



Recy & DepoTech 2022

VORTRÄGE-Konferenzband zur 16. Recy & DepoTech-Konferenz

9. - 11. November 2022
Montanuniversität Leoben, Österreich



Herausgeber: Roland Pomberger, Josef Adam, Michael Altendorfer, Therese Bouvier-Schwarz, Peter Haslauer, Lisa Kandlbauer, Karim Khodier, Gerald Koinig, Nikolai Kuhn, Tatjana Lasch, Namrata Mhaddolkar, Thomas Nigl, Bettina Rutrecht, Renato Sarc, Theresa Sattler, Sabine Schlögl, Hana Stipanovic, Alexia Tischberger-Aldrian und Sandra Viczek.

VORTRÄGE-Konferenzband
zur 16. Recy & DepoTech-Konferenz

9. - 11. November 2022
Montanuniversität Leoben, Österreich



Herausgeber

Roland Pomberger, Josef Adam, Michael Altendorfer, Therese Bouvier-Schwarz, Peter Haslauer, Lisa Kandlbauer, Karim Khodier, Gerald Koinig, Nikolai Kuhn, Tatjana Lasch, Namrata Mhaddolkar, Thomas Nigl, Bettina Rutrecht, Renato Sarc, Theresa Sattler, Sabine Schlögl, Hana Stipanovic, Alexia Tischberger-Aldrian und Sandra Viczek



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

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

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

© Copyright 2022

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW)
Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, Österreich
Telefon: +43 (0) 3842 / 402-5101, Telefax: +43 (0) 3842 / 402-5102
E-Mail: avaw@unileoben.ac.at, Internet: <https://www.avaw-unileoben.at/>



Gedruckt in Österreich

DGS - Druck u. Graphikservice GmbH
Hardeggasse 69, 1220 Wien, Österreich
Oktober 2022



ISBN: 978-3-200-08675-3

Optimierte Sortierung von Leichtverpackungsabfällen durch ein intelligentes Stoffstrommanagement

N. Kroell^{1*}, X. Chen¹, C. Nordmann², E. Pfund², J. Lorenzo¹, T. Dietl², A. Maghmoumi¹, B. Küppers², A. Feil¹ & K. Greiff¹

¹ Institut für Anthropogene Stoffkreisläufe, RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

² STADLER Anlagenbau GmbH, Altshausen, Deutschland

*Korrespondierender Autor: nils.kroell@ants.rwth-aachen.de

KURZFASSUNG: Das werkstoffliche Recycling von Post-Consumer Kunststoffverpackungen weist trotz bisheriger Bemühungen deutliche Optimierungspotentiale auf. Bereits während der ersten Behandlungsstufe in Sortieranlagen treten erhebliche Wertstoffverluste auf; gleichzeitig werden mangelnde Sortierqualitäten vielfach kritisiert. Ein möglicher Grund dieser Defizite ist die Kombination aus schwankenden Stoffstromeigenschaften und statischer Prozessparametrierung. Ein intelligentes Stoffstrommanagement verspricht diese Defizite zu überwinden, indem einerseits die Prozessparametrierung adaptiv erfolgt und andererseits Stoffstromschwankungen bereits im Vorfeld gezielt reduziert werden. Der vorliegende Beitrag zeigt hierzu auf, wie (i) Stoffströme auch bei fehlender Materialvereinzelung sensorbasiert charakterisiert, (ii) entsprechende Sensordaten zur automatisierten Bewertung von Sortierprozessen sowie Ableitung von Transferfunktionen genutzt und (iii) Stoffstromschwankungen reduziert werden können. Gemeinsam können diese Entwicklungen dazu beitragen, die Sortierperformance zukünftiger sowie bestehender Sortieranlagen zu steigern und damit die Kreislaufführung von Kunststoffen zu erhöhen.

1 EINLEITUNG

Post-Consumer Verpackungskunststoffe sind mit 29,5 Mio. Mg/a (2020) der größte Kunststoffabfallstrom Europas (Plastics Europe 2022). Durch ein werkstoffliches Recycling von Post-Consumer Verpackungskunststoffen zu Rezyklaten und deren Einsatz zur Substitution von Primärkunststoffen werden ökologische Vorteile in Form eingesparter Treibhausgasemissionen (Astrup et al. 2009) und eingesparter Energie (Perugini et al. 2005) erzielt.

In Deutschland erfolgt die Erfassung von Post-Consumer Verpackungskunststoffen für das werkstoffliche Recycling zusammen mit Verbund- und Metallverpackungen als Leichtverpackungsabfall (LVP). Der erfasste LVP-Abfall wird anschließend in LVP-Sortieranlagen in materialspezifische Vorkonzentrate sortiert, die in spezialisierten Aufbereitungsanlagen weiterverarbeitet und anschließend als Rezyklate in den Materialkreislauf zurückgeführt werden.

Trotz bisheriger Bemühungen ist die Bilanz des Post-Consumer Kunststoffrecyclings in Deutschland ernüchternd: Nur etwa 19 Ma.-% (1,02 Mio. Mg/a) der Post-Consumer Kunststoffabfälle konnten 2019 als Output in Rezyklate überführt werden; lediglich 8 Ma.-% (0,43 Mio. Mg/a) wurden zur Substitution von Kunststoffneuware eingesetzt (Conversio Market & Strategy GmbH 2020). In LVP-Sortieranlagen treten häufig erhebliche Wertstoffverluste in die energetische Verwertung auf (Kuchta 2020); gleichzeitig wird die Qualität der erzeugten Vorkonzentrate vielfach kritisiert (bvse-Fachverband Kunststoffrecycling 2017, EU Recycling 2018). Im Forschungsvorhaben ReVise wurde in einer neunmonatigen Konzeptphase untersucht, wie die Kreislaufführung von Kunststoffverpackungen durch Entwicklung eines intelligenten Stoffstrommanagements gesteigert werden kann. Der vorliegende Beitrag fasst die zentralen Erkenntnisse der Konzeptphase zusammen.

2 INTELLIGENTES STOFFSTROMMANAGEMENT

Das Eingangsmaterial von LVP-Sortieranlagen unterliegt erheblichen Schwankungen, die sich aus dessen anthropogenem Ursprung, d. h. dem individuellen Konsum- und Trennverhalten der Abfallerzeuger, ergeben (Antonopoulos et al. 2021, Pretz 2020). Betreiber von LVP-Sortieranlagen sind daher mit der Herausforderung konfrontiert, aus schwankenden und weitgehend undefinierten Inputmaterialien, Vorkonzentrate in hoher und konstanter Qualität zu produzieren.

2.1 Lösungsansatz

Ein intelligentes Stoffstrommanagement soll diese Diskrepanz auf zweierlei Weisen lösen: Erstens sollen auftretende Schwankungen — wo möglich und sinnvoll — reduziert werden. Zweitens sollen Vorkonditionierungs- und Sortierprozesse dynamisch an schwankende Stoffstromeigenschaften adaptiert werden. Zur Implementierung sind drei Voraussetzungen wesentlich (vgl. Khodier et al. 2019):

1. Prozessrelevante Stoffstromcharakteristika müssen zeitnah erfasst werden, um frühzeitig auf veränderte Stoffstromeigenschaften reagieren zu können.
2. Das Verhalten von Vorkonditionier- und Sortierprozessen bei veränderten Stoffstromcharakteristika oder Betriebsparametern muss antizipiert werden können (Kenntnis von Ursache-Wirk-Prinzipien).
3. Stoffströme innerhalb der LVP-Sortieranlage müssen gezielt beeinflusst und Maschinenparametern adaptiert werden können.

2.2 Technologische Defizite im Status Quo

In allen drei Bereichen erschweren technologische Defizite die großtechnische Umsetzung eines entsprechend intelligenten Stoffstrommanagements:

1. Prozessrelevante Stoffstromcharakteristika wie die stoffliche Zusammensetzung an verschiedenen Prozessstellen sind im Status Quo i. d. R. weitgehend unbekannt und derzeit nur über aufwendige Probenahmen und manuelle Sortieranalysen erfahbar.
2. Viele Sortier- und Aufbereitungsprozesse stellen für Post-Consumer Stoffströme eine „Black Box“ dar. Erforderliche Ursache-Wirk-Prinzipien vieler Aggregate sind oft nur unzureichend bekannt.
3. Technische Möglichkeiten, Stoffströme innerhalb von Sortieranlagen gezielt zu beeinflussen (bspw. Ausgleich auftretender Volumenstromschwankungen), fehlen derzeit weitestgehend.

3 IMPULSE DER REVISE-KONZEPTPHASE

Zur Adressierung dieser Defizite fanden in der ReVise-Konzeptphase grundlegende Untersuchungen zu den drei oben genannten Defiziten statt.

3.1 Sensorbasierte Stoffstromcharakterisierung

Eine manuelle Stoffstromcharakterisierung (bspw. durch Probenahme und händische Sortieranalysen) im Status Quo weist erhebliche Nachteile in den Punkten (i) Personal- und Kostenaufwand, (ii) Zeitverzug der Analyseergebnisse und (iii) limitierte Aussagekraft der Analyseergebnisse infolge etwaiger Probenahmefehler auf und stellt (iv) immer nur eine Momentaufnahme dar. Ein kontinuierliches Monitoring von Stoffströmen mittels Sensortechnik verspricht diese Limitierungen zu überwinden.

Zur Feststellung des aktuellen Forschungsstandes und Identifizierung potentieller Forschungslücken wurde im ersten Schritt im Zeitraum 2000 – 2021 ein systematisches Literaturreview von 267 Untersuchungen aus 198 peer-reviewten Journalartikeln zu Anwendungen optischer Sensoren und Machine Learning Algorithmen zum werkstofflichen Recycling nicht-gefährlicher Abfälle durchgeführt (Kroell et al. 2022a). Aus dem Literaturreview ergibt sich u. A. die Einordnung der Sensordatenauswertung in Pixel-, Partikel-, Stoffstrom- und Prozessebene (Abb. 1).

Während eine Vielzahl von Studien die Pixel- und Partikelebene untersucht, existierenden insbesondere auf Stoffstrom- und Prozessebene noch erhebliche Forschungslücken. Darüber hinaus

adressieren nur wenige Untersuchungen die Umwandlung flächen-/volumenbasierter Sensordaten in massenbasierte Stoffstromcharakteristika; diese erscheinen jedoch aufgrund der hohen Verbreitung massenbasierter Indikatoren (bspw. massenbasierte Stoffstromzusammensetzungen, Korngrößenverteilungen, Reinheiten, Wertstoffausbringen) in der Recyclingwirtschaft von hoher praktischer Relevanz (Kroell et al. 2022a).

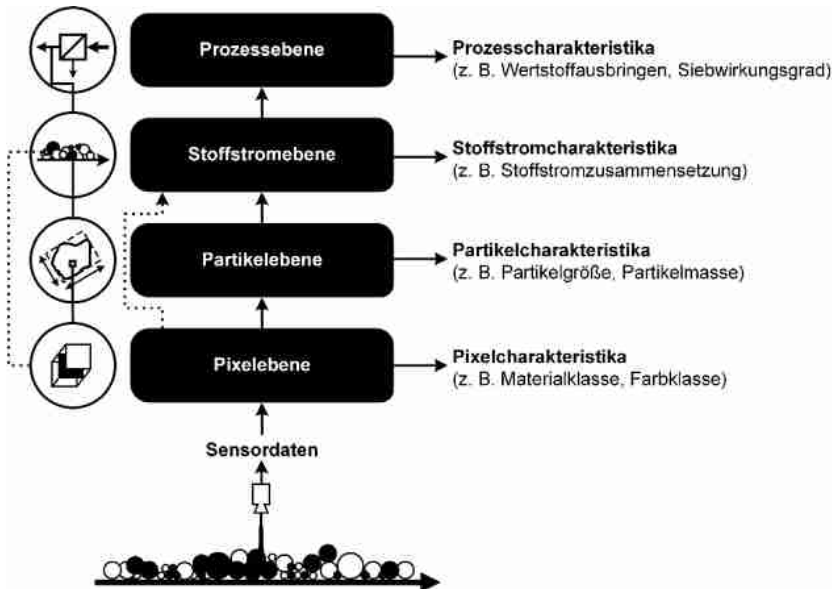


Abb. 1: Ebenen zur Interpretation von Sensordaten (Kroell et al. 2022a)

In einer ersten Fallstudie wurde daher weitergehend die Ermittlung massenbasierter Stoffstromzusammensetzungen mittels Nahinfrarot (NIR)-Sensoren untersucht. Hierzu wurden definierte, binäre Mischungen aus LVP-Materialien (Polyethylenterephthalat [PET]-Flaschen und High Density Polyethylen [HDPE]-Hohlkörper) bei vier verschiedenen Stoffstrompräsentationen (Vereinzelt [VE], Monoschicht [MO], Schütthöhe H1, Schütthöhe H2 [$H2 > H1$], vgl. Abb. 2a) in unterschiedlichen Massenanteilen über einen Messstand geführt. Anschließend wurden die flächenbasierten Sensordaten durch Flächengewichte in massenbasierte Stoffstromzusammensetzungen überführt und mit dem wirklichen massenbasierten Mischungsverhältnis verglichen.

Erste Ergebnisse (Abb. 2) zeigen, dass eine Stoffstromcharakterisierung auch bei fehlender Materialvereinzelung grundsätzlich möglich ist. Für eine präzise Abschätzung des jeweiligen Stoffanteils sind allerdings neben einer präzisen Umrechnung von Flächen- in Massenströme (Kroell et al. 2021) insbesondere Entmischungseffekte (bspw. aufgrund unterschiedlicher Partikelgrößen [Paranusseffekt]) an der Stoffstromoberfläche herausfordernd (Abb. 2b). So zeigt sich bspw. in der untersuchten PET/HDPE-Mischung, dass es bei der Stoffstrompräsentation als Schüttung (H1, H2) zu einer Anreicherung von größeren HDPE-Hohlkörpern im Vergleich zu kleineren PET-Flaschen an der detektierten Oberfläche kommt (Abb. 2b). Eine weitere Herausforderung stellen Verbundanteile von LVP-Verpackungen (Roosen et al. 2020) dar. So werden HDPE-Deckel der PET-Flaschen zwar pixelbasiert korrekt als HDPE erkannt, in der artikelbasierten Bezugsgröße (Handsartierung) jedoch als PET-Flasche gewertet, was zu einer systematischen Überschätzung des HDPE-Anteils führt (Abb. 2b).

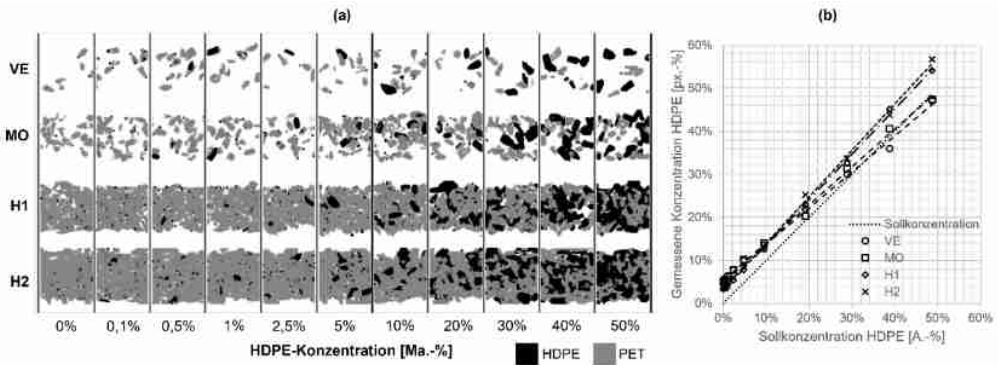


Abb. 2: NIR-basierte Stoffstromcharakterisierung von LVP-Stoffströmen. (a) NIR-Falschfarbenbilder bei verschiedenen Stoffstrompräsentationen, (b) Korrelation zwischen Sensordaten und Stoffstromzusammensetzung

3.2 Ursache-Wirk-Prinzipien: Transferfunktionen sensorbasierter Sortiersysteme

Sensorbasierte Sortiersysteme (insb. NIR-Bandsortierer) bilden das Herzstück moderner LVP-Sortieranlagen (Feil et al. 2021). Für gute Sortierergebnisse ist die Präsentation des Stoffstroms als vereinzelte Monoschicht gegenüber der Sensoreinheit essentiell (Feil et al. 2019) und stellt damit eine wesentliche Stellgröße für das anlagenweite Prozessergebnis dar (Küppers et al. 2022). Zur Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen Input- und Outputstoffströmen in Abhängigkeit verschiedener Stoffstrom-, Betriebs- oder Prozessparameter wurde das Sortierergebnis eines industriellen Sensorsortierers mit Hilfe zusätzlicher NIR-Sensoren automatisiert bewertet (Abb. 3a). Die entwickelte Methode ermöglicht eine zeitaufgelöste und detaillierte Bewertung des Sortierverhaltens. Der ermittelte Zusammenhang lässt sich als Transferfunktion in Abb. 3b darstellen. Die ermittelte Transferfunktion zeigt auf, dass das Sortierergebnis erheblich durch die Stoffstrompräsentation (gemessen als Bandbelegung) beeinflusst wird (Kroell et al. 2022b). Perspektivisch können mit Hilfe entsprechender Transferfunktionen Einzelprozesse in LVP-Sortieranlagen simuliert werden, was eine wichtige Grundlage für eine adaptive Prozesssteuerung in LVP-Sortieranlagen darstellt.

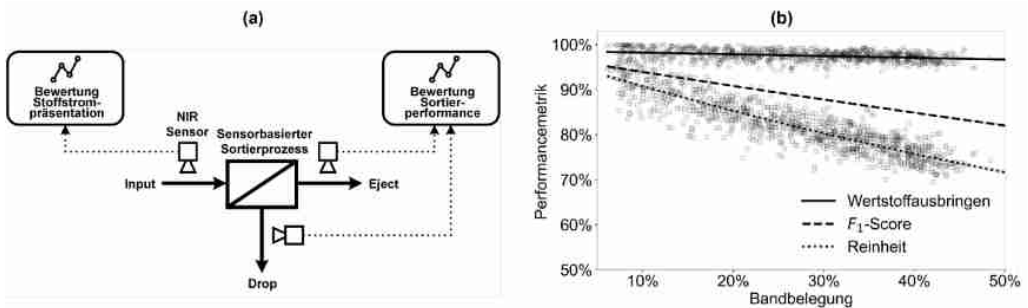


Abb. 3: Automatisierte Ermittlung von Transferfunktion mittels sensorbasiertem Stoffstrommonitoring nach (Kroell et al. 2022b). (a) Versuchskonzept, (b) ermittelte Transferfunktion

3.3 Vergleichmäßigung von Volumenstromschwankungen

Aufgrund fehlender Schütteeigenschaften sowie schwankender Materialzusammensetzungen und Kornformen kommt es in vielen LVP-Sortieranlagen zu Volumenstromschwankungen, die Vorkonditionier- und (sensorbasierte) Sortierprozesse erheblich beeinträchtigen können (Curtis et al. 2021). Ziel einer Vergleichmäßigung von Stoffströmen (Nordmann & Pfund 2020) ist es daher, diese Volumenstromschwankungen zu reduzieren. Hierzu wurde vom Projektpartner STADLER Anlagenbau GmbH die technische Machbarkeit der Vergleichmäßigung anhand eines entwickelten Prototyps demonstriert. Erste Versuche mit LVP-ähnlichem Versuchsmaterial zeigen, dass

es durch den entwickelten Prototyp grundsätzlich möglich ist, kurzzeitige Volumenstromschwankungen zu reduzieren (Abb. 4).

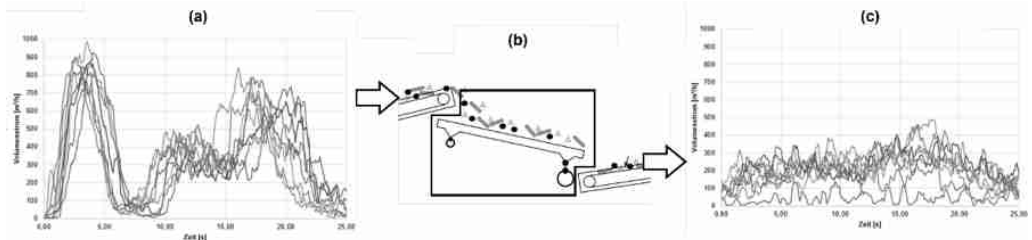


Abb. 4: Vergleichmäßigung von Volumenstromschwankungen. (a) Inputvolumenströme, (b) Vergleichmäßigungssystem, (c) Outputvolumenströme

4 FAZIT UND AUSBLICK

Während viele Prozesse produzierender Industrien auf Basis homogener Eingangsmaterialien häufig an optimalen Betriebspunkten konstant betrieben werden können, erschweren schwankende Stoffstromeigenschaften anthropogener Stoffströme, wie Post-Consumer Verpackungsabfälle, häufig das Eruiieren und Halten optimaler Betriebspunkte. Die Ergebnisse der ReVise-Konzeptphase zeigen auf, dass ein weitergehender Einsatz von bisher zur Sortierung eingesetzter Sensortechnik dabei helfen kann, anthropogene Stoffströme besser charakterisieren zu können. Anhand der gewonnenen Stoffstromdaten können Sortier- und Aufbereitungsprozesse gezielter parametrisiert sowie Einzelprozesse und Prozessketten besser bewertet werden. In Verbindung mit neuen Möglichkeiten zur Stoffstromführung, wie der Vergleichmäßigung von Volumenstromschwankungen, innerhalb von Sortieranlagen ermöglicht dies mittelfristig ein intelligentes Stoffstrommanagement, die sich dadurch an schwankende Stoffstromeigenschaften anpassen und ihre Anlagenperformance verbessern können. Perspektivisch können die geschaffenen Möglichkeiten dabei helfen, die derzeitigen Wertstoffverluste und Reinheitsdefizite in LVP-Sortieranlagen zu reduzieren und somit zur Steigerung eines hochwertigen, mechanischen Recyclings von Post-Consumer Verpackungskunststoffen beitragen.

5 DANKSAGUNG

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Projekt ReVise (FKZ: 033R341) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Wir danken Christian Hündgen und Frank Arleth der Hündgen Entsorgung GmbH & Co. KG für die umfangreiche Unterstützung und Zusammenarbeit in der ReVise-Konzeptphase.

LITERATUR

- Antonopoulos, I., Faraca, G. & Tonini, D. (2021) Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows, and barriers. *Waste management (New York, N.Y.)*, 126, 694–705. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.002>
- Astrup, T., Fruergaard, T. & Christensen, T. H. (2009) Recycling of plastic: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste management & research*, 27(8), 763–772. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345868>
- bvse-Fachverband Kunststoffrecycling (Hrsg.). (2017) *Kunststoffrecycler erhalten weiterhin ungenügende Qualität.* <https://www.bvse.de/gut-informiert-kunststoffrecycling/nachrichten-kunststoffrecycling/1650-kunststoffrecycler-erhalten-weiterhin-ungenuegende-qualitaet.html>
- Conversio Market & Strategy GmbH. (2020) *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019.*
- Curtis, A., Küppers, B., Möllnitz, S., Khodier, K. & Sarc, R. (2021) Real time material flow monitoring in mechanical waste processing and the relevance of fluctuations. *Waste management (New York, N.Y.)*, 120(1), 687–697. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.037>
- EU Recycling (Hrsg.). (2018) *Wie können mehr Kunststoffe in Leichtverpackungen recycelt werden?* <https://eu-recycling.com/Archive/20131>

- Feil, A., Coskun, E., Bosling, M., Kaufeld, S. & Pretz, T. (2019) Improvement of the recycling of plastics in lightweight packaging treatment plants by a process control concept. *Waste management & research*, 37(2), 120–126. <https://doi.org/10.1177/0734242X19826372>
- Feil, A., Kroell, N., Pretz, T. & Greiff, K. (2021) Anforderungen an eine effiziente technologische Behandlung von Post-Consumer Verpackungsmaterialien in Sortieranlagen. *Müll und Abfall*, 21(7), 362–370. <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2021.07.04>
- Khodier, K., Curtis, A., Sarc, R., Lehner, M., O'Leary, P. & Pomberger, R. (2019) Smart solid waste processing plant: vision and pathway. In *ISWA world congress 2019*, Bilbao, Spain.
- Kroell, N., Chen, X., Greiff, K. & Feil, A. (2022a) Optical sensors and machine learning algorithms in sensor-based material flow characterization for mechanical recycling processes: A systematic literature review. *Waste management (New York, N.Y.)*, 149, 259–290. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.05.015>
- Kroell, N., Chen, X., Maghmoumi, A., Koenig, M., Feil, A. & Greiff, K. (2021) Sensor-based particle mass prediction of lightweight packaging waste using machine learning algorithms. *Waste management (New York, N.Y.)*, 136, 253–265. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.017>
- Kroell, N., Dietl, T., Maghmoumi, A., Chen, X., Küppers, B., Feil, A. & Greiff, K. (2022b) Assessment of sensor-based sorting performance for lightweight packaging waste through sensor-based material flow monitoring: Concept and preliminary results. In K. Greiff, H. Wotruba, A. Feil, N. Kroell, X. Chen & Gürsel, Devrim, Merz, Vincent (Vorsitz), *Sensor-based Sorting and Control (SBSC) 2022*, Aachen.
- Kuchta, K. (2020) Bewertung des Recyclingprozesses von Kunststoffverpackungen. In O. Holm, E. Thomé-Kozmiensky, D. Goldmann & B. Friedrich (Vorsitz), *Recycling- und Sekundärrohstoffe*, Berlin.
- Küppers, B., Schlögl, S., Kroell, N. & Radkohl, V. (2022) Relevance and challenges of plant control in the pre-processing stage for enhanced sorting performance. In K. Greiff, H. Wotruba, A. Feil, N. Kroell, X. Chen & Gürsel, Devrim, Merz, Vincent (Vorsitz), *Sensor-based Sorting and Control (SBSC) 2022*, Aachen.
- Nordmann, C. & Pfund, E. (2020) Beschreibung und Darstellung der Messmöglichkeiten für die Gleichmäßigkeit inhomogener Stoffströme. In R. Pomberger, J. Adam, A. Aldrian, M. Altendorfer, A. Curtis, T. Dobra, . . . M. Wellacher (Vorsitz), *Recy & Depotech 2020*, Montanuniversität Leoben, Österreich.
- Perugini, F., Mastellone, M. L. & Arena, U. (2005) A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes. *Environmental Progress*, 24(2), 137–154. <https://doi.org/10.1002/ep.10078>
- Plastics Europe (2022) *THE CIRCULAR ECONOMY FOR PLASTICS: A European Overview*. https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2022/04/PlasticsEurope-CircularityReport-2021_28022022.pdf
- Pretz, T. (2020) Was kann moderne Abfall-Aufbereitungstechnik leisten? In R. Pomberger, J. Adam, A. Aldrian, M. Altendorfer, A. Curtis, T. Dobra, . . . M. Wellacher (Vorsitz), *Recy & Depotech 2020*, Montanuniversität Leoben, Österreich.
- Roosen, M., Mys, N., Kusenberg, M., Billen, P., Dumoulin, A., Dewulf, J., van Geem, K. M., Ragaert, K. & Meester, S. (2020) Detailed Analysis of the Composition of Selected Plastic Packaging Waste Products and Its Implications for Mechanical and Thermochemical Recycling. *Environmental science & technology*, 54(20), 13282–13293. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03371>