbaubarkeit, z.B. durch einen Aufschluss in den Vorsammelhilfen durch die gebildeten Säuren im Bioabfall, könnte zu einer erhöhten Gärrestqualität und Vermeidung von Betriebsproblemen im Vergärungsprozess führen.

2 Material und Methoden

In einem Laborversuch wurden drei unterschiedliche Vorsammelhilfen (Streifengröße 5 x 15 cm) aus biologisch abbaubaren Kunststoffen gemeinsam mit Hundefutter über 28 Tage gelagert (2 Liter Glasflasche). Hundefutter wurde verwendet, da es keine Störstoffe (z.B. Kunststoffe) beinhaltet und gleichzeitig ähnliche physikalisch-chemische und ernährungsphysiologische Eigenschaften wie Küchen- und Speiseabfälle besitzt. Die Vorsammelhilfen unterschieden sich in ihrer Materialstärke und des Anteils an nachwachsenden Rohstoffen (Tabelle 1). Die Lagerung erfolgte bei 10 °C und 20 °C über eine Zeitdauer von 3, 7, 14, 21 und 28 Tagen. Während des Lagerungsvorgangs wurden pH-Wert, flüchtige organische Säuren (FOS) und Säurespektrum analysiert, um den Grad der Versäuerung zu bestimmen. Die Vorsammelhilfen wurden vor und nach ihrer Lagerung in den Bioabfällen gewogen, optisch mit Fourier-Transform Infrarot-Spektroskopie (FTIR) untersucht und das Biomethanpotenzial der gelagerten Vorsammelhilfen im Gärtest bestimmt. Die Gärtests wurden in Anlehnung an die VDI 4630 bei mesophilen Temperaturbedingungen (37 °C) durchgeführt.

Tabelle 1: In den Laborversuchen verwendete Vorsammelhilfen und deren Eigenschaften [verändert, nach Kaup (2023)]

Vorsammelhilfe	Materialdicke (µm)	Anteil nachwachsender Rohstoffe (%)	Stärkebasis	Verwendung
1	17	40	Mais	Vorsammelhilfe
2	16	> 60	Mais	Innenauskleidung Bioabfalltonnen, Vorsammelhilfe
3	10	> 60	Kartoffel, Distel- und/ oder Sonnenblumenöl	Obst- und Gemüsebeutel in Supermärkten

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Lagerungsverhalten von Hundefutter

Hundefutter zeigte nach 28 Tagen bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C eine stärkere Versäuerung (FOS: 15.000 mg/L) als bei 10 °C (FOS: 12.000 mg/L). Das Säurespektrum wurde überwiegend mit 83 % (10 °C) und 92 % (20 °C) durch Propionsäure dominiert. In anderen Untersuchungen zur Lagerung von Küchen- und Speiseabfällen wurde vorwiegend Milchsäure detektiert (Schneider et al., 2015; Wehner et al., 2023), was auf die unterschiedlichen Ausgangsmaterialien der Versuche zurückzuführen sein könnte. Durch den Anstieg der Säureproduktion konnte ein Absenken des pH-Werts auf 3,6 (10 °C) bzw. 3,7 °C (20 °C) verzeichnet werden.

3.2 Abbau der Vorsammelhilfen nach der Lagerung in Hundefutter

Unabhängig von der Lagerungsdauer und der Art der Vorsammelhilfe konnten keine optischen Unterschiede zwischen den Ausgangsproben im Vergleich zu den gelagerten Proben festgestellt werden. Zwischen den originalen und den gelagerten Vorsammelhilfen konnten keine signifikanten Gewichtsunterschiede festgestellt werden, die auf einen Abbau hindeuten. Eine Analyse der Vorsammelhilfen mittels FTIR zeigte bei den Originalproben und den gelagerten Proben Peaks bei gleichen Wellenlängen und ähnlichen Intensitäten, womit ebenfalls kein Indiz für einen Abbau vorliegt.

3.2 Biomethanpotenzial der Vorsammelhilfen

Die ermittelten Methanerträge der Vorsammelhilfen lagen in der Größenordnung von Literaturwerten (95 – 152 ml_N/g oTR (Calabro' et al., 2020; Cucina et al., 2022)). Im Gärtest konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Methanerträgen der originalen und gelagerten Vorsammelhilfen festgestellt werden (Tabelle 2). Dementsprechend kann nicht von einem verbesserten Abbau der Vorsammelhilfen durch eine vorhergehende Lagerung ausgegangen werden. Eine rein optische Beurteilung der Vorsammelhilfen vor und nach dem Gärtest ließ in diesem Zusammenhang auch keine Unterschiede erkennen. Bei den Vorsammelhilfen 1 und 2 zeigten die gelagerten Proben aber eine beschleunigte Abbaukinetik innerhalb der ersten 14 Tage des Gärtests im Vergleich zu den originalen Vorsammelhilfen.

Tabelle 2: Methanerträge (ml_N/g oTR) der originalen und gelagerten Vorsammelhilfen [verändert, nach Kaup (2023)]

Vorsammelhilfe	1	2	3
	Methanertrag (ml _N /g oTR)		
Originalprobe	84 ± 11	131 ± 6	145 ± 1
gelagerte Probe	90 ± 4	129 ± 10	109 ± 8

4 Schlussfolgerungen

Vorsammelhilfen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen gelten unter anaeroben Bedingungen als eher schlecht abbaubar, was die stoffliche Nutzung der Gärreste aus der Bioabfallvergärung einschränkt. Mit der vorgestellten Arbeit konnten neue Erkenntnisse in Bezug auf den Einfluss der Lagerung auf die Abbaubarkeit von Vorsammelhilfen in Biogasanlagen gewonnen werden. Eine Lagerung führte zu keiner Verbesserung der Abbaubarkeit von Vorsammelhilfen in der Vergärung. Es konnte aber eine beschleunigte Abbaukinetik im Vergleich zu den Originalproben festgestellt werden.

Literatur/Quellen

- Aichinger, P., Kuprian, M., Probst, M., Insam, H., Ebner, C. 2015. Demand-driven energy supply from stored biowaste for biomethanisation. *Bioresour Technol*, 194, 389-93.
- Calabro', P.S., Folino, A., Fazzino, F., Komilis, D. 2020. Preliminary evaluation of the anaerobic biodegradability of three biobased materials used for the production of disposable plastics. *Journal of Hazardous Materials*, 390.
- Cucina, M., Carlet, L., De Nisi, P., Somensi, C.A., Giordano, A., Adani, F. 2022. Degradation of biodegradable bioplastics under thermophilic anaerobic digestion: A full-scale approach. *Journal of Cleaner Production*, 368
- Kaup, A. 2023: Lagerung von Vorsammelhilfen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen in mechanisch aufbereiteten Küchen- und Speiseabfällen. Masterarbeit. Management Center Innsbruck (MCI), Innsbruck.
- Schneider, I., Gerke, F., Kinzel, C., Müller, W., Tertsch, S., Kuprian, M., Bockreis, A. 2015. Dezentrale Aufbereitung und Lagerung von Speiseresten – Neue Wege zur Ressourcen- und Energiespeicherung. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 68(1-2), 24-30.
- Wehner, M., Kleidorfer, I., Whittle, I., Bischof, D., Bockreis, A., Insam, H., Mueller, W., Hupfauf, S. 2023. Decentralised system for demand-oriented collection of food waste - Assessment of biomethane potential, pathogen development and microbial community structure. *Bioresour Technol*, 376, 128894.

Kontakt

Dr. Marco Wehner, wissenschaftlicher Mitarbeiter

Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Umwettechnik

Tel.-Nr. +43 512 507 62125

E-Mail: marco.wehner@uibk.ac.at

Homepage: www.uibk.ac.at/umwettechnik

Erweiterte Sektorenverantwortung für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft im Tourismussektor

Abstract: Die Erde steht vor einer dreifachen planetaren Krise: Klimaveränderung, Biodiversitätsverlust und Umweltverschmutzung. Das Projekt TouMaLi (Tourism Marine Litter) und die damit verbundene Dissertation widmet sich vor allem der Umweltverschmutzung, genauer gesagt „Marine Litter“ (Meeresmüll) und hat das Ziel, den Eintrag von Abfällen in die Umwelt durch eine geregelte, verbesserte Abfallwirtschaft zu unterbinden. Im Fokus steht hierbei die Verantwortung des Tourismussektors. In vielen Fällen sind das Fehlen klarer Zuständigkeiten, eine schwache Gesetzgebung und Rechtsdurchsetzung sowie eine unzureichende Finanzierung der Kern des Problems und weniger die Notwendigkeit innovativer technischer Lösungen. Die Ergebnisse eines Meeresmüllmonitorings in den Projektländern zeigen einen hohen Verschmutzungsgrad auf und unterstreichen den Zusammenhang zwischen (touristischen) Erholungsaktivitäten an Stränden und Marine Litter. Die Analyse der Abfallbewirtschaftungspraktiken im Tourismussektor der Pilotregionen weist ein erhebliches Verbesserungspotenzial auf. Der Tourismussektor leidet nicht nur unter dem Problem, sondern trägt auch zum Problem bei. Das entwickelte Konzept einer „Erweiterten Sektorenverantwortung“ für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft im Tourismussektor liefert Ansätze, die aktuelle Situation zu verbessern.

1 Einleitung

Die zunehmende Meeresverschmutzung durch Plastikabfälle stellt weltweit ein akutes Umweltproblem dar. Mit jährlich 9-14 Millionen Tonnen Plastikmüll, die in den Ozeanen landen, und der Aussicht auf eine fast dreifache Zunahme bis 2040 ist dringendes Handeln erforderlich (United Nations Environment Programme, 2021). Die damit einhergehenden verheerenden Auswirkungen auf Umwelt, Gesundheit und Wirtschaft sind evident. Die UNEA-5.2 verabschiedete im Februar 2022 eine historische Resolution, die die Entwicklung eines international rechtlich bindenden Instruments zur Bekämpfung von Plastikverschmutzung bis Ende 2024 anstrebt und dabei den gesamten Lebenszyklus von Plastikabfällen betrachtet, mit einem besonderen Fokus auf Meeresmüll. Diese globale Initiative mindert jedoch nicht die Notwendigkeit lokaler Lösungsansätze. Besonders in der MENA-Region besteht ein erhebliches Potenzial zur Reduzierung von Kunststoffeinträgen in terrestrische und aquatische Ökosysteme durch eine verbesserte Abfallwirtschaft. Das Forschungsprojekts TouMaLi (Tourism Marine Litter), welches im Juni 2021 in Ägypten, Marokko und Tunesien gestartet ist, zielt genau darauf ab. Es entwickelt nachhaltige Abfallwirtschaftslösungen, die auch den Tourismussektor einbeziehen. Damit verbunden ist die Doktorarbeit mit dem Arbeitstitel „Erweiterte Sektorenverantwortung für nachhaltigen Tourismus und Kreislaufwirtschaft“. Entwickelte Konzepte liefern

Strategien und innovative organisatorische und finanzielle Lösungsmöglichkeiten, um Marine Litter zu reduzieren und die Meeresökosysteme in der Region zu schützen. Diese Konzepte werden in jeweils einem Pilotprojekt pro Projektland implementiert. Ein Konsortium aus neun verschiedenen Institutionen aus Wissenschaft, Think-Tanks und Unternehmen bearbeitet aktuell das Forschungsvorhaben, welches noch bis April 2025 läuft.

2 Methodik

2.1 Strandmüll Monitoring

Das Leibniz-Institut für Ostseeforschung (IOW) ist im Rahmen des TouMaLi-Projekts für das Marine Litter Monitoring verantwortlich. Gemeinsam mit den jeweiligen lokalen Projektpartnern wurde in den Projektländern ein Meeresmüllmonitoring durchgeführt. Die ausgewählten Strände umfassen eine Mischung aus nicht gereinigten Stränden, städtischen, halb städtischen und ländlich-abgelegenen Stränden. Die Strände und auch Jachthäfen wurden mit 4 verschiedenen, in der EU harmonisierten Methoden untersucht:

- 100m UNEP/OSPAR-Methode (Makroabfälle >25 mm).
- Sandharken-Methode (Mesoabfälle >5-25 mm)
- Strandwrack-Methode (> 25 mm)
- Unterwassermethode für flache Häfen (Makrostreu >100 mm)

2.2 Datenerhebungen zur Erfassung aktueller Abfallbewirtschaftungspraktiken

Im Projekt TouMaLi wird ein Pilotprojekt pro Land entwickelt, das in der Anfangsphase 15 bis 20 Hotels und etwa 5 verschiedene Strände im Projektgebiet umfasst. Kern dieser Projekte sind die Etablierung kleiner Werkstoffhöfe inkl. der getrennten Sammlung und Vorbereitung von Werkstoffen für ein späteres Recycling. In den Pilotregionen Alexandria (Ägypten), Essaouira (Marokko) und Hammam-Sousse (Tunesien) wurden Ortsbesuche durchgeführt und zuvor erarbeitete Fragebögen systematisch von lokalen Hotelmanagern und Mitarbeitern der Kommunen beantwortet. Weiters wurde die aktuelle Situation durch Fotos festgehalten.

2.3 Abfallsortieranalyse

Für die Durchführung von Abfallsortieranalysen wurde vom Projektteam der Universität Rostock eine detaillierte Methodik auf der Grundlage der in Deutschland etablierten Sortierrichtlinien für die Abfallsortierung entwickelt und den lokalen Partnern in Workshops und mithilfe von Leitfäden und Checklisten vermittelt. Zur quantitativen Charakterisierung wurden pro Kampagne 6 Probenahmen durchgeführt, die einer Sortiermenge von 6 m³ bzw. jeweils ca. 1.200 kg entsprechen (bei einer angenommenen Dichte von 200 kg/m³). Zur Bestimmung der Qualität wurde in diesem Fall nur eine erste Differenzierungsstufe gewählt, die folgende Kategorien umfasst:

- | | |
|---------------------|------------------------|
| • Eisenmetalle | • Holz |
| • Nichteisenmetalle | • Bekleidungstextilien |
| • Papier/Karton | • Mineralien |
| • Glas | • Verbundstoffabfälle |
| • Kunststoffe | |

- Organische Materialien (einschließlich Mittel und Feinfraktionen)
- Gefährliche Materialien
- Reststoffe (Gummi/Leder/Hygiene – geeignet als Ersatzbrennstoff)

3 Vorläufige Ergebnisse

3.1 Strandmüllmonitoring

Abbildung 1 zeigt die Verteilung des Marine Litter Eintrags nach Sektoren, die sich aus der Auswertung („matrix scoring technique“) der mit der 100 m UNEP/OSPAR-Methode gewonnenen Daten für Makroplastik (>25 mm) ergeben.

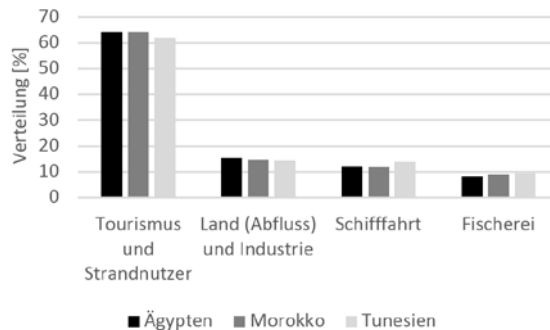


Abbildung 1: Prozentuale Verteilung des Marine-Litter-Eintrags nach Sektoren

Die Daten zeigen, dass in allen 3 Ländern dem Tourismus und Strandaktivitäten über 60 % der „gelitterten“ Abfälle zuzuschreiben sind. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Zigarettenstummel, kleine Plastiktüten, Verpackungen, Plastikdeckel von Getränkeflaschen und Strohhalme. Die 10 am häufigsten an Stränden aufzufindenden Gegenstände sind in allen 3 Ländern ausschließlich künstliche Polymere. Die Anzahl der mit der OSPAR/UNEP-Methode festgestellten Partikel pro 100 m liegt zwischen 1.100 und 24.000 Partikeln. Einige der Ergebnisse sind extrapoliert, da aufgrund des hohen Verschmutzungsgrades eine Überwachung von 100 m nicht möglich war. Die Ergebnisse zeigen jedoch eine sehr hohe Verschmutzung mit einer durchschnittlichen Menge von 8.500 Partikel/100 m in Ägypten, 5.231 Partikel/100 m in Tunesien und 2.946 Partikel/100 m in Marokko. Im Vergleich dazu liegt der europäische Grenzwert für Meeressmüll an den Küsten bei 20 Partikel/100 m. Nach einer aktuellen Studie von Vlachogianni et al. (2022) wurde für ausgewählte Küsten- und Meeresschutzgebiete im Mittelmeerraum in Kroatien, Zypern, Frankreich und Slowenien eine durchschnittliche Abfalldichte von 912 Partikel/100 m ermittelt.

3.2 Abfallbewirtschaftung in Hotels der Pilotregionen

Die Untersuchungen in den Pilotregionen zeigen, dass die Abfalltrennung in Hotels oft nur theoretisch existiert, in der Praxis jedoch wenig umgesetzt wird. Dies ist unter anderem auch der Tatsache geschuldet, dass es keine offizielle getrennte Sammlung gibt. In Alexandria weisen große und gehobene Hotels eine

besser organisierte Abfallinfrastruktur auf als kleine Hotels. Es gibt eine zweistufige Trennung in trockene und nasse Abfälle. In Marokko ähnelt die Situation der in Alexandria, wobei über die Hälfte der untersuchten Hotels gar keine getrennte Sammlung durchführen. In Tunesien gibt es vor allem in großen Hotels eine differenzierte Abfalltrennung und Sammlung in großen unterirdischen Containern. Besonders in der Hochsaison reicht die Abholungsrate jedoch nicht aus und es bilden sich oft unangenehme Gerüche. In allen drei Ländern werden getrennt gesammelte Werkstoffe an kleine private oder informelle Abnehmer verkauft oder dienen dem Personal als zusätzliches Einkommen.

3.3 Exemplarische Ergebnisse einer Abfallsortieranalyse in Alexandria, Ägypten

Die organische Fraktion macht mit einem Anteil von 54 % den weitaus größten Teil aus. Dies dürfte vor allem auf Küchenabfälle zurückzuführen sein. Die zweitgrößte Fraktion ist mit 26 % der Restmüll. Hierunter fallen vor allem Hygieneabfälle. Der Anteil der Kunststoffe liegt bei 10 %. Insgesamt liegt der Anteil der potenziellen Wertstoffe Kunststoff, Glas und Papier bei 17 % (Papier 5 %, Glas 2 %). Die durchschnittliche tägliche Abfallmenge pro Hotel in der Nebensaison liegt bei rund 230 kg.

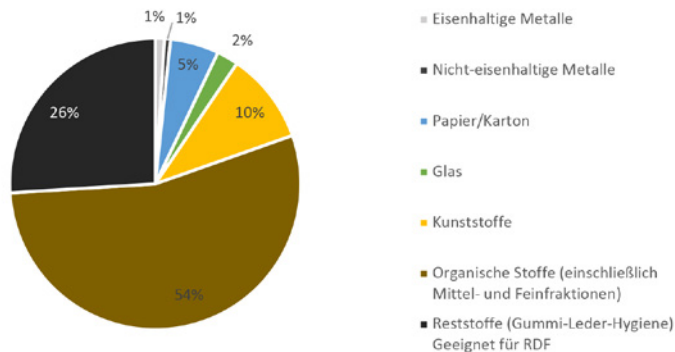


Abbildung 2: Ergebnisse einer ersten Abfallsortierung in ausgewählten Hotels in Alexandria, Ägypten

4 Erweiterte Sektorenverantwortung des Tourismussektors

Chaabane et al., 2020 beschreiben im Konferenzpapier „Casual Analyses of Problematic of Solid Waste Management in Tourism in Tunisia“ die Hauptgründe, die für eine mangelhafte Abfallwirtschaft in Tunesien verantwortlich sind. In weiten Teilen lassen sich diese auch auf die anderen Projektländer übertragen. Laut Chaabane et al., 2020 sind die Hauptgründe:

1. Mangelhafte oder fehlende Planung
2. Unklare Verantwortlichkeiten
3. Schlechte, nicht nachhaltige Finanzierungsstrukturen
4. Schlechte Abfallsortierung an der Quelle verbunden mit mangelnder Kontrolle
5. Mangelnde Sensibilität von Entscheidungsträgern, Industrie, Touristen und der lokalen Bevölkerung

Es lässt sich mangelndes „Know-how“ und das Fehlen von gut ausgebildeten Fachkräften hinzufügen. Ein Punkt, der die Projektländer zusätzlich verbindet, sind die im Vergleich zu Deutschland anderen Staatsformen. Besonders in Tunesien und Ägypten gab es in den letzten 10 Jahren einige politische Veränderungen, welche in Umbruchszeiten i.d.R. auch mit Planungsunsicherheiten und Problemen für die Abfallwirtschaft verbunden waren.

Ähnlich zu dem Konzept einer erweiterten Produzentenverantwortung (EPR) lässt sich aus der Rolle des Tourismus in der beschriebenen Situation auch eine erweiterte Sektorenverantwortung (ESR) ableiten. Ziel ist es, eine „Win-Win-Situation“ zu schaffen, indem der Tourismussektor seine wirtschaftliche Robustheit stärkt, Umweltverschmutzung reduziert und soziale sowie Bildungsaspekte fördert. Ein zentrales Element ist die Schaffung eines gemeinnützigen „Zentrums für Kreislaufwirtschaft“ (Z-KrW), das die lokale Abfallwirtschaft koordiniert und Strandreinigungsaktivitäten unterstützt und zusammen von dem Tourismussektor (Hotelverband) und der örtlichen Kommune getragen wird. Die Finanzierung wird durch ein EPR-System, Hotelabgaben, kommunale Unterstützung, Umweltsteuern und Erlöse aus recycelten Materialien erfolgen. Die lokale Abfallwirtschaft soll als unternehmerische Chance betrachtet werden, und langfristig besteht die Möglichkeit, dass sich touristische Vorzeigeregionen entwickeln, was Marketing-Aktivitäten zugutekommt.

5 Fazit und Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse des Projekts TouMaLi bestätigen, dass es einen Zusammenhang zwischen touristischen Erholungsaktivitäten und dem Problem des Meeressmülls gibt. Der Großteil der Strandabfälle wird durch den Tourismus und Strandnutzer verursacht. Das Projekt plant, in Zusammenarbeit mit lokalen Partnern ein Langzeitmonitoring einzurichten, um eine solide Datengrundlage für Gegenmaßnahmen zu schaffen und Minderungsmaßnahmen zu validieren. Die Analyse der Abfallwirtschaft in den Pilotregionen zeigt erhebliches Verbesserungspotenzial. Unter dem Ansatz der „Erweiterten Sektorenverantwortung“ arbeitet das Projektkonsortium zusammen mit relevanten Stakeholdern an der Umsetzung der Pilotprojekte. Das Projekt zielt langfristig darauf ab, durch nachhaltige Maßnahmen und der Etablierung neuer organisatorischer und finanzieller Strukturen einen Beitrag zur Reduzierung von Meeressmüll zu leisten und modellhafte Strukturen für andere touristische Regionen zu schaffen.

Danksagung

Das Projekt *TouMaLi* wird durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des *Förderprogrammes gegen Meeressmüll* gefördert.

Literatur/Quellen

Chaabane, W., Abdallah, N., & Nelles, M. (2020). Causal Analyses of the Problematic of Solid Waste Management in Tourism in Tunisia. Konferenz: 10. Wissenschaftskongress „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“ 2020. Dresden, Germany.

United Nations Environment Programme. (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. <https://www.unep.org/>.

Vlachogianni, T., Constantin, P., Fedra Dokoza, F., Brina Knez, & Demetra Orthodoxou. (2022). Assessing the amount of marine litter on beaches of Mediterranean coastal and marine protected areas. Athens, Greece, https://mio-ecsde.org/wp-content/uploads/2022/05/ML-on-Med-beaches_Report.pdf.

Kontakt

M.Sc. Julian Wiechert (wissenschaftlicher Mitarbeiter)

Universität Rostock

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Profesur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft

Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock

Tel.-Nr.: +49 (0) 381.498-3406

E-Mail: j.wiechert@uni-rostock.de

Homepage: <https://www.auf.uni-rostock.de/professuren/a-g/aw/>

Klimaschutz und Nachhaltigkeitsaspekte in der Planungsphase von Ingenieurbauwerken

Abstract: Das größte Klimaschutz- und Nachhaltigkeitsoptimierungspotential von Ingenieurbauwerken besteht in ihrer frühesten Planungsphase. Für die Schöpfung dieses Potentials benötigt es einfache Benchmarkwerte, um einen Variantenvergleich durchzuführen und darauf basierend eine Optimierung vornehmen zu können – diese Methodik fehlt derzeit noch. Selbst etablierte Nachhaltigkeitszertifizierungssysteme berücksichtigen Ingenieurbauwerke (noch) nicht. Für die Errichtung von Ingenieurbauwerken wird viel Baumaterial und viel Energie benötigt. Die damit einhergehenden Treibhausgasemissionen und der Ressourcenverbrauch sind derzeit nicht nachhaltig. Um die damit verbundenen Klimaauswirkungen und den Ressourcenverbrauch möglichst gering zu halten, wird ein ganzheitlicher Ansatz benötigt, bei dem möglichst früh in der Planungsphase der Bauwerke ein Variantenvergleich erfolgen sollte, bei dem Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigt werden.

1 Einleitung

Die Europäische Staatengemeinschaft hat 2019 im Rahmen des European Green Deals Europäische Kommission (2019) das Ziel gesetzt bis 2050 klimaneutral zu werden (Europäische Kommission, 2019). Mit der Änderung des Klimaschutzgesetzes wurden diese Klimaschutzvorgaben sogar verschärft und das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 verankert (Die Bundesregierung, 2022).

Um die daraus folgenden Ziele zu erreichen, müssen in allen Sektoren Treibhausgasemissionen verringert werden. Gebäude sind, siehe Abbildung 1, für 17 % der CO₂-Emissionen von Deutschland im Jahr 2022 verantwortlich (vgl. Umweltbundesamt, 2023).

Daher spielen schon heute Klimaschutz und andere Aspekte der Nachhaltigkeit bei Planungen und Ausführungen von Bauwerken aller Art eine deutlich größere Rolle.

Unter den Bauwerken spielen Ingenieurbauwerke eine wichtige Rolle, da bei ihrer Errichtung beträchtliche Mengen an Ressourcen in Form von Baumaterialien, ein hoher Energieaufwand sowie eine große Menge an Treibhausgasen emittiert werden. Auf der anderen Seite haben Ingenieurbauwerke auch das Potential bereits vorhandene Emissionen aus dem Verkehrssektor zu verringern. Durch neue Bauwerke können beispielsweise Verkehrsverzögerungen reduziert und die Menge an Treibhausgasen dadurch verringert werden.

CO₂-Emissionen in Millionen Tonnen nach Sektoren in Deutschland im Jahr 2022

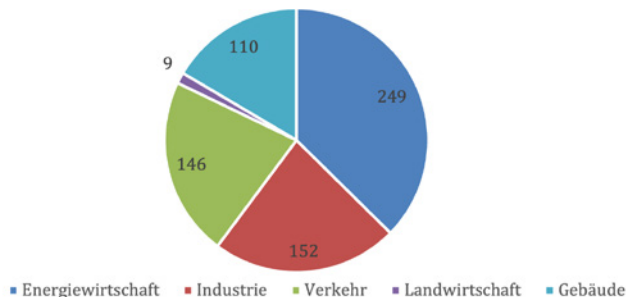


Abbildung 1: Kohlendioxid-Emissionen in Deutschland nach Sektor im Jahr 2022 (in Millionen Tonnen CO₂) nach Umweltbundesamt (2023)

Ingenieurbauwerke sind meist einzigartige, technisch komplexe Bauwerke, die errichtet werden, um infrastrukturelle Funktionen für Verkehr, Wasserver- und -entsorgung oder Energieerzeugung und -übertragung zu erfüllen.

Diese Arbeit soll aufzeigen, dass die anfänglichen Planungsphasen maßgebend für die Klimaauswirkungen von Ingenieurbauwerken sind.

Durch die Betrachtung verschiedener Planungsvarianten und die Berücksichtigung von Lebenszyklusansätzen können Ingenieurbauwerke effektiver gestaltet werden, um ihre langfristigen Umweltauswirkungen zu minimieren.

2 Aktuelle Herausforderungen

Klimaschutz und Nachhaltigkeitsaspekte spielen in der Planungsphase von Ingenieurbauwerken oft eine untergeordnete Rolle. Auch gibt es in Deutschland derzeit kein Nachhaltigkeitsbewertungssystem für Ingenieurbauwerke (vgl. Schadow, T., 2022). Dies führt dazu, dass die Umweltauswirkungen von Ingenieurbauwerken kaum in der Planungsphase von Ingenieurbauwerken berücksichtigt werden und somit oft größer sind, als sie sein müssten. Hier zeigt sich der Bedarf nach einer besseren Einbindung von Nachhaltigkeitsbewertungsmöglichkeiten in die anfänglichen Planungsphasen von Ingenieurbauwerken.

3 Umweltrelevanz der frühen Phasen der Bauplanung

Besonders zu Beginn der Bauplanung von Ingenieurbauwerken beeinflussen die dort gefallenen Entscheidungen maßgeblich die Umweltauswirkungen, die von dem Bauwerk ausgehen werden. (Baumgärtner et al.) Sie stellen somit einen wesentlichen Ansatzpunkt für nachhaltiges Bauen dar.

Einen systematischen Überblick über die Planungsaufgaben in Bezug auf Ingenieurbauwerke liefert die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI). Diese definiert sogenannte Leistungsphasen, die die Gesamtleistung eines Architekten oder Ingenieurs in einzelne Planungsabschnitte untergliedert. Für die Leistungsbilder der Objektplanung, zu denen auch Ingenieurbauwerke zählen, sind neun Leistungsphasen definiert.

Die einzelnen Leistungsphasen sind:

- LPH1: Grundlagenermittlung
- LPH2: Vorplanung
- LPH3: Entwurfsplanung
- LPH4: Genehmigungsplanung
- LPH5: Ausführungsplanung
- LPH6: Vorbereitung der Vergabe
- LPH7: Mitwirkung bei der Vergabe
- LPH8: Objektüberwachung – Bauüberwachung und Dokumentation
- LPH9: Objektbetreuung

Anhand der in den Leistungsphasen genannten Grundleistungen lassen sich Rückschlüsse auf den Detailgrad der Planung in dieser Phase ziehen. Jede einzelne Leistungsphase weist dadurch unterschiedliches Potential auf, um die Umweltauswirkungen zu verringern. In den frühen Phasen werden grundsätzliche Entscheidungen getroffen, die in den darauffolgenden Planungsphasen und der späteren Bauausführung kaum noch geändert werden können.

Dazu gehört auch die Wahl des Bauwerks, die in den ersten drei Phasen erfolgt. Es wird entschieden, ob beispielsweise eine Brücke oder ein Tunnel gebaut werden soll. Es ist wichtig, die Varianten mit einfachen Benchmarkwerten hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen zu vergleichen und bei der Wahl der Bauwerkslösung zu berücksichtigen.

Weiterhin ist die fünfte Phase von entscheidender Bedeutung, da hier die Baumaterialien für alle folgenden Phasen festgelegt werden. Hier könnte bereits ein Fokus auf eine nachhaltigere Materialwahl gesetzt werden. Als Beispiel soll hier exemplarisch der Einsatz von Recyclingbeton genannt werden.

Das Klimaschutzpotential durch die Verwendung von Recyclingbeton ergibt sich nur, wenn die rezyklierte Gesteinskörnung geringere Transportstrecken benötigt. Je nach örtlicher Geologie kann der Einsatz von Recyclingbeton aus Klimaschutzgründen Sinn ergeben oder nicht. Daher ist auch hier eine individuelle Bewertung des Bauvorhabens mit Variantenvergleich sinnvoll, um eine Variante wählen zu können, die geringere Umweltauswirkungen aufweist.

Für städtische Gebiete ist es daher empfehlenswert, 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.

Für ländliche Bauvorhaben ist der Einsatz von Recyclingbeton aufgrund der längeren Transportstrecken im Hinblick auf die CO₂-Bilanz schlechter als konventioneller Beton.

4 Möglichkeiten der Bewertung von Ingenieurbauwerken in den frühen Planungsphasen

Es gibt mehrere Möglichkeiten die Umweltauswirkungen von Ingenieurbauwerken in der Planungsphase zu bewerten. Denkbar wäre die Nutzung einer gewichteten Punkteliste (analog zum Hochbau), um eine qualitative Bewertung zu erzielen. Eine wäre es, vergleichbar zu bestehenden Bewertungssystemen für den Hochbau, mittels einer gewichteten Punkteliste eine qualitative Bewertung zu erzielen. Dies könnte in den frühen Planungsphasen zu einem einfachen Ergebnis zur Variantenabschätzung führen. Im späteren Planungsverlauf, wenn die Baumaterialien gewählt werden, kann für die verschiedenen verfügbaren Materialien eine Umweltbilanzierung erfolgen.

Ein Aspekt, dem in dieser Betrachtung keine Beachtung geschenkt wird, ist die Dauerhaftigkeit des Bauwerks. Dies gilt es ebenfalls zu berücksichtigen.

Literatur/Quellen

- Baumgärtner, U., Fischer, O., Jungwirth, J., Katz, C., Lederer, W., Putz, A., ... & Wüst, W. (2012): Ganzheitliche Beurteilung von Verkehrsinfrastrukturprojekten. Beton- und Stahlbetonbau, 107(8), 510-523. <https://doi.org/10.1002/best.201200029>
- Die Bundesregierung (2022): Klimaschutzgesetz, Generationenvertrag für das Klima. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (Abgerufen am 03.01.2024)
- Europäische Kommission (2019): Der europäische Grüne Deal, Erster klimaneutraler Kontinent werden. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de (Abgerufen am 03.01.2024)
- Schadow, T. (2022): Ressourcenschonung im Bauwesen – Aspekte aus der Planungspraxis. Bautechnik 99, H. 1, S. 50–56. <https://doi.org/10.1002/bate.202100110>
- Umweltbundesamt. (2023). Kohlendioxid-Emissionen in Deutschland nach Sektor im Jahr 2022 (in Millionen Tonnen CO2) [Graph]. In Statista. Zugriff am 03. Januar 2024, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/312450/umfrage/treibhausgasemissionen-in-deutschland-nach-quellgruppe/>

Kontakt

M. Sc. Janus zum Brock, wissenschaftlicher Mitarbeiter

TU Hamburg / Institute of Circular Resource Engineering and Management (CREM)

Tel.-Nr. +49(0)40 42878 4063

E-Mail: janus.zum.brock@tuhh.de

<https://www.tuhh.de/crem/willkommen>

ISBN 978-3-99106-120-5



9 783991 061205